

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДУЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.

Ш. И. КЛЫЧЕВ, доктор технических наук, профессор
С. А. БАХРАМОВ, доктор технических наук, профессор

З. И. КЛЫЧЕВ, инженер

*Ташкентский государственный технический университет,
г. Ташкент, Узбекистан*

В. В. ХАРЧЕНКО, доктор технических наук, профессор
ФНАЦ ВИМ, г. Москва, Россия

E-mail: kharval@mail.ru

Аннотация. Эффективность использования солнечного излучения является важным фактором снижения капитальных затрат на создание солнечных станций. Этот параметр существенно зависит от КПД солнечных элементов, совершенствованию которых путем оптимизации конструкции солнечного элемента или модернизации технологии их изготовления посвящено множество публикаций. Настоящая статья посвящена рассмотрению возможности повышения эффективности использования солнечного излучения оптическими методами в солнечных элементах различных конструкций, работающих совместно с концентраторами различного типа.

Ключевые слова: *солнечная энергия, фотоэлектрическое преобразование, линза Френеля, вторичный концентратор, оптическая среда*

Актуальность. В последние годы возобновляемые источники энергии, в частности солнечная энергетика, играют все более заметную роль в мировом энергетическом балансе и в формировании новых направлений развития мировой энергетики [1]. Активно развивается автономная энергетика, базирующаяся на ВИЭ, заметно возросли темпы создания солнечных энергетических систем, работающих на сеть. Проводятся работы по изучению функционирования солнечных энергетических установок, работающих параллельно с сетью [2].

Анализ последних исследований и публикаций. Вновь создаваемые солнечные станции СЭС базируются преимущественно на плоских солнечных фотоэлектрических панелях. Вместе с тем проводятся работы по созданию новых фотоэлектрических устройств, работающих с концентраторами, а также исследования по изысканию возможностей повышения эффективности модульных солнечных фотоэлектрических установок с применением модернизированных оптических систем [3].

Интенсивно ведутся работы по разработке солнечных фотоэлектрических модулей, состоящих из микроконцентратора (обычно

линза Френеля (ЛФ)) и каскадного фотоэлемента [4,5]. Ранее предполагалось, что такие модули уже при концентрации солнечного излучения от 200 до 500 могут оказаться экономически рентабельными, однако, сейчас считается, что для этого концентрации должны быть на уровне 800-1000. При этом принято считать, что оптический КПД микроконцентраторов составляет порядка 90 % [4], однако, предварительные оценки показывают, что КПД ЛФ не достигает и 50 %.

Вышеуказанное определяет необходимость более детального анализа энергетических характеристик линз Френеля (ЛФ) – оптический КПД, концентрация, а также распределение концентрированного потока по фотоэлементу и в целом необходимость поиска путей повышения эффективности концентраторов. В [3,6] было показано, что один из путей повышения КПД концентраторов это использование оптических сред.

Цель исследования – определение характеристик ЛФ с точки зрения указанных задач, а также возможностей повышения оптического КПД концентраторов за счет использования оптических сред является целью настоящей работы.

Материалы и методы исследования. Рассмотрим характеристики ЛФ. Методы расчета ЛФ рассматривались в [7, 8], в [9] была предложена методика оценки энергетических характеристик ЛФ. При этом в [7] не учитывались неточности оптических поверхностей, а в [9] влияние на КПД распределения концентрированного солнечного потока по поверхности приемника.

Результаты исследования и их обсуждение. Расчетная схема ЛФ и её основные параметры приведены на рис.1, где f – фокусное расстояние линзы; k – число поясов или "зубьев" ЛФ; R_{vk} , R_{nk} – верхний и нижний габаритные радиусы i -го зуба; U_0 – угол раскрытия линзы; i – номер "зуба"; r_p – "расчетный" радиус концентрированного пятна по которому определяются параметры зубьев; h_i – толщина i -го зуба; L_i – длина рабочей грани i -го зуба.

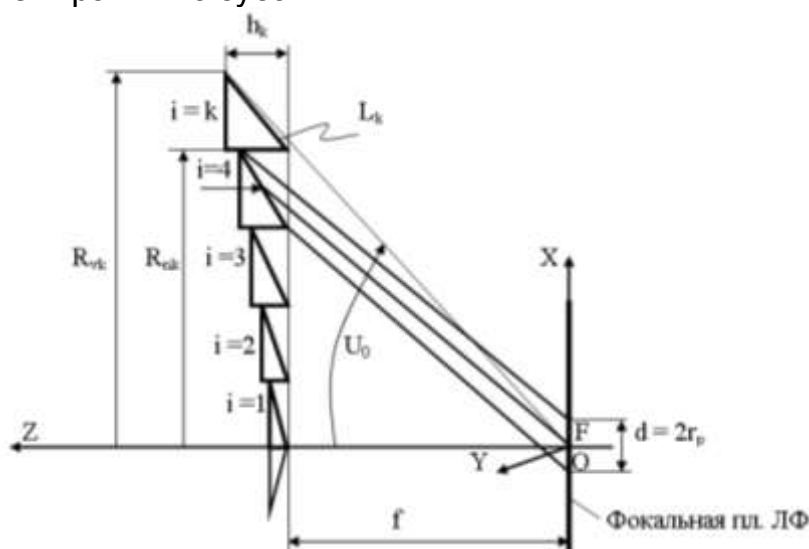


Рис.1. Расчетная схема ЛФ по схеме 1

В общем случае имеем две расчетные схемы ЛФ: первая – вершины зубьев лежат в одной плоскости; вторая – основания зубьев лежат в одной плоскости. Отметим, что по технологичности изготовления и сборки, первая схема имеет преимущества. Это связано с тем, что ЛФ в модуле должна иметь с двух сторон защитные плоские пластинки.

На первом этапе расчета ЛФ определяются предварительные значения f и габаритного радиуса R ($R = Rvk$). Обобщенными геометрическими параметрами ЛФ являются угол раскрытия U_0 ($U_0 = \arctg(R/(f+h_K))$) и относительный радиус приемника r_P/f , а энергетическими характеристиками концентрация $C_A = E_A/(E_0 \cdot \tau)$ и относительный поток на некоторой площадке радиуса r или F_r/F_0 , где E_A – плотность концентрированного потока точке A приемника, E_C – плотность прямого солнечного излучения, τ – пропускная способность материала ЛФ и F_0 – поток солнечного излучения, падающий на ЛФ. Влияние f и R на концентрации поясов в фокусе точной ЛФ (среднеквадратическая ошибка неточности поверхностей и наклона рабочих граней $\sigma=0$) при $r_P/f = 0.01$, $R = 84,5\text{мм}$ и $n = 1,4584$ и различных f приведено на рис.2.

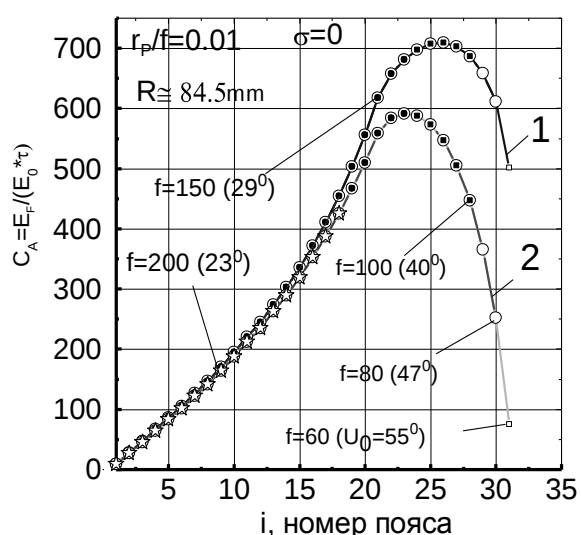


Рис.2. Концентрации в фокусе ЛФ от отдельных поясов, при различных f , без учета (1) и с учетом (2) френелевских потерь на отражение

Из рис. 2 видно, что в ЛФ угол раскрытия должен быть около 30° и для данной Rf около $110 \div 150$ мм, а число поясов – порядка 30 (это существенно меньше числа поясов в ЛФ оптического назначения).

Цель второго этапа расчета – окончательный выбор f , U_0 , определение допусков на неточности изготовления ЛФ и потока по приемнику. Исходные данные на этом этапе – средняя концентрация на приемнике C . Основные варьируемые параметры r_P/f (могут быть разными для разных зубьев), угловые неточности изготовления поверхностей σ и смещение центра пятна пояса (зуба) от фокуса rr (на рис. 2 $rr = 0$).

Концентрации в фокальной плоскости точной (суммарная среднеквадратическая ошибка $\sigma = 0$) и неточной ($\sigma = 8$) при различных r_p/f приведено на рис. 3. Там же, для сравнения, приведены концентрации параболического и сферического зеркал.

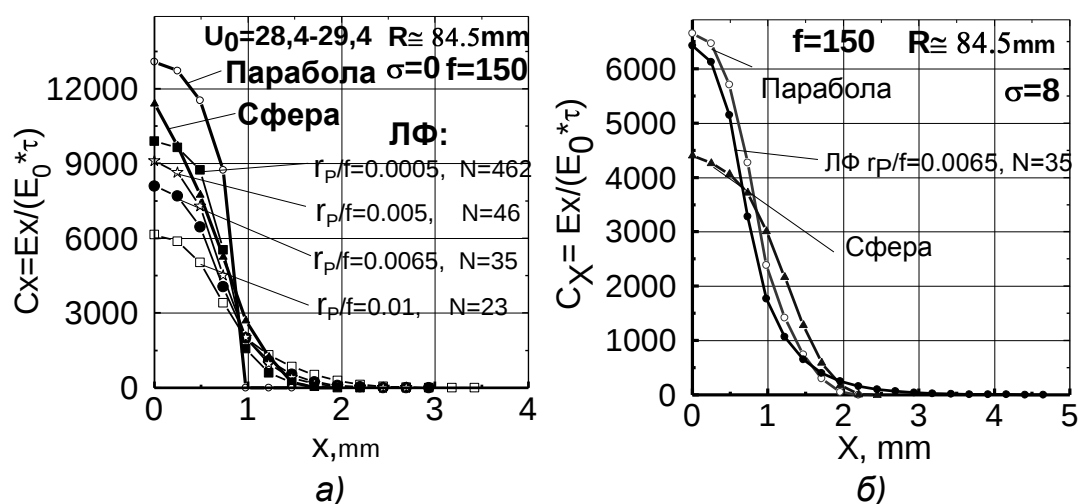


Рис.3. Концентрации в фокальной плоскости: ЛФ, параболы и сферы, точных (а) и неточных (б)

Как видно, при $\sigma = 0$ ЛФ дает меньшие концентрации, однако, для реальных случаев, когда σ порядка 8 угловых минут, концентрации ЛФ уже при $k = 35$ достаточно близки к концентрациям параболоида и превышают концентрации сферического зеркала.

Влияние на концентрации и потоки в фокальной плоскости угловых неточностей ЛФ (α – неточность угла наклона рабочей грани в целом, σ_s – местные неточности грани; σ_b – суммарная неточность плоских поверхностей ЛФ и защитных стекол) приведено в табл. 1.

Расчеты потока и концентрации для квадратной в плане ЛФ размерами 120x120 мм и $f = 140$ мм и квадратного приемника проводились для вариантов:

- 1) $\sigma_s = 0$, $\sigma_b = 0$, $\alpha_f = 0$, при $r_p/f = 0.065$, $rr = 0$;
- 2) $\sigma_s = 8'$, $\sigma_b = 6'$, $\alpha_f = -10'$, при $r_p/f = 0.065$, $rr = 0$;
- 3) $\sigma_s = 8'$, $\sigma_b = 6'$, $\alpha_f = -10'$, и варьировании r_p/f , и rr .

1. Средние концентрации C_s и потоки F_s/F_0 в фокальной плоскости ЛФ с учетом и без учета френелевских потерь на рабочей грани зубьев.

№ варианта	Приемник, мм	C_s , без фп	C_s , с фп	F_s/F_0 , без фп	F_s/F_0 , с фп
1	2.79x2.79	1805,9	1696,1	0,976	0,917
	4,65x4,65	666,7	625,8	1,001	0,940
2	2.79x2.79	1523,5	1434,9	0,824	0,776
	4,65x4,65	641,8	602,7	0,964	0,905
3	2.79x2.79	1514,1	1424,6	0,818	0,770
	4,65x4,65	645,2	605,7	0,969	0,909

Как видно, влияние неточностей на поток по приемнику существенно, можно также видеть, что имеется некоторая возможность увеличения потока и концентрации за счет варьирования параметрами зубьев. Для окончательного выбора параметров ЛФ и площади приемника необходимо учесть влияние дисперсии показателя преломления. Возможное влияние дисперсии на концентрацию приведено на рис.4. Как видно, влияние дисперсии существенно и должно учитываться при выборе параметров ЛФ. Дисперсия приводит к тому, что для разных длин волн имеем разные f , поэтому, в принципе, влияние дисперсии можно несколько уменьшить, за счет выбора оптимального положения приемника и установки перед приемником вторичного зеркального концентратора, например, в виде конуса.

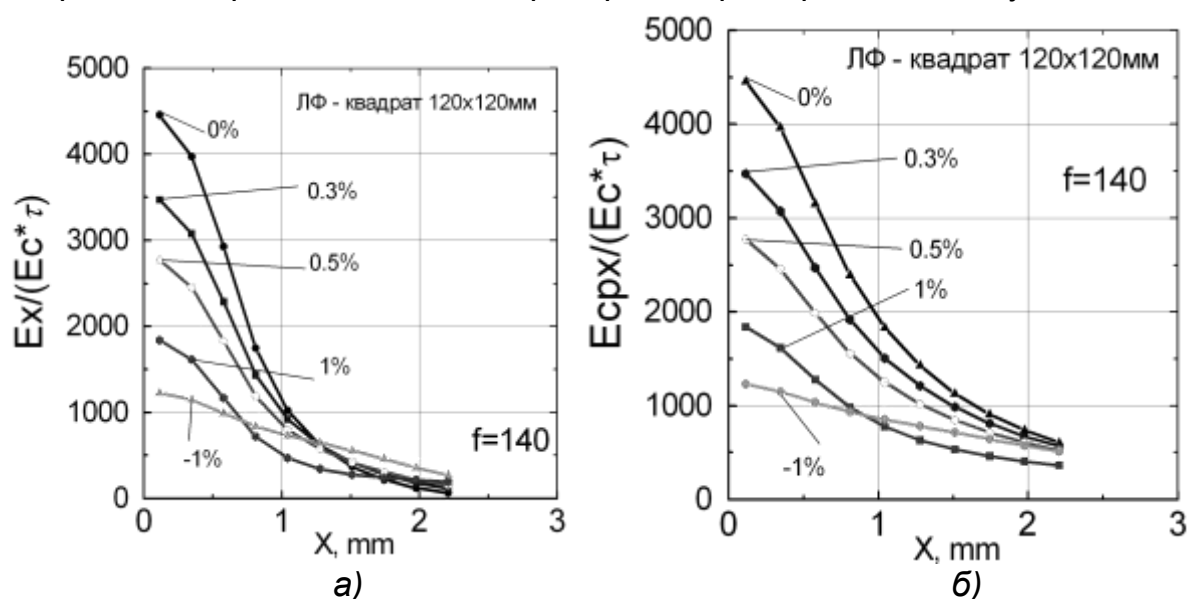


Рис. 4. Влияние дисперсии на локальные (а) и средние (б) концентрации ЛФ

По результатам исследования ЛФ можно сделать следующие практические выводы:

1. Параметр rp/f в линзе Френеля для большей части поясов можно принять равным 0.0065, для крайних поясов для уменьшения толщины зуба необходимы меньшие значения.

2. В данной ЛФ возможны $C > 900$ на площади 2.8x2.8мм.

3. Френелевские потери на 5 плоских составят 18,5 %, потери из-за неточностей ЛФ – 14 % т.е. КПД ЛФ, даже без учета дисперсии, составит не более 64 %.

В [3, 10] было предложено решение задачи повышения концентрации – применение вторичных концентраторов, представляющих оптические среды, в которых, как известно, яркость излучения повышается пропорционально квадрату показателя преломления среды. Возможности использования свойств оптической среды для повышения плотности излучения рассматривались в [10]. Были определены условия, при которых этот эффект имеет место.

С целью оценки возможности использования этого эффекта для повышения концентрации в СФЭУ рассмотрим модельную систему, включающую первичный зеркальный параболоидный концентратор (K) и вторичный концентратор, представляющий оптическую среду в виде полусферической линзы (L) с центром кривизны, в фокусе F параболоида приведена на рис.5 (PV – фотоэлемент).

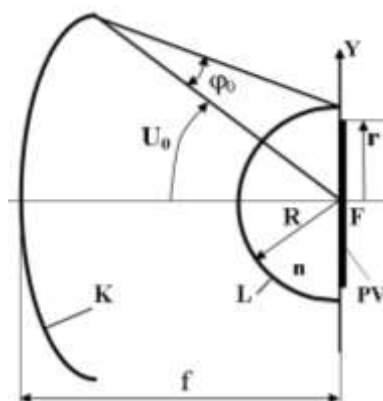


Рис. 5. Схема системы «концентратор-линза»

Основными параметрами этой системы K - L являются: φ_0 – угловой радиус диска Солнца, n – показатель преломления и R – радиус кривизны линзы (среды), U_0 – угол раскрытия, f – фокусное расстояние и σ – среднеквадратическая неточность поверхности параболоидного концентратора.

На рис. 6 приведены концентрации (а) и потоки (б) в фокальной плоскости параболоидного концентратора на воздухе ($n = 1$) и в системе «концентратор – линза» (среда - дистиллированная вода с $n = 1,33$), без учета френелевских потерь (в данной системе они не превышают 2–3 %). Расчеты проводились в предположении постоянства n . Как видно из рис.6а, в системе K - L , по сравнению с параболоидным концентратором повышаются плотность потока и соответственно уменьшаются размеры пятна изображения Солнца.

Причем эти эффекты имеют место как для точного, так и неточного концентратора.

Анализ показывает, что указанные эффекты в среде обусловлены двумя факторами. Первый – это оптические свойства линзы, что приводит к уменьшению пятна изображения и второй – это увеличение яркости излучения в среде (пропорционально квадрату показателя преломления среды). Причем как видно (см. рис. 6 б), потоки в исходном пятне и уменьшенном – одинаковы. Доказательством влияния второго фактора является то, что на концентрацию в фокусе оптические свойства линзы не влияют (в фокусе собираются только осевые лучи и т.к. они идут по нормали к сфере, то не преломляются), т.е. увеличение плотности в фокусе связано только с одним фактором – увеличением яркости излучения в среде. Далее по пятну действуют оба фактора.

Полученные результаты имеют практическое значение, т.к. позволяют уменьшить размеры фотоэлемента.

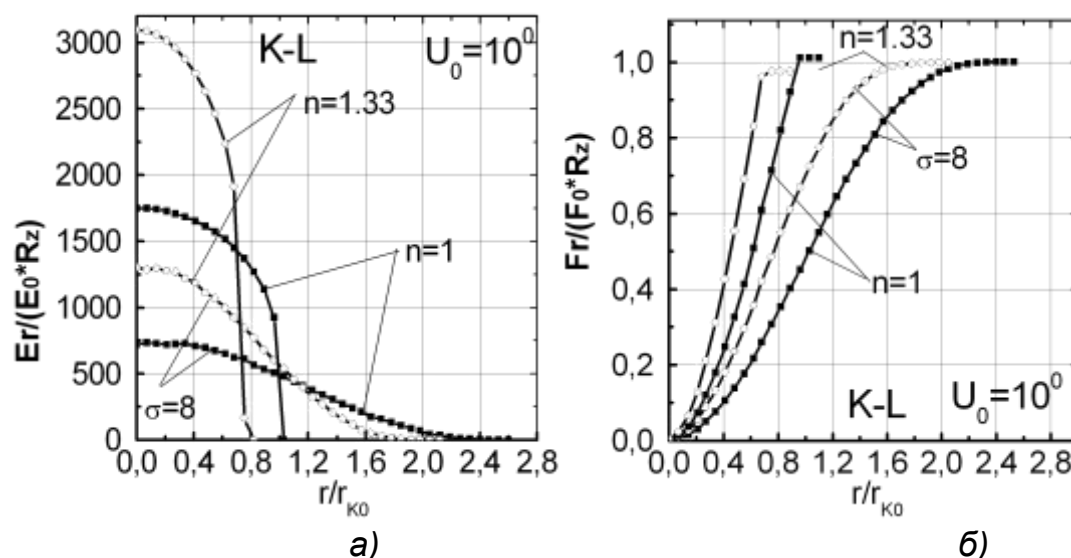


Рис. 6. Концентрации и потоки в фокальной плоскости концентратора на воздухе (а) и в системе K-L в среде(б) для точного ($\sigma=0$) и неточного ($\sigma=8$ угловых минут) концентратора

Так, в рассмотренной системе, когда допустимый поток, перехватываемый фотоэлементом, составляет 95%, уменьшение площади фотоэлемента за счет применения оптической среды (жидкая линза или линза с промежуточным жидким слоем) составит для точного концентратора около 1.8 раза, а для неточного – 1,7 раза. При этом соответственно пропорционально возрастает и средняя по приемнику концентрация. С увеличением n эти эффекты могут увеличиваться.

Выводы и перспективы. Приведенные выше результаты показывают, что использование набора оптических приемов позволяет существенно улучшить характеристики солнечных энергетических систем и повысить их энергетическую эффективность. Их применение наряду с дальнейшим совершенствованием конструкций собственно элементов может оказаться полезным для решения проблемы расширения использования солнечных энергетических систем на практике.

Список использованных источников

1. Стребков, Д. С. Роль и место ВИЭ в развитии глобальной энергетики / Д. С. Стребков, В. В. Харченко // Малая энергетика. – 2011. – № 3-4. – С. 3-12.
2. Харченко, В. В. Солнечная электростанция для параллельной работы / В. В. Харченко, В. А. Гусаров, В. А. Майоров, В. А. Панченко // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 02 (119). – С.37-43.
3. Клычев, Ш. И. Оптические среды как способ повышения эффективности концентраторных солнечных фотоэлектрических установок / Ш. И. Клычев, С. А. Бахрамов, В. В. Харченко, З. Ш. Клычев // Гелиотехника. – 2012. – №2. – С.71-73.

4. Masafumi Yamaguchi, A., Tatsuya Takamoto, B., Kenji Araki, C, Nicholas, Ekins-Daukes. A Multi-junction III-V solar cells: current status and future potential // Solar Energy. – 2005. – V.79. – P. 78-85.
5. Андреев, В. М. Перспективы создания космических солнечных батарей с концентраторами излучения и многопереходными гетероструктурными фотопреобразователями / В. М. Андреев, В. А. Грилихес и др. // Известия АН РФ. Энергетика. – 2003. – С. 60-69.
6. Клычев, Ш. И. Концентрация солнечного излучения в оптической среде / Ш. И. Клычев, С. А. Бахрамов, Ю. А. Дудко // Гелиотехника. – 2009. – №3. – С. 78-81.
7. Ахмедов, Х. Оптико-энергетические характеристики круговых линз Френеля с плоскими поясами / Х. Ахмедов, Р. А. Захидов, Ш. И. Клычев // Гелиотехника. – 1991. – №1. – С. 48-51.
8. Winston, R. Opt- Soc. Am. – 1970. – V.60. – P. 245-247.
9. Клычев, Ш. И. Концентрация солнечного излучения в оптической среде / Ш. И. Клычев, С. А. Бахрамов, Ю. А. Дудко // Гелиотехника. – 2009. – №3. – С. 78-81.

References

1. Strebkov, D. S., Kharchenko, V. V. (2011). Rol' i mesto VIE v razvitii global'noy energetiki [The role and place of renewable energy in the development of global energy]. Malaya energetika, 3-4, 3-12.
2. Kharchenko, V. V., Gusarov, V. A., Mayorov, V. A., Panchenko, V. A. (2013). Solnechnaya elektrostantsiya dlya parallel'noy raboty [Alternative energy and ecology]. Al'ternativnaya energetika i ekologiya, 2 (119), 37-43.
3. Klychev, Sh. I., Bakhramov, S. A., Kharchenko, V. V., Klychev, Z. Sh. (2012). Opticheskiye sredy kak sposob povysheniya effektivnosti kontsentratornykh solnechnykh fotoelektricheskikh ustanovok [Optical media as a way to improve the efficiency of concentrator solar photovoltaic systems]. Geliotekhnika, 2, 71-73.
4. Masafumi Yamaguchi, A., Tatsuya Takamoto, B., Kenji Araki, C, Ekins-Daukes, Nicholas (2005). A Multi-junction III-V solar cells: current status and future potential. Solar Energy, 79, 78-85.
5. Andreyev, V. M., ., Grilikhes, V.A. ed. (2003). Perspektivy sozdaniya kosmicheskikh solnechnykh batarey s kontsentratorami izlucheniya i mnogoperekhodnymi geterostrukturnymi fotopreobrazovatelayami [Prospects for the creation of space solar batteries with radiation concentrators and multi-transition heterostructural photo-converters]. Izvestiya AN RF. Energetika, 60-69.
6. Klychev, Sh. I., Bakhramov, S. A., Dudko, Y. A. (2009). Kontsentratsiya solnechnogo izlucheniya v opticheskoy srede [The concentration of solar radiation in an optical medium]. Geliotekhnika, 3, 78-81.
7. Akhmedov, Kh., Zakhidov, R. A., Klychev, Sh. I. (1991). Optiko-energeticheskiye kharakteristiki krugovykh linz Frenelya s ploskimi poyasami [Optical-energy characteristics of circular Fresnel lenses with flat belts] Geliotekhnika, 1, 48-51.
8. Winston, R. (1970). Opt- Soc. Am., 60, 245-247.
9. Klychev, Sh. I., Bakhramov, S. A., Dudko, Y. A. (2009). Kontsentratsiya solnechnogo izlucheniya v opticheskoy srede [The concentration of solar radiation in an optical medium]. Geliotekhnika, 3, 78-81.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДУЛЬНИХ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

Ш. І. Кличов, С. А. Бахрамов, З. І. Кличов, В. В. Харченко

Анотація. *Ефективність використання сонячного випромінювання є важливим фактором зниження капітальних витрат на створення сонячних станцій. Цей параметр істотно залежить від ККД сонячних елементів, вдосконаленню яких шляхом оптимізації конструкції сонячного елемента або модернізації технології їх виготовлення, присвячено безліч публікацій. Ця стаття присвячена розгляду можливості підвищення ефективності використання сонячного випромінювання оптичними методами в сонячних елементах різних конструкцій, які працюють спільно з концентраторами різного типу.*

Ключові слова: *сонячна енергія, фотоелектричне перетворення, лінза Френеля, вторинний концентратор, оптичне середовище*

INCREASE OF EFFICIENCY OF THE MODULAR SOLAR PHOTOVOLTAIC INSTALLATIONS.

Sh. I. Klychev, S. A. Bahramov, Z. I. Klychev, V. V. Kharchenko

Annotation. *Efficiency of sunlight use is the important factor of decrease in capital expenses for creation of solar stations. This parameter essentially depends on efficiency of solar cells, to which improvements by optimization of a design of a solar cell or modernization of their manufacturing technology the set of publications is devoted. The present article is devoted consideration of possibility of increase of efficiency of use of solar radiation by optical methods for solar cells working together with concentrators of various type.*

Keywords: *solar energy, photo-electric transformation, a lens of Fresnell, secondary concentrator, optical environment*

SILAGE FROM THE STANDARD RYE AS SUBSTRATE FOR THE PRODUCTION OF AGRICULTURAL BIOGAS

J. BOHDZIEWICZ, Ph.D., D. Sc. (Eng.), Professor
Silesian University of Technology in Gliwice, Poland

J. CEBULA, Ph.D., D. Sc. (Eng.), Associate Professor
The University of Bielsko-Biala, Poland

K. PIOTROWSKI, Ph.D., D. Sc. (Eng.), Assistant Professor
Silesian University of Technology in Gliwice, Poland

P. SAKIEWICZ, Ph.D (Eng.)
Silesian University of Technology in Gliwice, Poland

...

Abstract. *Necessity of electricity generation together with climate protection make us do reaching out for renewable energy resources. Year in, year out the demand for renewable biofuels grows, which will be able to replace the presently used fuel products based on nonrenewable natural oil and coal. The possibilities and prospects of industrial-scale utilization of silage made of standard rye (*Secale cereale* L.) for the biogas production are presented. It is important technological issue, especially in these countries, where high potential and agricultural tradition of this cereal type cultivation exists. The measurement results concerning the methane fermentation process course are presented and discussed. Analysis results concerning selected elements contents in silage are also provided.*

Key words: *biogas, biomethane, secale cereale L., standard rye, silage*

Introduction. In the nearest future making use of soil will be connected not only with food production, but also with energy generation. It will cause demand for agricultural biomass to happen. It results from emission of greenhouse gases into the atmosphere, which in case of direct biomass burning or/and its conversion into fuel(s) provides closed CO₂ cycle [1]. Demand for food will also induce the growth of animal production [2]. Intensive animal breeding, especially connected with high breeding density, as it is usually observed in animal breeding farms, is closely connected with generation of significant amounts of faeces. Modern pig fatten farms are the most often run in a bedding-free system, thus the faeces are removed from the system in a form of liquid manure. However, it represents hazard for natural environment, including inland waters, soils and air. Essential effect on the biosphere is exerted by nitrogen, emitted in a form of ammonia. It is estimated, that the amount of ammonia emitted by the pigs reaches even 5,1 kg NH₃/(animal×year). Ammonia emission starts as early as in the farm buildings, continues during storage, transport and during inappropriate distribution of

liquid manure on the agricultural fields. The nitrogen compounds emitted from the farms contaminate air, ground and surface waters nearby the farms and fields fertilized with the use of liquid manure. High doses of such fertilizer type over the agricultural fields can lead to permanent anaerobiose, thus in result inhibition of biological life in the soil environment. Atmospheric air in the vicinity of the farms is contaminated with methane, carbon dioxide, carbon monoxide, ammonia, mercaptanes, aldehydes, amines, hydrogen sulphide and other compounds, which at their high concentrations are poisons. Since these are the compounds characterized by very low smell threshold (low concentration), thus even small amounts of these emitted are smell detectable and make deterioration of the air quality in result of unpleasant, characteristic smelt. Thus new technologies of these faeces utilization integrated with simultaneous energy production are sought-after [3,5,6,7].

Co-fermentation of green biomass with liquid manure offers splendid conditions both for troublesome liquid manure utilization and for renewable energy production. It represents one from the experimentally verified, economically justified methods. The process is based on anaerobic decomposition of easily decomposable, macromolecular organic compounds into simpler chemical species, whereas sparingly decomposable compounds into the stable ones. Present animal breeding farms should be modernized or replaced with modern technological plans. It will make reduction of animal breeding inconvenience for natural environment and biosphere possible. Moreover, according to the idea of practical utilization of renewable energy sources the biogas production technologies are worth recommending. For the research tests e.g. fermentation in nylon sacks is introduced [4]. Industrial scale solutions make use of not only concrete-based reactor constructions (Fig. 6), but also some constructions made with sheets of enamel metal (Fig. 5).



Fig. 1. Standard rye ready for silage production (photo J. Cebula)

Development of the agricultural wastes conversion methods together with energetic plants especially designed for energy production is a chance for the development of many knowledge domains like: organization of biogas

production, economy, ecology, chemical/biochemical technology. It also favors unification of effort towards construction of new, local agricultural biogas plants, biomass production specially intended for biogas synthesis, modern directions of agricultural biogas applications in the transport, etc. All over the world one observes increasing activities oriented for pretreatment of biogas for the use in the fuel cells or as the fuel for internal combustion engines and for co-generation systems.

The main aim of the presented research was determination of the possibilities of the standard rye silage utilization for the agricultural biogas production. Determination of the silage decomposition course during the methane fermentation process is of primary interest. The laboratory tests were also oriented for realistic simulation of the anaerobic fermentation process in a biogas plant.

Experiments. One of the substrates convenient for biogas production may be silage made of standard rye. The standard rye was harvested during ripen season what makes sowing and harvest from the same field crop cultivated between main crops, which can also be used in silage production in the same vegetation season, possible. Farmers are interested in gaining large biomass crops from 1 ha. The plant type of the known requirements, destined for silage, is thus standard rye. Fig. 1 presents this plant just before harvest.

Methodology of the laboratory scale tests, as well as analytical description of the processes observed were taken from the German norm DIN 38414-8 determining the research methods for water, wastewater and wastewater sludge (sediments) analysis. The norm includes descriptions of the biological-chemical methods for research and tests in susceptibility to anaerobic decomposition of the sludges and wastewaters of high content of organic substances. Diversification of biogas yields from the organic substances conversion was roughly assumed as the conventional measure and quantification of this susceptibility. Measurement stand and equipment, as well as the experimental results analysis methods are presented in detail in [8]. In Fig. 2 an sample of silage used for the tests and analyses is presented.



Fig. 2. Sample of silage made of standard rye used for experiment (photo J. Cebula)

In industrial scale silage from standard rye is produced with the use of heavy equipment (Fig. 3). Part of silage derived from the previous year crops is also visible.



Fig. 3. Production of silage from standard rye for the biogas plant and animals feeding (photo J. Cebula)

For the transportation of silage from silos and chambers made directly on the fields the self-unloading trailers are in the common use (Fig. 4).



Fig. 4. The self-unloading trailer used for transportation of silage in a biogas plant (photo J. Cebula)

New domain of knowledge and biochemical industry - energy production based on biogas synthesis – makes use of the most modern technical solutions. In some countries metal-made reactors are used (Fig. 5), whereas in others reinforced concrete constructions are in practical use (Fig. 6).



Fig. 5. Fermenters made of enamel metal sheets (photo J. Cebula)



Fig. 6. Fermenters made of reinforced concrete and insulated with polystyrene foam (photo J. Cebula)

We determined of content elements important from a points of view of fertilizing plants (Fig. 7, 8).

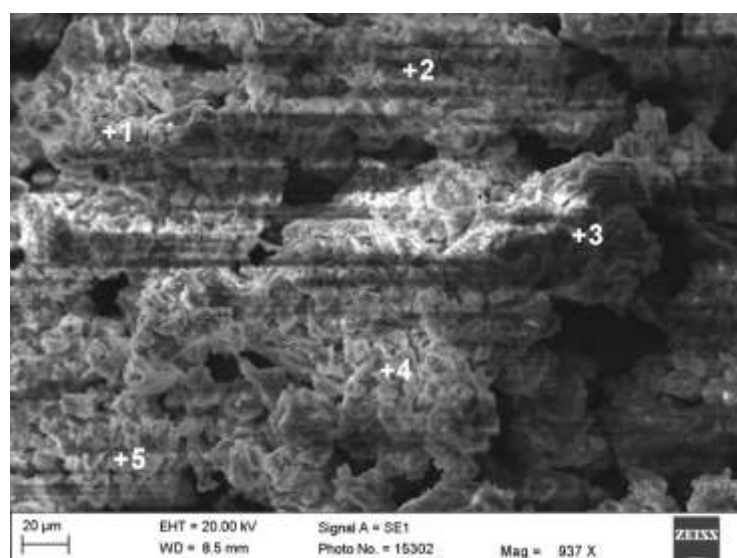


Fig. 7. Scanning electron microscope image of burn to ashes rye

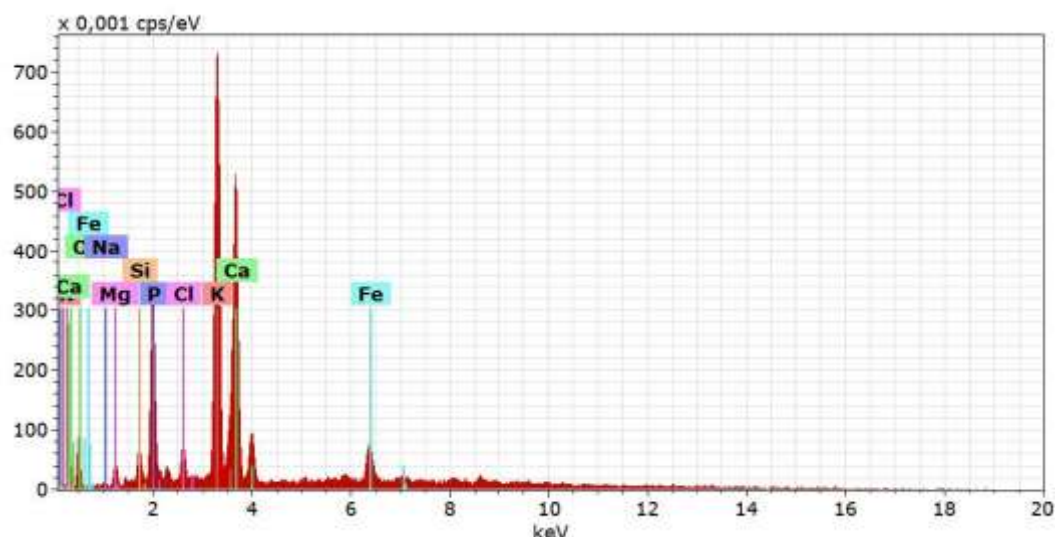


Fig. 8. Analytical EDS test results concerning elements content in a sample of burn to ashes silage made of standard rye

1. Analytical EDS test results concerning elements content in a sample of mineralized silage made of standard rye

Element	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Average
Oxygen	32,568	22,790	12,281	32,287	23,820	24,749
Potassium	29,668	28,824	56,075	40,195	49,127	40,777
Calcium	11,604	27,101	4,308	4,379	3,246	10,127
Phosphorus	5,603	7,153	3,406	7,311	5,157	5,726
Chloride	5,137	5,970	10,807	1,850	5,275	5,807
Carbon	5,280	2,022	0,420	2,669	2,060	2,490
Silica	4,094	1,947	8,149	7,402	7,763	5,871
Magnesium	2,914	1,476	1,998	1,817	1,911	2,023
Natrium	1,292	0,551	0,444	0,456	0,621	0,672
Sulphide	1,241	1,245	1,108	1,093	0,350	1,007
Iron	0,596	0,885	0,998	0,539	0,662	0,736

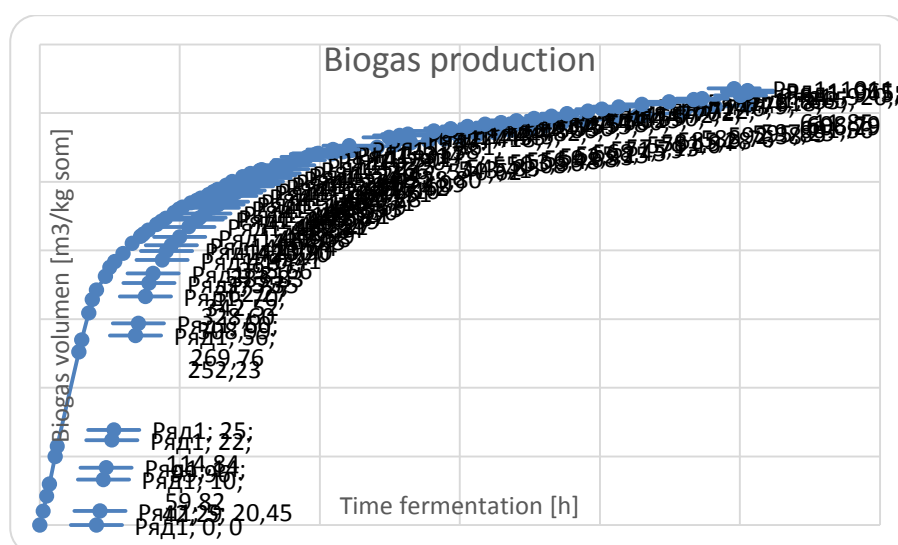


Fig. 9. Batch biogas production course based on silage substrate made of standard rye – process kinetics

The inoculum source was cattle liquid manure derived from the fermentation chamber of the agricultural biogas plant. The guidelines for inoculum preparation technique and its details are available in a German norm DIN 38414-8 determining the research methods recommended for water, wastewaters, wastewater sediments analysis in respect to determination of their potential for anaerobic decomposition.

Results. Scanning electron microscope image of the silage sample is presented in Fig. 7. In the image one can notice highly porous, layered structure, suggesting necessity of liquid penetration of the particles interior before leaching and diffusional transport of the dissolved substance to the bulk solution. The possible diffusional mass transport resistances may be regarded as the kinetic limiting factor, since only leached dissolved organic substance can be further biochemically processed towards biogas synthesis. Moreover, in selected localizations of the sample the EDS measurements were done. Test results concerning elements content in a sample are presented in Fig. 8 and Table 1. From the table it results, that it can be useful as fertilizer.

In Fig. 9 the research results concerning the intrinsic ability for biogas production of standard rye silage as a function of the batch process time are presented. The resulting time can be also interpreted as the necessary hydraulic retention time (HRT) of the substrate in a bioreactor working volume. Analyzing the plot one can conclude, that the highest biomass production rate is observed up to 100 h only, with corresponding total biogas volume of ca. 375 m³/kg som. After this time anaerobic process rate gradually decreases. Practically after 400 h of the batch process course the increments of produced biogas volume are rather small. The mentioned finding can be the basis for methane fermentation process design and optimization and determines thus the optimum time for the given batch biomass conversion. Longer residence time of silage in working volume of the bioreactor is not recommended economically since productivity decreases significantly.

Conclusions

Based on the laboratory test results one can conclude, that silage made of standard rye is a good substrate for biogas production. Calorific value of the biogas depends on the methane content which under the experimental results reached ca. 54%. Assuming average harvest of standard rye destined for silage production, one can obtain about 9000 m³ of biogas from 1 ha.

References

1. Poppa, A., Calvin, K., Shinichiro Fujimori, Havlik, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Bodirsky, B. L., Dietrich J. P., Doelmann, J. C., Gusti, M., Hasegawa T., Page Kyle, Obersteiner, M., Tabeau, A., Kiyoshi Takahashi, Valin, H., Waldhoff, S., Weindl, I., Wise, M., Kriegler, E., Lotze-Campen, H., Fricko, O., Keywan Riahi, Detlef P. van Vuuren. Land-use futures in the shared socio-economic pathways, *Global Environmental Change* 42 (2017) 331–345
2. Notarnicola, B., Tasselli, G., Renzulli, P. A., Castellani, V., S. Sala. Environmental impacts of food consumption in Europe. *Journal of Cleaner Production* 140 (2017) 753-765

3. Rigel, A., Rivero, G., Daim, T. Technology roadmap: Cattle farming sustainability in Germany. *Journal of Cleaner Production* 142 (2017) 4310–4326
4. Negri, M., Bacenetti, J., Fiala, M., Bocchi, S. Evaluation of anaerobic degradation, biogas and digestate production of cereal silages using nylon-bags. *Bioresource Technology* 209 (2016) 40–49
5. Riggio, S., Torrijos, M., G. Vives, Esposito, G., E. D. van Hullebusch, Steyer, J. P., Escudié, R. Leachate flush strategies for managing volatile fatty acids accumulation in leach-bed reactors. *Bioresource Technology* 232 (2017) 93–102
6. Rodriguez, C., Alaswad, A., Benyounis, K. Y., Olabi, A. G.. Pretreatment techniques used in biogas production from grass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 (2017) 1193–1204
7. Senghor, A., Dioh, R. M. N., Müller, C., Youm, I. Cereal crops for biogas production: A review of possible impact of elevated CO₂. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71 (2017) 548–554
8. Bohdziewicz, J., Piotrowski, K., Sakiewicz, P., Cebula, J. Production of biogas from waste animal fats. *Naukovij Visnik Nacional'nogo Universitetu Bioresursiv i Prirodokoristuvanna Ukraini* ISSN 2222-8594

СИЛОС ИЗ ЖИТА ЯК СУБСТРАТ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

Я. Бохджієвіч, Я. Цебуля, К. Піотровський, П. Сакієвіч

Анотація. *Необхідність виробництва електроенергії в поєднанні із захистом навколишнього середовища змушує робити наголос на використання поновлюваних джерел енергії. З року в рік зростає попит на поновлюване біопаливо, яке зможе замінити застосовувані нині паливні продукти на основі невідновлюваних природних олій і вугілля.*

*Представлені можливості і перспективи промислового використання силосу із жита (*Secale cereale* L.) для виробництва біогазу. Це важливе технологічне питання, особливо в тих країнах, де є високі потенційні і сільськогосподарські традиції вирощування зернових культур. Наведені та обговорені результати досліджень, що стосуються процесу метанового бродіння. Також наводяться результати аналізу вмісту окремих елементів в силосі.*

Ключові слова: *біогаз, біометан, *secale cereale* L., жито, силос*

СИЛОС ИЗ РЖИ КАК СУБСТРАТ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОГАЗА

Я. Бохджиевич, Я. Цебуля, К. Пиотровский, П. Сакиевич

Аннотация. *Необходимость производства электроэнергии в сочетании с защитой окружающей среды заставляет делать упор на использование возобновляемых источников энергии. Из года в год растет спрос на возобновляемое биотопливо, которое сможет заменить используемые в настоящее время топливные продукты, на основе невозобновляемых природных масел и угля.*

*Представлены возможности и перспективы промышленного использования силоса из ржи (*Secale cereale* L.) для производства биогаза. Это важный технологический вопрос, особенно в тех странах, где имеются высокие потенциальные и сельскохозяйственные традиции*

выращивания зерновых культур. Приведены и обсуждены результаты исследований, касающихся процесса метанового брожения. Также приводятся результаты анализа содержания отдельных элементов в силосе.

Ключевые слова: *биогаз, биометан, secale cereale L., рожь, силос*

УДК 004.896

ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНИЙ МЕХАНІЗМ ІНВЕСТИЦІЙНО-ФІНАНСОВОЇ ОЦІНКИ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ В СФЕРІ РАЦІОНАЛЬНОГО ВОДОКОРИСТУВАННЯ

В. М. ШТЕПА, кандидат технічних наук, доцент
С. П. ВЕРТАЙ, кандидат економічних наук, доцент
Є. І. САСЄВІЧ, аспірант*
П. І. БУРІК, студент магістратури*
**Поліський державний університет,
м. Пінськ, Республіка Білорусь**
E-mail: shns1981@gmail.com

Анотація. У статті розглянуто механізм фінансування інновацій в області екології та природокористування. Запропоновано варіанти взаємодії розробника та користувача технології з урахуванням залучення фінансування для впровадження розробки в виробничий процес. Розрахунковим шляхом встановлено доцільність реалізації замкнутих циклів водопостачання – на основі показників використання водних ресурсів та індексу рентабельності. Оцінено критерії вибору та перспективності фінансування інноваційних розробок в сфері систем очистки стічних вод промислових об'єктів; запропоновано методику розрахунку об'ємів інвестицій в природоохоронні заходи, куди включено і критерій енергоефективності функціонування електротехнологічного обладнання водоочистки, як першочерговий показник.

Ключові слова: *технологія, інновація, природокористування, водоочистка, оборотне водопостачання, енергоефективність, рентабельність*

Актуальність. Актуальність широкого впровадження природоохоронних інноваційних технологій активно обговорюється в науково-практичних спільнотах (гайдарівський форум 2016, Міжнародний форум в Давосі). Однак, створення нових технологій в області екології та

* Науковий керівник – кандидат економічних наук, доцент С. П. Вертай

© В. М. Штепа, С. П. Вертай,
Є. І. Сасєвіч, П. І. Бурік, 2017

выращивания зерновых культур. Приведены и обсуждены результаты исследований, касающихся процесса метанового брожения. Также приводятся результаты анализа содержания отдельных элементов в силосе.

Ключевые слова: *биогаз, биометан, secale cereale L., рожь, силос*

УДК 004.896

ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНИЙ МЕХАНІЗМ ІНВЕСТИЦІЙНО-ФІНАНСОВОЇ ОЦІНКИ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ В СФЕРІ РАЦІОНАЛЬНОГО ВОДОКОРИСТУВАННЯ

В. М. ШТЕПА, кандидат технічних наук, доцент
С. П. ВЕРТАЙ, кандидат економічних наук, доцент
Є. І. САСЄВІЧ, аспірант*
П. І. БУРІК, студент магістратури*
**Поліський державний університет,
м. Пінськ, Республіка Білорусь**
E-mail: shns1981@gmail.com

Анотація. У статті розглянуто механізм фінансування інновацій в області екології та природокористування. Запропоновано варіанти взаємодії розробника та користувача технології з урахуванням залучення фінансування для впровадження розробки в виробничий процес. Розрахунковим шляхом встановлено доцільність реалізації замкнутих циклів водопостачання – на основі показників використання водних ресурсів та індексу рентабельності. Оцінено критерії вибору та перспективності фінансування інноваційних розробок в сфері систем очистки стічних вод промислових об'єктів; запропоновано методику розрахунку об'ємів інвестицій в природоохоронні заходи, куди включено і критерій енергоефективності функціонування електротехнологічного обладнання водоочистки, як першочерговий показник.

Ключові слова: *технологія, інновація, природокористування, водоочистка, оборотне водопостачання, енергоефективність, рентабельність*

Актуальність. Актуальність широкого впровадження природоохоронних інноваційних технологій активно обговорюється в науково-практичних спільнотах (гайдарівський форум 2016, Міжнародний форум в Давосі). Однак, створення нових технологій в області екології та

* Науковий керівник – кандидат економічних наук, доцент С. П. Вертай

© В. М. Штепа, С. П. Вертай,
Є. І. Сасєвіч, П. І. Бурік, 2017

природокористування, впровадження енергоефективних та екологічно безпечних способів виробництва вимагає створення механізму фінансування та перенесення технологій з області розробки в область промислового використання. У зв'язку з цим, розробка моделі взаємодії учасників ринку, розробка відповідної інфраструктури, в тому числі фінансової та методики оцінки перспектив таких проектів в сучасних умовах набувають особливої актуальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробки в галузі екології та природокористування включають як питання зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище в результаті антропогенної діяльності, так і залучення природних ресурсів, перш за все, місцевих в господарський оборот. Як показав аналіз [2], використання місцевих природних ресурсів виявляється не завжди ефективно і економічно виправдано, що пояснюється недостатнім їх використанням в ланцюжках створення вартості. Для вирішення цієї проблеми потрібно створення інфраструктури для використання, наприклад, альтернативних джерел енергії, а також проведення технологічної модернізації підприємств, наприклад, обладнання забезпечує зниження шкідливих викидів. Інвестиції вимагають стратегічного підходу: інтенсивно повинні інвестуватися ті галузі, які в майбутньому можуть забезпечити більше зростання створення валової доданої вартості [2]. Це передбачає формування технологічного ланцюжка виробництва кінцевої продукції в рамках однієї економічної системи.

Технологічний ланцюжок виробництва кінцевої продукції включає:

1. Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи (НДДКР).
2. Промислове виробництво.
3. Маркетинг (реклама, реалізація кінцевої продукції, експлуатація торгової марки).

Автори в роботі [1] виділяють «верхній шлях промислового розвитку», який включає перший і третій етапи, засновані на прискореному освоєнні новітніх світових знань і технологій, розвитку власних НДДКР і власного інноваційного виробництва, що дозволяє реалізувати більшу частину сукупної доданої вартості, пов'язаної з виробництвом і реалізацією даного виду продукції.

Існують три групи показників, що забезпечують оцінку ефективності інноваційних рішень в області водочистки:

1. Показники, що відображають більш ефективне використання води з урахуванням кількості використовуваної у виробничому процесі оборотної води. Засновані на складанні балансів водовідведення і водоспоживання, порівняння їх питомих показників (складено на підставі [1]).
2. Показники, що характеризують комерційну привабливість проекту (складено на підставі [2]).
3. Показники, що відображають екологічну оцінку проекту, засновані на нормативах плати за водовідведення та водокористування.

При цьому наявні методики не оцінюють комплексно всі напрями і показники ефективності впровадження нових технологій з урахуванням

інновацій. Для різних підприємств використовуються різні методики з різними показниками, що ускладнює їх порівняння і аналіз.

Враховуючи важливість ефективного використання фінансових ресурсів в інвестиційному сегменті за обов'язкового виконання умов екологічної безпеки, задача розробки об'єктно-орієнтованої методики розрахунку перспективності фінансування заходів щодо раціонального природокористування, в тому числі із використанням електротехнологій, є актуальною.

Мета дослідження – розробка об'єктно-орієнтованої методики розрахунку перспективності фінансування заходів (із використанням електротехнологій) щодо раціонального природокористування у сфері водоочистки.

Матеріали і методи дослідження. Загальна проблема, яка ускладнює впровадження інноваційних технологій в сфері раціонального природокористування – фактична відсутність ефективного механізму фінансування:

- рішення про фінансування для державних установ приймаються на рівні бюджетів, відповідно використання кредитних ресурсів – обмежена;
- малі підприємства не володіють достатніми компетенціями для залучення фінансових ресурсів, роботи з різними фінансовими інститутами;
- економічний ефект від природоохоронних технологій не завжди має яскраво виражений економічний ефект, в той час як екологічний ефект очевидний.

Суть цієї проблеми полягає в тому, що технології раціонального водокористування в створенні вартості і формуванні фінансового результату діяльності підприємства не приймають – це «посередники». Завдання таких технологічних рішень – підтримка нормативних вимог щодо екологічної безпеки та, за можливості, реалізація схем повторного використання природних ресурсів (рис. 1).

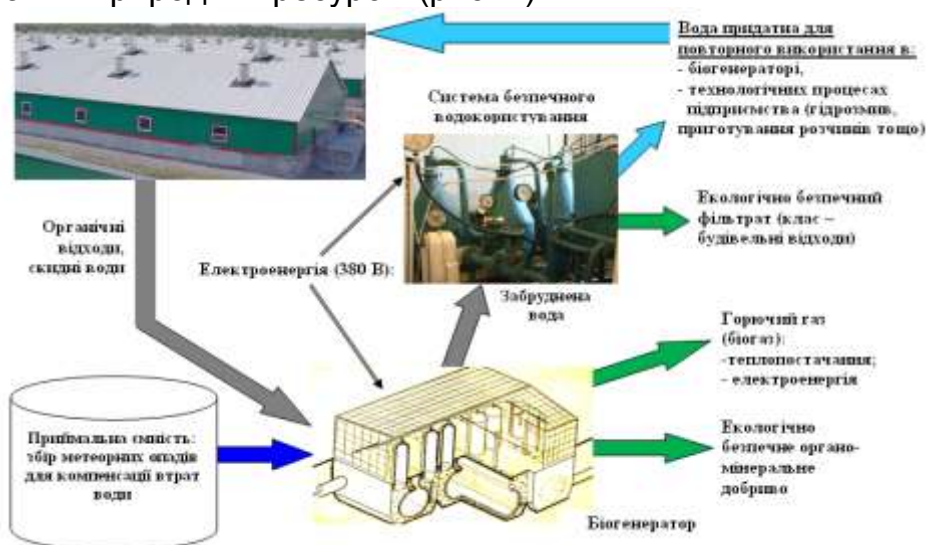


Рис. 1. Приклад ресурсо- та екологічно безпечного водопостачання промислових підприємств (із застосуванням замкнутого циклу)

Таким чином, існує два базові напрями обґрунтування їх впровадження на реальних підприємствах: мінімізація витрат ресурсів, у тому числі енергетичних, та обов'язковість виконання нормативних вимог щодо якості стоків (мінімізація штрафних санкцій).

У якості економічного показника використаємо індекс рентабельності:

$$IP = \frac{ДП + ДІ}{ДІ}, \quad (1)$$

де $ДП$ – дисконтований прибуток; $ДІ$ – дисконтована вартість загальних інвестиційних затрат і плата за кредити (займи), пов'язані із здійсненням капітальних затрат по проекту за розрахунковий період (горизонт розрахунку).

Стосовно визначення раціональності водокористування, то застосовуємо удосконалений коефіцієнт використання (введено об'єми води, котрі повторно використовуються):

$$Kв = \frac{Smex - Wmex}{P + Wmex}, \text{ м}^3, \quad (2)$$

де W_{mex} – нормативний об'єм води, який використовують на технологічні потреби, м^3 ;

S_{mex} – нормативний об'єм стічних вод, що утворюються в процесі виробництва, м^3 ;

P – об'єм очищеної стічної води, котрий повторно використовується у виробництві, м^3 :

$$Wmex = Wnn + Wo, \text{ м}^3, \quad (3)$$

де $W_{пр}$ – об'єм води, який використовується в i -ому виробничому процесі, м^3 ;

$S_{пр}$ – об'єм стічних вод, що утворюються в i -м виробничому процесі, м^3 ;

S_o – об'єм стічних вод, які не залежать від виробництва продукції, але обумовлений виробничим процесом, м^3 ;

W_o – нормативні об'єми води на потреби, що не залежать від виробництва продукції, обумовлені виробничим процесом, м^3 :

$$Wmex = Wnn + Wo, \text{ м}^3. \quad (4)$$

Очевидно, що коефіцієнт використання водних ресурсів повинен прямувати до одиниці – всі стічні води повторно використовуються у технологічних процесах (реально не можливо через втрати за транспортування, водоочистки тощо).

Результати досліджень та їх обговорення. З метою попередньої оцінки прийнятності використання такого підходу (1-4), провели чисельний експеримент: бралися до уваги три варіанти встановлення обладнання з водоочищення на підприємствах, які відрізняються технологічними процесами і масштабами виробництва. Порівнюється варіант впровадження обладнання з одними і тими ж технологічними і фінансовими характеристиками.

Умовно приймалися: об'єм скиду стоків – 7000 м³/місяць (233 м³/добу); оборотне водопостачання – 3000, 4000 і 5000 м³/місяць. Очевидно, що коефіцієнт використання водних ресурсів із збільшенням повторного використання стічної води зростає, наближаючись до одиниці (рис. 2).

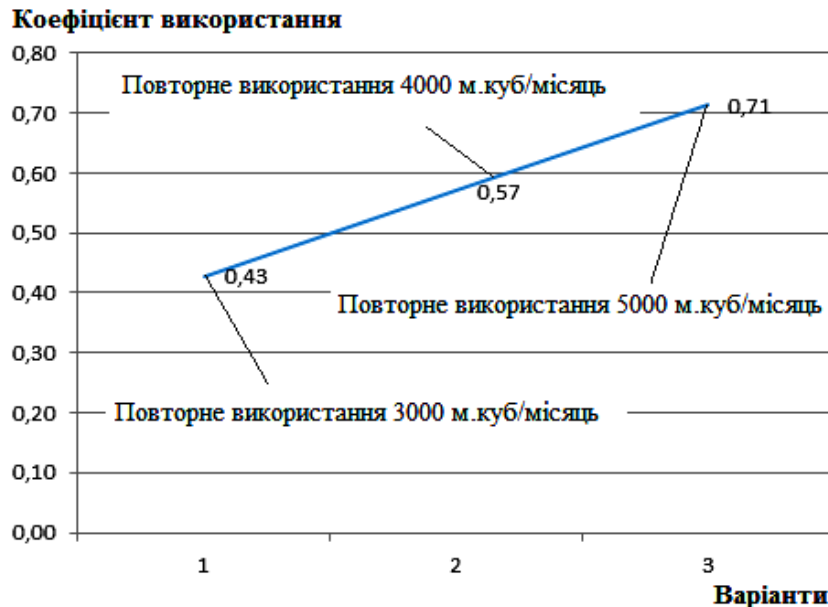


Рис. 2. Вплив об'ємів повторного використання водних ресурсів (оборотне водопостачання) на коефіцієнт використання

Далі розрахований індекс рентабельності (1), за аналогією з індексом рентабельності інноваційних проектів, для кожного з трьох підприємств (м'ясопереробка, деревопереробка, металургійний комбінат) за умови реалізації проекту. За оцінки ефективності інноваційних проектів індекс рентабельності розраховується за виручкою від реалізації. Для досягнення цілей дослідження за розрахунку індексу рентабельності був використаний прибуток за двома варіантами (до впровадження обладнання і після реалізації оборотного водопостачання – у всіх випадках поверталось 3000 м³/місяць).

Також у кожному з трьох варіантів (із врахуванням типових економічних параметрів виробництв [3]) передбачається реалізація проекту протягом трьох років. Як норма дисконту було прийнято значення 9%, що відповідає середній ставці комерційних банків на валютні депозити (розрахунок в у.о.). Дана ставка може бути скоригована з урахуванням цілей оцінки, а також з урахуванням ризиків проекту або ризику ненадходження грошових коштів від реалізації проекту. Отримані результати продемонстрували, що повторне використання водних ресурсів покращує інвестиційні показники впровадження обладнання – індекс рентабельності (1) збільшувався (рис. 3).

З класичної економічної точки зору, наведених параметрів цілком достатньо для оцінки інвестиційних перспектив природоохоронних заходів (проектів) із реалізації електротехнологій водоочистки. Однак, у такому підході цілком не враховуються функціональні характеристики обладнання

і вартості очистки та отримання із водозабору 1 м³, що дуже часто призводить до невідповідності розрахункових результатів перспективності впровадженнь реальним даним, які отримуються уже на етапі реалізації.

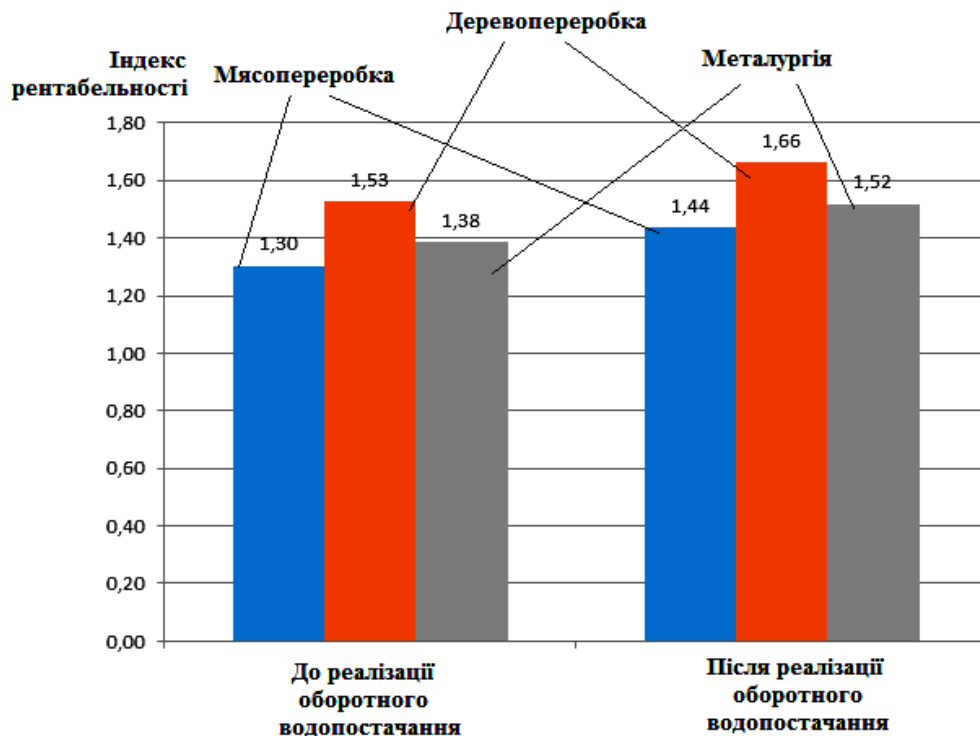


Рис. 3. Вплив оборотного водопостачання на індекс рентабельності проектів

Аналіз виробничих об'єктів [4, 5] показує, що затрати на очистку стічних вод більші, ніж на водозабір (доочистку), однак така пропорція іверсивно змінюється за неякісної очистки (штрафи) та зменшення плат за використання надр (повторне використання води). Тому, на етапі обґрунтування методики об'єктивно прийняти ці показники рівними.

Вплив же функціональних характеристик обладнання на фінансово-інвестиційні показників проектів можуть бути викликані:

- штрафними санкціями за неякісну водоочистку;
- перевитратами ресурсів (електроенергія, реагенти, витратні матеріали).

При цьому акцент робиться на електрообладнання, тому що ступінь залучення електротехнологій за водоочистки становить 15-90%. Найфективніші із способів видалення забруднювачів максимально використовують електроенергію [4]. Статистично встановлено, що на оплату електроенергії за якісної очистки стічних вод промислових об'єктів припадає 5-20% всіх електроенергетичних витрат підприємств [4, 5].

Тому, з врахуванням виробничих випробувань та теоретичних напрацювань [4], пропонується враховувати універсальний критерій оцінки енергоефективності роботи електротехнологічного обладнання водоочистки:

$$EF_y = \frac{\left[\left(\frac{L1_{вих} - L1_{зад}}{L1_{зад}} \cdot 100\% \right) + \dots + \left(\frac{LN_{вих} - LN_{зад}}{LN_{зад}} \cdot 100\% \right) \right] \cdot \sum_{i=1}^N Q_i}{\sum_{i=1}^N W_i}, \% / \text{кВт}. \quad (5)$$

де $L_{вих}$ – фактичне значення відповідного параметра оцінки якості водопідготовки;

$L_{зад}$ – задане (нормативне) значення відповідного параметра оцінки якості водопідготовки;

Q – час роботи обладнання, год;

W – електроенергія, що затрачена на водоочистку, кВт·год;

N – кількість параметрів оцінки якості водопідготовки (як правило, відповідають кількості установок, які діють на воду).

Технологічне завдання систем водоочистки – підтримувати значення критерію рівним (максимально близьким) нулю.

У випадку, якщо одна установка забезпечує нормування кількох параметрів:

$$EF_y = \frac{\left[\left(\frac{L1_{вих} - L1_{зад}}{L1_{зад}} \cdot 100\% \right) + \dots + \left(\frac{LN_{вих} - LN_{зад}}{LN_{зад}} \cdot 100\% \right) \right] \cdot Q}{W}, \% / \text{кВт}. \quad (6)$$

Тоді, для об'єктно-орієнтованої оцінки перспективності впровадження (інвестування) заходів раціонального водокористування доцільно використовувати наступну систему залежностей:

$$\begin{cases} EF_y \rightarrow 0 \\ IP \rightarrow \max \end{cases}. \quad (7)$$

Послідовність прийняття рішень щодо перспективності реалізації проектів включатиме ряд етапів, при цьому початковою буде оцінка енергоефективності, оскільки відповідність такому критерію (4) дозволить проводити подальший аналіз заходів (проекту), як сталого об'єкта – усуваючи штрафні санкції та перевитрати ресурсів:

1. Оцінка об'єму і якості стічних вод конкретного підприємства (або проектних матеріалів); розрахунок витрат, в тому числі енергетичних, на водопостачання та водовідведення (з водоочисткою).

2. Вибір із використанням критерію енергоефективності (6) та імітаційного моделювання (за необхідності і лабораторних досліджень) комплексу електрообладнання водоочистки.

3. Розрахунок індексу рентабельності впровадження електротехнологій із реалізацією оборотного водопостачання. За необхідності коригування номенклатури та параметрів обладнання (пункт 2).

Такий об'єктно-орієнтований підхід вимагає детального аналізу не лише інвестиційно-фінансових характеристик, але і енергетичних показників проекту, що розширює перелік фахівців, які залучаються до прийняття рішень щодо фінансування відповідних заходів.

Висновки і перспективи. Обґрунтований та розроблений об'єктно-орієнтований підхід оцінки інвестиційно-фінансової перспективності із використанням індексу рентабельності та критерію енергоефективності доцільно використовувати за прийняття рішень щодо фінансування електротехнологічного обладнання водоочистки. При цьому економічно доцільніше реалізовувати замкнуті цикли водопостачання виробничих підприємств.

Список використаних джерел

1. Быков, А. А. Теоретические подходы к обоснованию продуктивного использования местных природных ресурсов / А. А. Быков, С. П. Вертай // Белорус. экон. журн. — 2009. — № 4. — С. 77–87.
2. Быков, А. А. Ретроспективная оценка роли местных природных ресурсов в обеспечении роста отраслей белорусской экономики/А. А. Быков, С. П. Вертай, И. А. Янковский // Экономика и банки. — 2009. - №1. — С.28-37
3. Вертай, С. П. Структурные изменения локальных экономик в современных условиях / С. П. Вертай // Актуальные проблемы современной гуманитарной науки: материалы III Международной научно-практической конференции. - Брянск: РИО БГУ, 2016 г. — 208 с. — С. 159-162.
4. Штепа, В. М. Оцінка енергетичних характеристик процесів очищення стічних вод агропромислових підприємств електротехнічними комплексами / В. М. Штепа // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. — 2014. — Вип. 194, ч. 3. — С. 259-265.
5. Гончаров, Ф. І. Проблеми використання забруднених небезпечними речовинами вод для зрошування / Ф. І. Гончаров, В. М. Штепа // Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України: електронний журнал. — 2010. — № 1 (17). — Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2010-1/10gfipds.pdf>.

References

1. Bykov, A. A., Vertay, S. P. (2009). Teoreticheskiye podkhody k obosnovaniyu produktivnogo ispol'zovaniya mestnykh prirodnnykh resursov [Theoretical approaches to the rationale for the productive use of local natural resources]. Belarus. ekon. Zhurn, 4, 77–87.
2. Bykov, A. A., Vertay, S. P., Yankovskiy, I. A. (2009). Retrospektivnaya otsenka roli mestnykh prirodnnykh resursov v obespechenii rosta otrasley belorusskoy ekonomiki [Retrospective assessment of the role of local natural resources in ensuring the growth of the Belarusian economy]. Ekonomika i banki, 1, 28-37.
3. Vertay, S. P. (2016). Strukturnyye izmeneniya lokal'nykh ekonomik v sovremennykh usloviyakh [Structural changes in local economies in modern conditions]. Aktual'nyye problemy sovremennoy gumanitarnoy nauki: Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Bryansk, RIO BGU, 159-162,
4. Shtepa, V. M. (2014). Otsinka enerhetychnykh kharakterystyk protsesiv ochyshchennia stichnykh vod ahropromyslovykh pidpriemstv elektrotekhnichnymy kompleksamy [Evaluation of energy characteristics of wastewater treatment processes agricultural enterprises Electrotechnical complexes]. Naukovyi visnyk NUBIP Ukrainy. Serii: Tekhnika ta enerhetyka APK. 194 (3), 259-265.
5. Honcharov, F.I., Shtepa, V. M. (2010). Problemy vykorystannia zabrudnenykh nebezpechnymy rehovynamy vod dlia zroshuvannia [Problems of contaminated hazardous waste water for irrigation]. Naukovi dopovidi Natsionalnoho

ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ МЕХАНИЗМ ИНВЕСТИЦИОННО-ФИНАНСОВОЙ ОЦЕНКИ ВНЕДРЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ В СФЕРЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

В. Н. Штепа, С. П. Вертай, Е. И. Сасевич, П. И. Бурик

Аннотация. В статье рассмотрен механизм финансирования инноваций в области экологии и природопользования. Предложены варианты взаимодействия разработчика и пользователя технологии с учетом привлечения финансирования для внедрения разработки в производственный процесс. Расчетным путем установлена целесообразность реализации замкнутых циклов водоснабжения – на основе показателей использования водных ресурсов и индекса рентабельности. Оценены критерии выбора и перспективности финансирования инновационных разработок в области систем очистки сточных вод промышленных объектов; предложена методика расчета объемов инвестиций в природоохранные мероприятия, куда включен и критерий энергоэффективности функционирования электротехнологического оборудования водоочистки как первоочередной показатель.

Ключевые слова: *технология, инновация, природопользование, водоочистка, оборотное водоснабжение*

THE OBJECT-ORIENTED MECHANISM OF INVESTMENT AND FINANCIAL EVALUATION ELECTROTECHNOLOGIES IMPLEMENTATION IN THE FIELD RATIONAL WATER USE

V. N. Shtepa, S. P. Vertay, E. I. Sasyevich, P. I. Burik

Abstract. In the article the funding mechanism for innovation in the field of ecology and natural resources. The variants of interaction between developer and user of technology, considering obtaining financing for the implementation of development in the production process. The settlement established by the feasibility of closed cycle water - based indicators of water resources and the index of profitability. Reviewed by selection criteria and funding of promising innovation in the field of industrial wastewater treatment facilities; The method of calculating the volume of investment in environmental measures, which includes criteria of energy efficiency and electrotechnological purification equipment as a priority measure.

Keywords: *technology, innovation, environmental management, water treatment, water recycling, energy efficiency, profitability*

ИСТОЧНИКИ ПОЛЕЗНОЙ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОЛЫМ ПЕРФОРИРОВАННЫМ РОТОРОМ

Н. Н. ЗАБЛОДСКИЙ, доктор технических наук, профессор

Национальный университет биоресурсов

и природопользования Украины

E-mail: zablodskiyinn@gmail.com

В. Ю. ГРИЦЮК, кандидат технических наук, доцент

Донбасский государственный технический университет

E-mail: grits.86@mail.ru

Аннотация. *Рассмотрены основные и дополнительные источники полезной тепловой мощности теплогенератора на базе асинхронного двигателя с полым перфорированным ротором, за счет которых достигается существенное повышение коэффициента полезного действия по сравнению с теплогенератором классической конструкции.*

Ключевые слова: *перфорированный ротор, диссипативная составляющая энергии, активное сопротивление, вихревые токи*

Актуальность. Полифункциональные электромеханические преобразователи относятся к новому классу электромеханических устройств [1] и представляют собой совмещенную техническую систему с полифункциональными свойствами, объединяющую в себе электромеханическую, механическую, тепловую и гидравлическую системы.

Анализ последних исследований и публикаций. На рис. 1. представлена одна из модификаций полифункциональных преобразователей – теплогенератор на базе асинхронного двигателя (АД), в котором используется полый перфорированный ротор (ППР), одновременно выполняющий функции ротора, исполнительного механизма, нагревателя и кавитационной камеры. При этом ротор охлаждается рабочей жидкостью, которая за цикл прохождения через теплогенератор подогревается за счет кавитационных процессов, основных электрических и магнитных потерь в роторе и статоре, а также внутреннего трения жидкости при гидродинамических перемещениях в воздушном зазоре, в результате чего достигается интенсификация процесса генерации тепла и повышение коэффициента полезного действия теплогенератора.

При подключении обмотки статора к трехфазной сети, образуется вращающееся магнитное поле, под действием которого в массивном роторе протекают вихревые токи, создается асинхронный момент и ротор вращается. При этом из-за поверхностного эффекта максимумы токов и температуры возникают на внешней поверхности ферромагнитного

цилиндра. Жидкость, которая перемещается в зазоре АД с ППР, активно взаимодействует с токопроводящим слоем ротора, поэтому тепловая мощность его потерь полностью расходуется на нагрев рабочей жидкости.

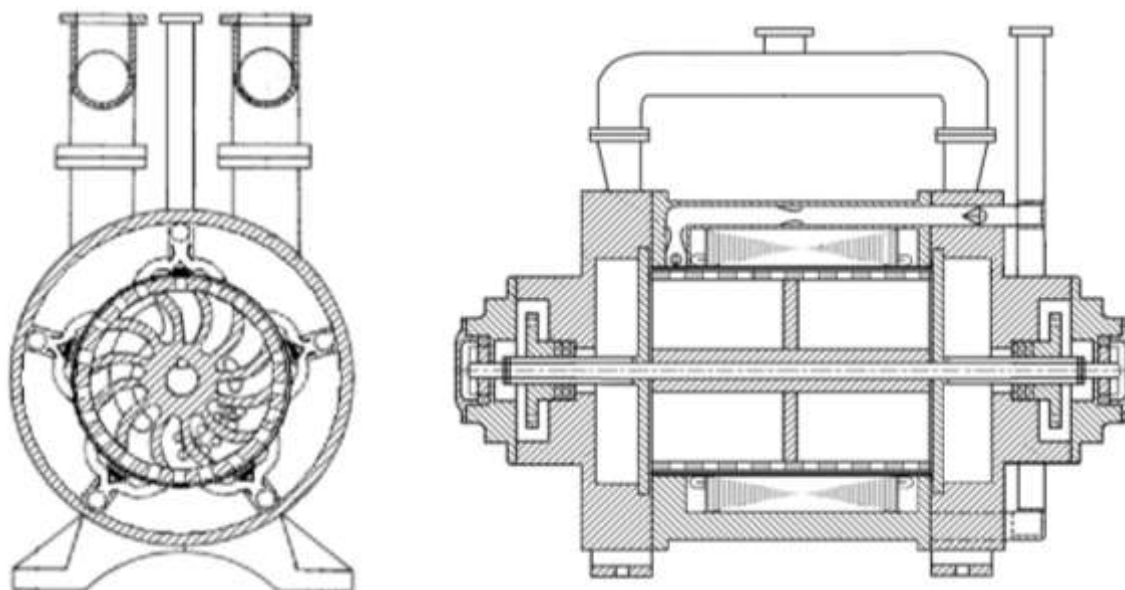


Рис. 1. Конструкция теплогенератора на базе асинхронного двигателя с полым перфорированным ротором

Цель исследования – определение основных и дополнительных источников полезной тепловой мощности теплогенератора на базе асинхронного двигателя с полым перфорированным ротором.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились с использованием теоретических и экспериментальных методов, в частности, теории электромагнитного поля, теории обобщенного электромеханического преобразователя энергии, численных методов решения дифференциальных уравнений. При анализе электромагнитного поля и расчетах активного волнового сопротивления асинхронного двигателя с полым перфорированным ротором, использовался конечно-элементный метод решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных в трехмерной постановке.

Результаты исследований и их обсуждение. Мощность, диссипируемая в жидкости за счет внутреннего трения при гидродинамических перемещениях в зазоре между перфорированным ротором и гладкой поверхностью немагнитной гильзы [2]:

$$N = \mu \left(Dl - \frac{d^2 z}{4} \right) \pi \int_0^\delta \left(\frac{\partial V_{\omega R}}{\partial y} \right)^2 dy, \quad (1)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости;

D – внешний диаметр полого ротора;

l – длина стакана ротора;

d – диаметр отверстий ротора;

z – число отверстий ротора;

$V_{\omega R}$ – скорость потока жидкости в зазоре при вращении ротора;
 y – координата вдоль радиальной оси по сечению зазора.
 Электрическая мощность ротора, диссипирующая в тепло:

$$P_2 = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' , \quad (2)$$

где m_1 – число фаз статора;

I_2' – приведенный ток ротора;

r_2' – активное сопротивление перфорированного ротора.

Потери в массивном роторе в комплексе представляют и потери в «меди» и потери в стали. Потери активной мощности в статоре, механических узлах и добавочные потери диссипируются в тепло и, в конечном счете, также участвуют в формировании греющей мощности теплогенератора.

Конечные размеры активной части АД с ППР в аксиальном направлении обуславливают неравномерность распределения плотности вихревых токов и увеличение активного сопротивления ротора. Определение активного волнового сопротивления ППР с учетом конечной длины и особенностей геометрии представляет собой сложную задачу, решение которой возможно при помощи численных методов в трехмерной постановке.

Активное волновое сопротивление различных конструктивных вариантов ферромагнитных роторов может определяться путем проведения дополнительных постпроцессорных расчетов трехмерной конечно-элементной модели, позволяющей анализировать полученные результаты по интересующим интегральным величинам.

Пример реализации постпроцессорного расчета активного волнового сопротивления ППР при частоте 10 Гц ($s = 0,2$) показан на рис. 2. Значения сопротивления для различных значений скольжения получены по результатам решения уравнений квазистационарного электромагнитного поля, исходя из величины мощности резистивных потерь Q_r и квадрата полного тока ротора I_Σ

$$r_e = \frac{Q_r}{I_\Sigma^2} = \frac{\int_V \left(\frac{J_\Sigma^2}{\gamma} \right) dV}{\left(\int_V J_\Sigma dV / l_a \right)^2} , \quad (3)$$

где J_Σ – полная плотность вихревых токов ротора;

l_a – активная длина ротора.

Результаты расчета зависимости $r_e = f(s)$ для сплошного ротора показали хорошее согласование с ранее установленными зависимостями [3, 4]. Полагаясь на анализ полученных зависимостей [5], для расчета активного волнового сопротивления ППР может быть рекомендовано следующее выражение:

$$r_{en} = r_{e2} \cdot (1 - k_{перф})^{-1} , \quad (4)$$

где $r_{\text{вз}}$ – активное волновое сопротивление полого гладкого ротора;
 $k_{\text{перф}}$ – коэффициент перфорации ротора.

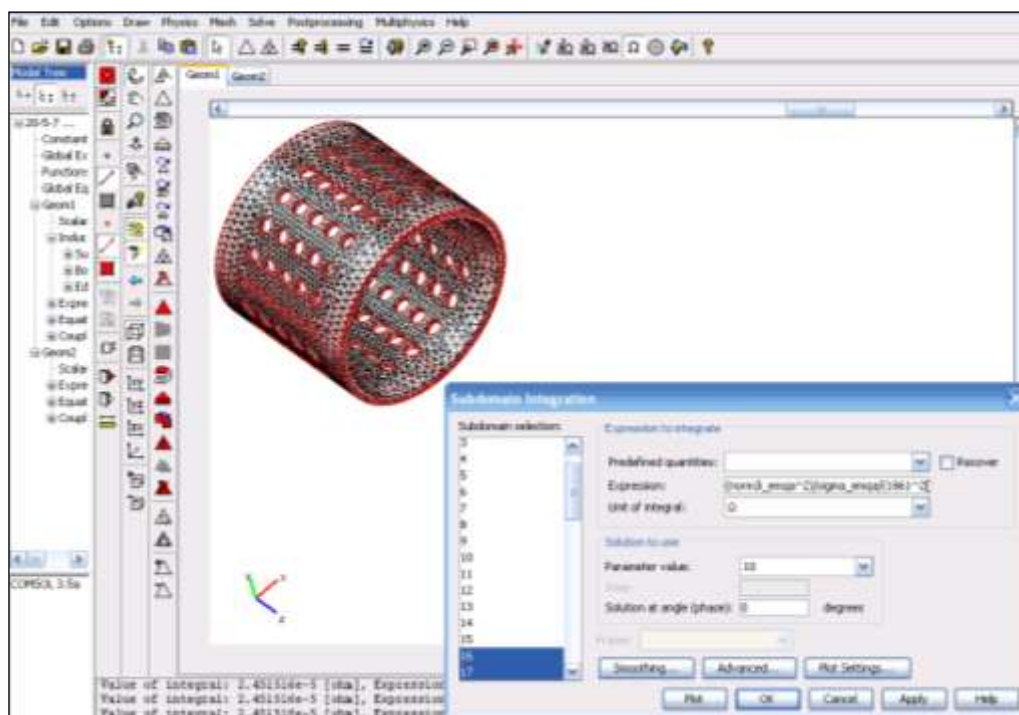


Рис. 2. Определение активного волнового сопротивления ППР с использованием трехмерной конечно-элементной модели

Активное сопротивление полого ферромагнитного (гладкого) ротора с хорошей точностью определяется по выражению, приведенному в [6]. Формула (4) дает удовлетворительные результаты (расхождение с полученными зависимостями до 4 %) для различных типов схем перфорации с равномерным расположением отверстий в диапазоне изменения $k_{\text{перф}} = 0,02 \dots 0,4$.

Непосредственное влияние типа схемы перфорации ротора на активное сопротивление ротора проявляется при явно неравномерном расположении отверстий и затрудняет использование формулы (4).

Общие потери мощности, обусловленные тепловыделениями в активных частях АД с ППР:

$$P_{\Sigma} = P_{M1} + P_{C1} + P_2 + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}, \quad (5)$$

где $P_{M1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1$ – потери в меди обмотки статора;

$P_{C1} = m_1 \cdot E_1 \cdot I_o \cdot \cos \varphi_o$ – потери в стали статора;

$P_{\text{мех}}$ – механические потери на трение в подшипниках;

$P_{\text{доб}}$ – добавочные потери.

Диссипативная составляющая энергии, формирующая полезную тепловую мощность, определяется как сумма тепловых потерь в активных частях и механических узлах АД с ППР, а также потерь мощности за счет сил вязкого трения жидкости в воздушном зазоре.

На рис. 3. представлена диаграмма баланса греющей мощности теплогенератора на базе АД с ППР.

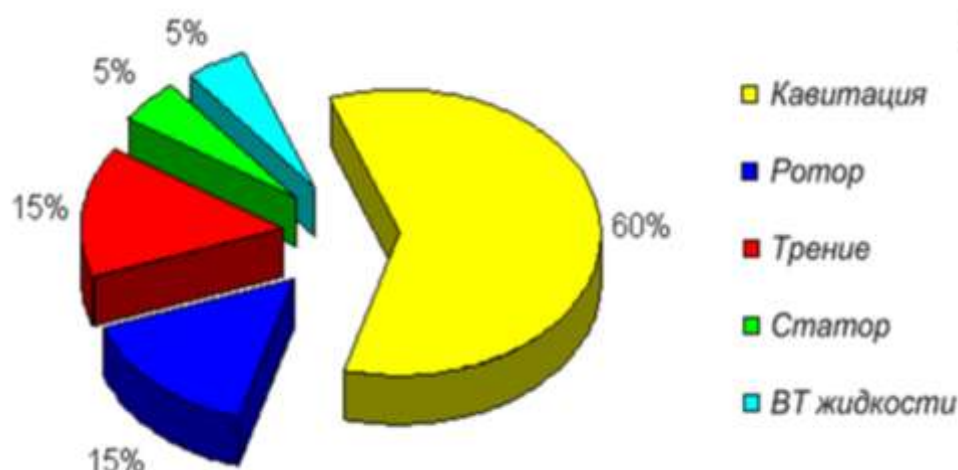


Рис. 3. Баланс греющей мощности теплогенератора на базе асинхронного двигателя с полым перфорированным ротором

Из диаграммы видно, что по сравнению с теплогенератором классической конструкции, в АД с ППР добавляется еще несколько источников греющей мощности, такие как основные электрические потери в роторе и статоре, 15% и 5% соответственно, а также потери от вихревых токов, протекающих в жидкости.

Выводы и перспективы. Рассмотрены основные и дополнительные источники полезной тепловой мощности теплогенератора на базе АД с ППР, за счет которых достигается существенное повышение коэффициента полезного действия по сравнению с теплогенератором классической конструкции. Диссипативная составляющая энергии, формирующая полезную тепловую мощность, определяется как сумма тепловых потерь в активных частях и механических узлах АД с ППР, а также потерь мощности за счет сил вязкого трения жидкости в воздушном зазоре.

Список использованных источников

1. Заблодский, Н. Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения / Н. Н. Заблодский // Монография. – Алчевск: ДонГТУ, 2008. – 295 с.
2. Заблодский, Н. Н. Расчет диссипативной составляющей энергии полифункциональных электромеханических преобразователей / Н. Н. Заблодский, В. Ю. Грицюк // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2011 – № 33. – С. 132–142.
3. Постников, И. М. Обобщенная теория и переходные процессы в электрических машинах / И. М. Постников – М.: Высшая школа, 1975. – 319 с.
4. Куцевалов, В. И. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами / В. И. Куцевалов – М. – Л.: Энергия, 1966. – 302 с.
5. Заблодский, Н. Н., Особенности распределения вихревых токов в полом перфорированном роторе полифункционального электромеханического преобразователя / Н. Н. Заблодский, В. Ю. Грицюк, И. Н. Кулдыркаев // Электротехника и электромеханика. 2013 – № 1. – С. 30–34.

6. Лопухина Е. М. Асинхронные микромашины с полым ротором / Е. М. Лопухина, Г. С. Сомихина. – М. : Энергия. – 1967. – 488 с.

References

1. Zablodskiy, N. N. (2008). Polifunktsional'nye elektromekhanicheskie preobrazovateli tekhnologicheskogo naznacheniya [Polyfunctional electromechanical transducers of technological designation]. DonHTU, 295.
2. Zablodskyy, N. N., Hrytsyuk, V. Yu. (2011). Raschet dissipativnoy sostavlyayushchey energiy polifunktsional'nykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley [Calculation of the dissipative component of energy of polyfunctional electromechanical converters]. Collection of scientific works of Donbass State Technical University, 33, 132–142.
3. Postnykov, Y. M. (1975). Obobshchennaya teoriya i perekhodnye protsessy v elektricheskikh mashinakh [Generalized theory and transients in electrical machines]. Vysshaya shkola, 319.
4. Kutsevalov, V. Y. (1966). Voprosy teorii i rascheta asinkhronnykh mashin s massivnymi rotorami [Questions of the theory and calculation of asynchronous machines with massive rotors]. Enerhiya, 302.
5. Zablodskyy, N. N., Hrytsyuk, V. Yu., Kuldyrkaev, Y. N. (2013). Osobennosti raspredeleniya vikhrevykh tokov v polom perforirovannom rotore polifunktsional'nogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya [Features of the distribution of eddy currents in the hollow perforated rotor of a polyfunctional electromechanical converter]. Electrical engineering and electromechanics, 1, 30–34.
6. Lopukhina, E. M., Somikhina, H. S. (1967). Asinkhronnye mikromashiny s polym rotorom [Asynchronous micromachines with hollow rotor]. Moscow, Russia: Energy, 488.

ДЖЕРЕЛА КОРИСНОЇ ТЕПЛОВОЇ ПОТУЖНОСТІ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА НА БАЗІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОРОЖНИСТИМ ПЕРФОРОВАНИМ РОТОРОМ

М. М. Заблодський, В. Ю. Грицюк

Анотація. Розглянуто основні та додаткові джерела корисної теплової потужності теплогенератора на базі асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором, за рахунок яких досягається суттєве підвищення коефіцієнта корисної дії в порівнянні з теплогенератором класичної конструкції.

Ключові слова: *перфорований ротор, дисипативна складова енергії, активний опір, вихрові струми*

SOURCES OF USEFUL THERMAL POWER OF HEAT GENERATOR BASED ON ASYNCHRONOUS MOTOR WITH HOLLOW PERFORATED ROTOR

N. Zablodskiy, V. Gritsyuk

Annotation. *The main and additional sources of useful thermal power of a heat generator based on an asynchronous motor with a hollow perforated rotor are considered, due to which a significant increase in the efficiency is achieved in comparison with a heat generator of a classical design.*

Keywords: *perforated rotor, dissipative energy component, active resistance, eddy currents*

УДК 631.363

ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНІ СИСТЕМИ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В БІОРЕСУРСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

В. С. ФЕДОРЕЙКО, доктор технічних наук, професор

І. С. ІСКЕРСЬКИЙ, кандидат технічних наук, доцент

Тернопільський національний педагогічний

університет імені Володимира Гнатюка

E-mail: kaf_mki@tnpu.edu.ua

Анотація. *Запропоновано технічно-економічне обґрунтування науково-технічних проектів диверсифікації джерел живлення шляхом використання біотеплогенераторів-утилізаторів для децентралізованого виробництва теплової та електричної енергії в технологіях агропромислового комплексу.*

Проаналізовано стан енергетичної галузі України в контексті світових тенденцій розвитку традиційних і альтернативних джерел енергії. Визначено, як пріоритет, використання для нашої держави відновлювальних систем генерації теплової та електричної енергії. На даному етапі розвитку вітчизняної енергетики це використання біоресурсних, побутових, промислових та медичних відходів. Розроблені біотеплогенератори потокової дії потужністю до 4,0 МВт та генератори-утилізатори відходів потужністю 1,0 МВт дозволяють створити децентралізовану систему генерації на базі теплоелектроцентралі компенсаційного типу з генерацією електричної та теплової енергії для технологічних процесів. Вказані зусилля дозволяють здійснити повноцінну диверсифікацію джерел енергії, використовуючи в якості палива різноманітні відходи місцевого походження. Самодостатня логістика доставки палива до місця роботи системи дозволяє значно здешевити генерацію теплової та електричної енергії. Представлена розробка пропонується для елеватора потужністю 60 тис. тон з використанням сушарок типу ДСП–50 та Sukur.

Ключові слова: *диверсифікація, генератор-утилізатор, біопаливо, важколіквідні відходи, децентралізація, електрична та*

Annotation. *The main and additional sources of useful thermal power of a heat generator based on an asynchronous motor with a hollow perforated rotor are considered, due to which a significant increase in the efficiency is achieved in comparison with a heat generator of a classical design.*

Keywords: *perforated rotor, dissipative energy component, active resistance, eddy currents*

УДК 631.363

ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНІ СИСТЕМИ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В БІОРЕСУРСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

В. С. ФЕДОРЕЙКО, доктор технічних наук, професор

І. С. ІСКЕРСЬКИЙ, кандидат технічних наук, доцент

Тернопільський національний педагогічний

університет імені Володимира Гнатюка

E-mail: kaf_mki@tnpu.edu.ua

Анотація. *Запропоновано технічно-економічне обґрунтування науково-технічних проектів диверсифікації джерел живлення шляхом використання біотеплогенераторів-утилізаторів для децентралізованого виробництва теплової та електричної енергії в технологіях агропромислового комплексу.*

Проаналізовано стан енергетичної галузі України в контексті світових тенденцій розвитку традиційних і альтернативних джерел енергії. Визначено, як пріоритет, використання для нашої держави відновлювальних систем генерації теплової та електричної енергії. На даному етапі розвитку вітчизняної енергетики це використання біоресурсних, побутових, промислових та медичних відходів. Розроблені біотеплогенератори потокової дії потужністю до 4,0 МВт та генератори-утилізатори відходів потужністю 1,0 МВт дозволяють створити децентралізовану систему генерації на базі теплоелектроцентралі компенсаційного типу з генерацією електричної та теплової енергії для технологічних процесів. Вказані зусилля дозволяють здійснити повноцінну диверсифікацію джерел енергії, використовуючи в якості палива різноманітні відходи місцевого походження. Самодостатня логістика доставки палива до місця роботи системи дозволяє значно здешевити генерацію теплової та електричної енергії. Представлена розробка пропонується для елеватора потужністю 60 тис. тон з використанням сушарок типу ДСП–50 та Sukur.

Ключові слова: *диверсифікація, генератор-утилізатор, біопаливо, важколіквідні відходи, децентралізація, електрична та*

теплова енергія, тарифи, піроліз, відновлювальні джерела, енергоефективність

Актуальність. Енергетична галузь України входить в чергову зону цінової турбулентності, викликаній багаторічним ігноруванням досвіду передових країн світу, в тому числі посткомуністичних сусідів.

Загальновідомо, що світове споживання енергії вимагає не тільки створення нових генеруючих структур, але, в першу чергу, раціонального використання наявних потужностей. Тільки енергоаудит в парі з адміністративними заходами дає змогу зменшити валове споживання енергії на 20-30 %. [1] Створені нашою державою фейкові структури, на кшталт агентства з енергоефективності та споріднених структур не дало практично результату з причини тотальної корупції в державно-приватному секторі розподілу електроенергії. Розподіл теплової енергії в Україні не витримує жодної критики. Існуючі теплокомуненерго є раковою пухлиною в економіці держави. Захмарні субсидії в парі з непрозорим ціноутворенням паралізують практично будь-які зусилля спрямовані на раціональне використання теплової енергії. Махровий олігархічний монополізм прийняття рішень в енергетичній галузі може призвести до її колапсу, враховуючи велику долю скептицизму профільних міжнародних організацій-донорів. Тільки активна громадська позиція суспільства в парі з міжнародним тиском можуть зрушити з місця реформи в енергетиці України.

Аналіз основних досліджень та публікацій. Наявні на сьогоднішній день фактологічні напрацювання свідчать, що світова енергетика входить в переломний період свого існування. Починаючи з 2020 року, завдяки прозорливій політиці урядів розвинутих країн почнеться об'єктивний розвиток відновлювальної енергетики з одночасною стагнацією традиційних, в першу чергу, вуглеводневих джерел енергії (рис. 1).

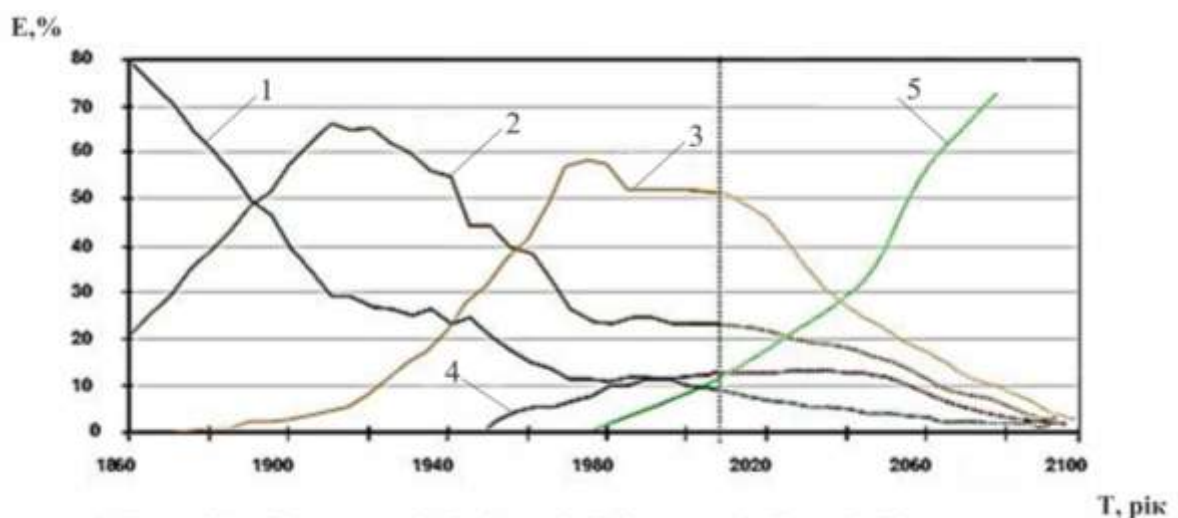


Рис. 1. Тенденції розвитку світової енергетики: 1 – традиційне біопаливо; 2 – вугілля; 3 – нафта, газ; 4 – уран; 5 – відновлювальна та альтернативна енергетика: сонце, повітря, вода, відходи, нова біомаса

Це, в свою чергу, призведе до модернізації і реформування економіки в країнах, які усвідомлюють незворотність вказаних процесів.

Поряд з визначальним розвитком сонячної, вітрової, гідро-енергетики на ринку збережуться системи генерації на базі різноманітних біотехнологій та утилізаційних структур, напряду пов'язані з екологічним станом довкілля.

Останній із вказаних напрямів має надзвичайне значення для нашої держави.

На сьогоднішній день в Україні функціонує близько 30 тисяч сміттєзвалищ, що складає 7 % від території держави. За останній період нагромаджено 54 млн. м³ відходів. Щорічно накопичується 15-17 млн. тон, що стає причиною багаточисельних техногенних катастроф.

В той же час досвід європейських країн таких як Швеція, Хорватія, Угорщина показує, що вказані утворення можуть стати суттєвим додатком до енергетичного балансу країни.

Одночасно в Україні існує значний енергетичний потенціал завдяки продукуванню відновлювальної біомаси. Середній щорічний приріст деревини в країні сягає 35 млн. м³ і використовується в межах 40-50 %. Україна має найнижчий показник серед країн Європи з обсягів заготівлі енергетичної деревини. В нас практично відсутня культура санітарно-енергетичних чисток лісів і придорожніх насаджень. Все це вкупі з соломою злакових культур, елеваторними відходами може скласти вагомий внесок в енергетичний баланс держави.

Мета дослідження – розкриття шляхів диверсифікації джерел теплової та електричної енергії з використанням систем генерації на базі відновлювальних джерел.

Результати досліджень та їх обговорення. У результаті проведених досліджень отримано передумови для створення високоефективної системи генерації теплової і електричної енергії.

Проведені нами дослідження в напрямі створення систем генерації теплової енергії, дозволяють запропонувати проект, що базується на розробках біотеплогенераторів, потужністю до 4,0 МВт та піролізних генераторів-утилізаторів, потужністю 0,5 МВт. [2]

Використавши заангажовану раніше фактологію щодо динаміки розвитку відновлювальної енергетики, в розробленій нами системі передбачено використання двох видів палива – біоресурсного (стружка, полова, тирса тощо) для роботи біотеплогенератора з прямоточним безперервним горінням та побутових відходів, в тому числі важколіквідних (автомобільні шини, побутові пластмасові та медичні відходи). Структурна схема розробки показана на рисунку 2.

Враховуючи специфіку роботи генераторів теплової енергії в запропонованій системі працює два піролізні теплогенератори, потужністю 0,5 МВт, що дає змогу отримувати дешеву базову теплову енергію для роботи парогенератора ТЕЦ, електричною потужністю 500 кВт, що працює в компенсаційному режимі. Варіативна генерація теплової енергії здійснюється в широкому діапазоні за допомогою вихрового

біопеллогенератора потужністю 20 МВт [3]. Адаптивна система керування ТЕЦ відслідковує в динаміці потреби споживача в електричній і тепловій енергії і за необхідності змінює продуктивність електрогенератора в діапазоні генерації необхідної кількості теплової енергії для технологічних процесів споживання. Зміна продуктивності системи відбувається шляхом регульованої подачі палива в біотеплогенератор безперервного горіння. Таким чином об'єкт господарювання має можливість отримувати дешеву теплову та електричну енергію в технологічно необхідному об'ємі. За необхідності децентралізована система може працювати в паралельному режимі з електромережею.

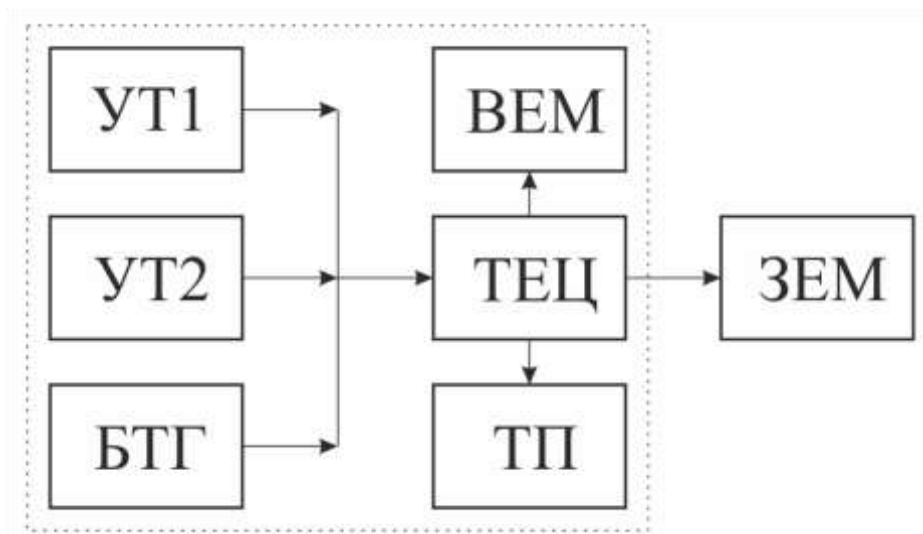


Рис. 2. Структурна схема децентралізованої системи генерації теплової і електричної енергії: УТ1, УТ2 – генератори-утилізатори; БТГ – біотеплогенератор; ТЕЦ – теплоелектроцентрально; ТП – технологічний процес; ВЕМ – внутрішня електромережа; ЗЕМ – електромережа споживача

Дана система розроблена для потреб елеватора з об'ємом зберігання 60 тис. тон і сушильним обладнанням на базі сушарок ДСП–50 та Sukur.

Висновки і перспективи. Запропонована принципово нова децентралізована система генерації теплової та електричної енергії з встановленою електричною потужністю на 500 кВт на базі біотеплогенератора та генераторів-утилізаторів для диверсифікації джерел живлення.

Розроблений експериментальний комплекс дозволяє здешевити генерацію теплової та електричної енергії відповідно в 5-7 та 2-3 рази з мінімальним навантаженням на довкілля.

Застосування розробки дозволить значною мірою одночасно вирішити економічні, енергетичні, екологічні та соціальні проблеми в Україні, шляхом децентралізації енергогенерації, використання дешевого відновлювального джерела енергії місцевого походження, утилізації відходів побутового, медичного та промислового походження.

Список використаних джерел

1. Федорейко, В. С. Энергозбереження в агропромисловому комплексі. / М. О. Корчемний, В. С. Федорейко, В. П. Щербань. – Тернопіль : Підручники і посібники, 2001. – 984 с.
2. Федорейко, В. С. Біоресурсна диверсифікація джерел енергії в Україні / В. С. Федорейко, І. С. Іскерський, В. М. Шульга // Науковий вісник НУБіП України. – 2016. – Вип. 256. – С. 7–12.
3. Федорейко, В. С. Підвищення енергоефективності біотеплогенератора шляхом раціонального дозування компонентів горіння // В. С. Федорейко, І. Б. Луцик, І. С. Іскерський, Р. І. Загородній / Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ : НГУ, 2014. – № 4. – С. 111–116.

Referenses

1. Korchemnyi, M. O., Fedoreiko, V. S., Shcherban V. P. (2001). Enerhozberezhennia v ahropromyslovomu kompleksi. [Energy conservation in agriculture]. Ternopil, Pidruchnyky i posibnyky, 984.
2. Fedoreiko, V. S., Iskerskyi, I. S., Shulha, V. M. (2016). Bioresursna dyversyfikatsiia dzherel enerhii v Ukraini [Biological resources to diversify energy sources in Ukraine]. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy, 256, 7–12.
3. Fedoreiko, V. S., Lutsyk, I. B., Iskerskyi, I. S., Zahorodnyi, R. I. (2014). Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti bioteploheneratora shliakhom ratsionalnoho dozuvannia komponentiv horinnia [Increasing energy efficiency of bio heat generator by rational batching burning]. Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. Dnipropetrovsk, NHU, 4, 111–116.

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СИСТЕМА ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В БИОРЕСУРСНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

В. С. Федорейко, И. С. Искерский

Аннотация. Предложено технико-экономическое обоснование научно-технических проектов диверсификации источников питания путем использования биотеплогенераторов-утилизаторов для децентрализованного производства тепловой и электрической энергии в технологиях агропромышленного комплекса.

Проанализировано состояние энергетической отрасли Украины в контексте мировых тенденций развития традиционных и альтернативных источников энергии. Определено, как приоритет, использование для нашего государства восстановительных систем генерации тепловой и электрической энергии. На данном этапе развития отечественной энергетики это использование биоресурсных, бытовых, промышленных и медицинских отходов.

Разработанные биотеплогенераторы поточного действия мощностью до 4,0 МВт и генераторы-утилизаторы отходов мощностью 1,0 МВт позволяют создать децентрализованную систему генерации на базе теплоэлектроцентрали компенсационного типа с генерацией электрической и тепловой энергии для технологических процессов. Указанные усилия позволяют осуществить полноценную диверсифи-

кацию источников энергии, используя в качестве топлива различные отходы местного происхождения.

Самодостаточная логистика доставки топлива до места работы системы позволяет значительно удешевить генерацию тепловой и электрической энергии. Представленная разработка предлагается для элеватора мощностью 60 тыс. тонн с использованием сушилок типа ДСП-50 и Sukup.

Ключевые слова. диверсификация, генератор-утилизатор, биотопливо, трудноликвидные отходы, децентрализация, электрическая и тепловая энергия, тарифы, пиролиз, возобновляемые источники, энергоэффективность

DECENTRALIZATION SYSTEM OF THERMAL AND ELECTRIC ENERGY GENERATION IN BIORESOURCE TECHNOLOGIES

V. S. Fedoreyko, I. S. Iskersky

Annotation. *The feasibility study of scientific and technical projects for diversification of power sources by using bioteplogenerator-utilizator for decentralized production of thermal and electric energy in the technologies of the agro-industrial complex is proposed.*

The state of the Ukrainian energy sector is analyzed in the context of global trends in the development of traditional and alternative energy sources. It is determined, as a priority, the use for our state of restoration systems for the generation of thermal and electric energy. At this stage of development of domestic energy is the use of bioresource, household, industrial and medical waste. Developed bioteplogenerators with a flow capacity up to 4.0 MW and waste heat recovery generators with a capacity of 1.0 MW make it possible to create a decentralized generation system based on a combined heat and power plant with generation of electric and thermal energy for technological processes. These efforts allow for a full diversification of energy sources, using various wastes of local origin as fuel. A self-sufficient logistics of fuel delivery to the place of operation of the system makes it possible to significantly reduce the cost of generating thermal and electric energy. The presented development is proposed for an elevator with a capacity of 60 thousand tons using dryers such as DSP-50 and Sukup.

Keywords: *diversification, generator-utilizer, biofuel, important waste, decentralization, electric and thermal energy, tariffs, pyrolysis, renewable sources, energy efficiency*

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ВОДОПОГЛИНАННЯ НАСІННЯ ЯЧМЕНЮ

В. В. САВЧЕНКО, кандидат технічних наук, доцент
О. Ю. СИНЯВСЬКИЙ, кандидат технічних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: vit1986@ua.fm

Анотація. Метою досліджень було встановлення впливу магнітного поля на водопоглинання насіння ячменю. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що водопоглинання насіння за передпосівної обробки в магнітному полі залежить від квадрата магнітної індукції та швидкості руху насіння в магнітному полі.

За зміни магнітної індукції від 0 до 0,065 Тл, водопоглинання насіння зростає, а за подальшого її збільшення починає зменшуватися. Якщо магнітна індукція перевищує 0,130 Тл, водопоглинання змінюється несуттєво порівняно з контролем

Найефективніший режим обробки має місце за магнітної індукції 0,065 Тл і швидкості руху насіння 0,4/с. За такого режиму обробки відносно водопоглинання насіння ячменю збільшилося на 11,1 % порівняно з контролем.

Ключові слова: *магнітна індукція, швидкість руху зерна, дифузія молекул, клітинна мембрана, водопоглинання, ячмінь*

Актуальність. Підвищення урожайності зернових культур без застосування хімічних засобів є актуальним завданням. Одним із шляхів його вирішення є застосування електротехнологій.

Передпосівна обробка насіння зернових культур у магнітному полі має переваги перед іншими електрофізичними методами. Це високопродуктивна, енергоефективна, екологічна та ресурсозберігаюча технологія, яка дає можливість підвищити врожайність сільськогосподарських культур та якість продукції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Нині встановлено, що під дією магнітного поля зростає швидкість хімічних і біохімічних реакцій, які протікають в клітинах, підвищується розчинність солей і кислот, а також проникність мембран, що прискорює дифузію через мембрану молекул та іонів [1–3]. Це сприяє стимуляції насіння, росту та розвитку рослин.

Застосування технології передпосівної обробки насіння в магнітному полі зумовлює необхідність встановлення механізму його впливу на насіння й визначення найбільш ефективного режиму обробки.

Мета дослідження – встановлення впливу магнітного поля на водопоглинання насіння ячменю.

Матеріали і методи дослідження. Якщо два розчини різної концентрації розділені мембраною, яка є непроникною для розчиненої речовини, то вирівнювання концентрації досягається за рахунок дифузії молекул води в розчин з більшою концентрацією речовини. [5].

Під дією магнітного поля посилюється дифузія молекул води, внаслідок чого зростає водопоглинання насіння.

Експериментальні дослідження проводилися з ячменем сорту «Солнцедар». Насіння переміщували на транспортері через магнітне поле, що створювалося чотирма парами постійних магнітів з інтерметалічного композиту NdFeB, встановлених паралельно над і під стрічкою транспортера зі змінною полярністю.

Магнітну індукцію регулювали зміною відстані між магнітами в межах 0–0,5 Тл і вимірювали тесламетром 43205/1. Швидкість руху насіння через магнітне поле регулювали в межах 0 – 0,8 м/с за допомогою перетворювача частоти струму.

Контрольне та оброблене у магнітному полі насіння зважували до та після його замочування в дистильованій воді протягом 30 хв. Питоме водопоглинання розраховували за формулою [1]:

$$Y = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де m_2 – маса насіння (контрольного та обробленого) після замочування;

m_1 – маса насіння після замочування.

Дослідження впливу магнітної індукції і швидкості руху на водопоглинання насіння пшениці за магнітної обробки проводилися з використанням теорії планування експерименту [6]. Як фактори приймалися магнітна індукція (X_1) і швидкість руху насіння (X_2), а за вихідну величину – водопоглинання насіння пшениці.

На основі проведених однофакторних експериментів були визначені значення верхнього, нижнього і основного рівнів фактора, які становили для магнітної індукції 0; 0,65 і 0,130 Тл, для швидкості руху насіння – 0,4; 0,6 і 0,8 м/с.

Результати дослідження та їх обговорення. У початковий момент часу кількість речовини в розчинах, розділених мембраною, становить відповідно C_1V та C_2V . В усталеному режимі після дифузії молекул води з розчину з меншою концентрацією в розчин з більшою концентрацією речовини концентрації розчинів вирівнюються і становлять:

$$\frac{C_1V}{V + \Delta V} = \frac{C_2V}{V - \Delta V}, \quad (2)$$

де ΔV – об'єм води, який пройшов через мембрану, м³.

Із рівняння (2) отримаємо:

$$\Delta V = \frac{(C_1 - C_2)V}{C_1 + C_2}. \quad (3)$$

Процес дифузії води через мембрану описується законом Фіка:

$$\frac{(C_1 + C_2)d\Delta V}{dt} = -\frac{D}{\Delta L^2}(C_2(V + \Delta V) - C_1(V - \Delta V)), \quad (4)$$

де D – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;
 ΔL – товщина мембрани, м.

Звідси маємо:

$$\frac{(C_1 + C_2)d\Delta V}{dt} = -\frac{D}{\Delta L^2}((C_2 - C_1)V + (C_1 + C_2)\Delta V), \quad (5)$$

або

$$\frac{\Delta L^2}{D} \frac{d\Delta V}{dt} + \Delta V = \frac{(C_1 - C_2)V}{C_1 + C_2}. \quad (6)$$

За початкових умов ($t=0$, $\Delta V_{\text{поч}}=0$) це диференціальне рівняння має розв'язок:

$$\Delta V = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} V \left(1 - e^{-\frac{D}{\Delta L^2} t} \right), \quad (7)$$

Звідси водопоглинання клітини:

$$\Delta m = \rho \Delta V = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} V \left(1 - e^{-\frac{D}{\Delta L^2} t} \right), \quad (8)$$

де ρ – густина води, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Коефіцієнт дифузії через клітинну мембрану можна визначити за формулою [1]:

$$D = k_{\partial} a^2 e^{-\frac{E_a}{kT}}, \quad (9)$$

де k_{∂} – коефіцієнт, с^{-1} ;

a – міжатомна відстань, м;

E_a – енергія активації дифузії, Дж;

k – стала Больцмана, Дж/К;

T – абсолютна температура, К.

За дії магнітного поля розмір пори в мембрані зросте і буде становити:

$$a + K_m \frac{\Delta B}{\Delta L}, \quad (10)$$

де B – магнітна індукція;

K_M – коефіцієнт.

Це означає, що під дією магнітного поля на клітинну мембрану підвищується її проникність, тому зростає водопоглинання :

$$\Delta m = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \rho V \left(1 - e^{-\frac{k_\partial (a + K_M \frac{\Delta B}{\Delta L})^2 e^{-\frac{E_a}{kT}}}{\Delta L^2} t} \right). \quad (11)$$

Експериментально встановлено, що у разі зміни магнітної індукції від 0 до 0,065 Тл, водопоглинання насіння ячменю зростає, а за подальшого збільшення магнітної індукції – починає зменшуватися (рис. 1). Встановлено, що за магнітної індукції, що перевищує 0,130 Тл, водопоглинання змінюється неістотно і становить для насіння ячменю 17 % (у контролі – 9,8 %).

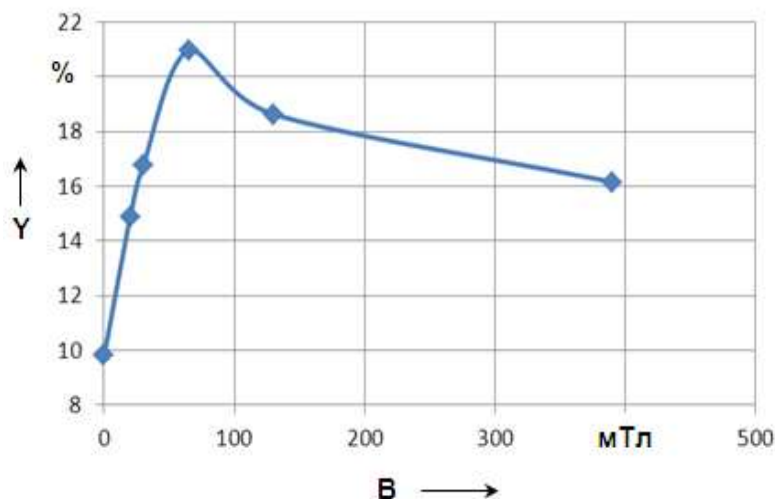


Рис. 1. Залежність питомого водопоглинання насіння ячменю від магнітної індукції

За результатами проведеного багатофакторного експерименту отримано рівняння регресії, яке у фізичних величинах має вигляд (рис. 2):

$$Y = 9,836 + 298,33 B - 0,486 v - 75 B v - 1562 B^2. \quad (12)$$

Встановлено, що водопоглинання насіння ячменю максимальне за магнітної індукції 0,065 Тл. Ефект магнітної обробки залежить від швидкості руху насіння, але в діапазоні швидкостей 0,4–0,8 м/с вона є менш істотним фактором, ніж магнітна індукція. Найкращі результати було отримано за швидкості 0,4 м/с.

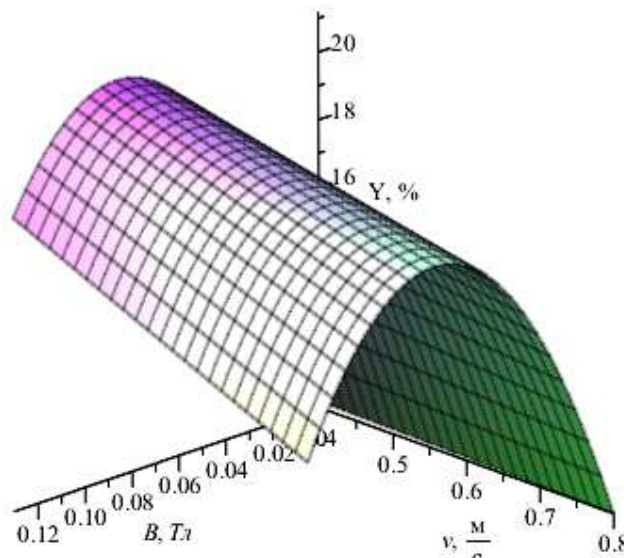


Рис. 2. Зміна питомого водопоглинання за обробки насіння ячменю в магнітному полі

Висновки і перспективи подальших досліджень. На основі проведених досліджень встановлено, що водопоглинання насіння ячменю за магнітної обробки залежить від квадрата магнітної індукції та швидкості руху насіння в магнітному полі. Найефективніший режим обробки має місце за магнітної індукції 0,065 Тл і швидкості руху насіння 0,4 м/с.

Список використаних джерел

1. Сидорцов, И. Г. Повышение эффективности воздействия постоянного магнитного поля на семена зерновых культур при их предпосевной обработке : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.20.02 «/ И. Г. Сидорцов. Ин-т... – зерноград, 2008. – 18 с.
2. Агрохимия / [Ягодин Б. А., Смирнов П. М., Петербургский А. В. и др.] ; под ред. Б. А. Ягодина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1989. – 639 с.
3. Кларксон, Д. Транспорт ионов и структура растительной клетки / Д. Кларксон. – М. : Мир, 1978. – 368 с.
4. Козырский, В. В. Влияние магнитного поля на диффузию молекул через клеточную мембрану семян сельскохозяйственных культур / В. В. Козырский, В. В. Савченко, А. Ю. Синявский // Вестник ВИЭСХ. – 2014. – № 2 (15). – С. 16–19.
5. Козирський, В. В. Вплив магнітного поля на водопоглинання насіння / В. В. Козирський, В. В. Савченко, О. Ю. Синявський // Науковий вісник НУБіП України. Серія... – 2014. – Вип. 194, ч. 1. – С. 16–20.
6. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.

References

1. Sidortsov, I. G. (2008). *Povysheniye effektivnosti vozdeystviya postoyannogo magnitnogo polya na semena zernovykh kul'tur pri ikh predposevnoy*

оброботке [Improving the efficiency of the impact of a constant magnetic field on crops seed at their pre-treatment]. Zernograd, 18.

2. Yagodin, B. A., Smirnov, P. M., Peterburgskiy, A. V. i dr. (1989). Agrokimiya [Agrochemicals] ; pod red. B. A. Yagodina. Moskow: Agropromizdat, 639.

3. Klarkson, D. (1978). Transport ionov i struktura rastitel'noy kletki [Transport of ions and the structure of the plant cell]. Moskow: Mir, 368.

4. Kozyrskiy, V. V., Savchenko, V. V., Sinyavskiy, A. Y. (2014). Vliyaniye magnitnogo polya na diffuziyu molekul cherez kletochnuyu membranu semyan sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [The influence of magnetic field on the diffusion of molecules through the cell membrane of seed crops]. Vestnik VIESKH, 2 (15), 16–19.

5. Kozyrskiy, V. V., Savchenko, V. V., Sinyavskiy, O. Y. (2014). Vplyv mahnitnoho polia na vodopohlynannia nasinnia [The influence of magnetic field on water absorption of seeds]. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy, 194 (1), 16–20.

6. Adler, Y. P., Markova, E. V., Granovskiy, Y. V. (1976). Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy [The planning of experiment in the search for optimal conditions]. Moskow: Nauka, 278.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВОДОПОГЛОЩЕНИЕ СЕМЯН ЯЧМЕНЯ

В. В. Савченко, А. Ю. Синявский

Аннотация. *Целью исследований было установление влияния магнитного поля на водопоглощение семян ячменя.*

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что водопоглощение семян при предпосівній оброботке в магнитном поле зависит от квадрата магнитной индукции и скорости движения семян в магнитном поле. При изменении магнитной индукции от 0 до 0,065 Тл водопоглощение семян возрастает, а при дальнейшем ее увеличении – начинает уменьшаться. Если магнитная индукция превышает 0,130 Тл, водопоглощение изменяется незначительно по сравнению с контролем.

Наиболее эффективный режим обработки имеет место при магнитной индукции 0,065 Тл и скорости движения семян 0,4/с. При таком режиме обработки относительное водопоглощение семян ячменя увеличилось на 11,1 % по сравнению с контролем.

Ключевые слова: *магнитная индукция, скорость движения зерна, диффузия молекул, клеточная мембрана, водопоглощение, ячмень*

EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON WATER ABSORPTION OF BARLEY SEEDS

V. Savchenko, A. Sinyavsky

Abstract. The aim of the research was to establish the influence of magnetic field on the water absorption of barley seeds.

On the basis of theoretical and experimental studies have established that water absorption of seeds at presowing treatment in a magnetic field depends on the square of the magnetic induction and speed of seed motion in the magnetic field. When the the magnetic induction changes from 0 to 0,065 T water absorption of seeds increases, and with a further increase of magnetic induction begins to decrease. It is found that when the magnetic induction greater than 0.130 T, the water absorption does not change significantly compared to the control.

The most effective treatment regimen occurs at 0.065 T magnetic induction and speed of the seeds of 0.4 m/s. The relative water absorption of barley seeds increased by 11.1 % compared with control.

Keywords: magnetic induction, the speed of grain, diffusion of molecules, cell membrane, water absorption, barley

УДК 621.324

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ВХІДНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ РОЗЧИНІВ НА ОВОЧЕВІ КУЛЬТУРИ

С. Д. ВАЩИШИН, асистент
Г. Б. ІНОЗЕМЦЕВ, доктор технічних наук,
**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: khorman@mail.ua

Анотація. Наведено результати досліджень процесу нанесення живильних та протруювальних розчинів на овочеві культури електростатичним методом в умовах закритого ґрунту. Теоретично і експериментально доведено, що розроблена математична модель у вигляді системи рівнянь обумовлює можливість підвищення ефективності роботи установок для нанесення живильних та протруювальних розчинів на овочеві культури в електричному полі шляхом керування вхідними параметрами процесу.

Отримані системи рівнянь обумовлюють можливість побудови із різними технологічними та агротехнічними вимогами траєкторії руху живильних та протруювальних розчинів в електричному полі, що дає можливість ефективного керування процесом нанесення, забезпечують при цьому якісну обробку овочевих культур, зменшення втрат робочих розчинів, забруднення навколишнього середовища та підвищує працездатність процесу.

© С. Д. Ващишин, Г. Б. Іноземцев, 2017

Abstract. The aim of the research was to establish the influence of magnetic field on the water absorption of barley seeds.

On the basis of theoretical and experimental studies have established that water absorption of seeds at presowing treatment in a magnetic field depends on the square of the magnetic induction and speed of seed motion in the magnetic field. When the the magnetic induction changes from 0 to 0,065 T water absorption of seeds increases, and with a further increase of magnetic induction begins to decrease. It is found that when the magnetic induction greater than 0.130 T, the water absorption does not change significantly compared to the control.

The most effective treatment regimen occurs at 0.065 T magnetic induction and speed of the seeds of 0.4 m/s. The relative water absorption of barley seeds increased by 11.1 % compared with control.

Keywords: magnetic induction, the speed of grain, diffusion of molecules, cell membrane, water absorption, barley

УДК 621.324

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ВХІДНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ РОЗЧИНІВ НА ОВОЧЕВІ КУЛЬТУРИ

С. Д. ВАЩИШИН, асистент
Г. Б. ІНОЗЕМЦЕВ, доктор технічних наук,
**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: khorman@mail.ua

Анотація. Наведено результати досліджень процесу нанесення живильних та протруювальних розчинів на овочеві культури електростатичним методом в умовах закритого ґрунту. Теоретично і експериментально доведено, що розроблена математична модель у вигляді системи рівнянь обумовлює можливість підвищення ефективності роботи установок для нанесення живильних та протруювальних розчинів на овочеві культури в електричному полі шляхом керування вхідними параметрами процесу.

Отримані системи рівнянь обумовлюють можливість побудови із різними технологічними та агротехнічними вимогами траєкторії руху живильних та протруювальних розчинів в електричному полі, що дає можливість ефективного керування процесом нанесення, забезпечують при цьому якісну обробку овочевих культур, зменшення втрат робочих розчинів, забруднення навколишнього середовища та підвищує працездатність процесу.

© С. Д. Ващишин, Г. Б. Іноземцев, 2017

Ключові слова: *електричний заряд, електричне поле, траєкторія руху, живильний та протруювальний розчин, вхідні параметри процесу нанесення*

Актуальність. Прогресивним методом нанесення розчинів на овочеві культури в закритому ґрунті є електростатичний метод, який обумовлює високу якість їх обробки, зменшення втрат робочих розчинів (до 85%), забруднення навколишнього середовища (до 90%) та ін. [3,4].

Одним із шляхів підвищення ефективності процесу обробки овочевих культур є встановлення можливості керування процесом нанесення живильних і протруювальних розчинів в залежності від агротехнічних вимог, видів овочевої продукції та визначення взаємозв'язків і залежностей вхідних параметрів [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Нанесенню живильних та протруювальних розчинів на овочеві культури в електричному полі з максимальним часом утримання електричного заряду робочим розчином приділено недостатньо уваги. Для даного напрямку досліджень, щодо встановлення можливості керування процесом нанесення живильних та протруювальних розчинів в залежності від агротехнічних вимог, видів овочевої продукції з використанням методів математичного моделювання, публікації мають оглядовий характер без глибокого аналізу переваг та недоліків електростатичного методу нанесення та можливості покращення ефективності процесу.

Мета дослідження – підвищення ефективності роботи установок для нанесення живильних та протруювальних розчинів на овочеві культури в електричному полі на базі використання математичної моделі.

Матеріали та методи досліджень. Розроблена нами система рівнянь обумовлює можливість визначення швидкості руху заряджених робочих розчинів, координат та встановлення на їх основі траєкторії руху.

Знаходження швидкості руху кожної зарядженої краплини здійснювалось за наступною системою рівнянь [2]:

$$V_{xk}^{\bullet-} = \frac{q_k C \Delta t_n}{m_k + AC \Delta t_n} \cdot E_{xk}^{\bullet-} + \frac{F_{xk}^{\bullet-1-}}{m_k + AC \Delta t_n}, \quad (1)$$

$$V_{yk}^{\bullet-} = \frac{q_k C \Delta t_n}{m_k + AC \Delta t_n} \cdot E_{yk}^{\bullet-} + \frac{F_{yk}^{\bullet-1-}}{m_k + AC \Delta t_n}, \quad (2)$$

$$V_{zk}^{\bullet-} = \frac{q_k C \Delta t_n}{m_k + AC \Delta t_n} \cdot E_{zk}^{\bullet-} + \frac{F_{zk}^{\bullet-1-}}{m_k + AC \Delta t_n}. \quad (3)$$

Знаходження траєкторії руху краплин здійснювалось за наступною системою рівнянь [2]:

$$x_k^{\bullet-} = x_k^{\bullet-1-} + CV_{xk}^{\bullet-} + 1 - C \bar{V}_{xk}^{\bullet-1-} \Delta t_n, \quad (4)$$

$$y_k^{\bullet-} = y_k^{\bullet-1-} + CV_{yk}^{\bullet-} + 1 - C \bar{V}_{yk}^{\bullet-1-} \Delta t_n, \quad (5)$$

$$z_k^* = z_k^{*1} + C V_{zk}^* + 1 - C \bar{V}_{zk}^{*1} \Delta t_n. \quad (6)$$

Система рівнянь (1-3), (4-6) дозволяє побудувати траєкторії руху краплин за координатами та швидкостями в різний момент часу t_n за різних значень міжелектродної відстані.

Результати дослідження та їх обговорення. Отримана нами система рівнянь була перевірена експериментальним шляхом. Перевірка проводилась в програмному середовищі Mathcad 13.

В систему рівнянь(1-3), (4-6), були закладені параметри, які отримані на основі експериментальних даних процесу нанесення розчинів (табл.1, рис.1-2).

1. Результати досліджень нанесення розчинів

и	Режим	Подача розчину мл/мм	Напруга, кВ	Міжелектродна відстань, м	Швидкість руху повітряного потoku, м/с
I	$U=f(B, L, V)$	2,85	25	1,5	1.2
		3,08	40	1,5	1.2
		3,25	50	1,5	1.2
II	$B=f(U, L, V)$	2,80	30	1,5	1.6
		3,20	30	1,5	1.6
		3,60	30	1,5	1.6
III	$V=f(B, L, U)$	2,85	45	1,5	1.8
		3,08	45	1,5	1.8

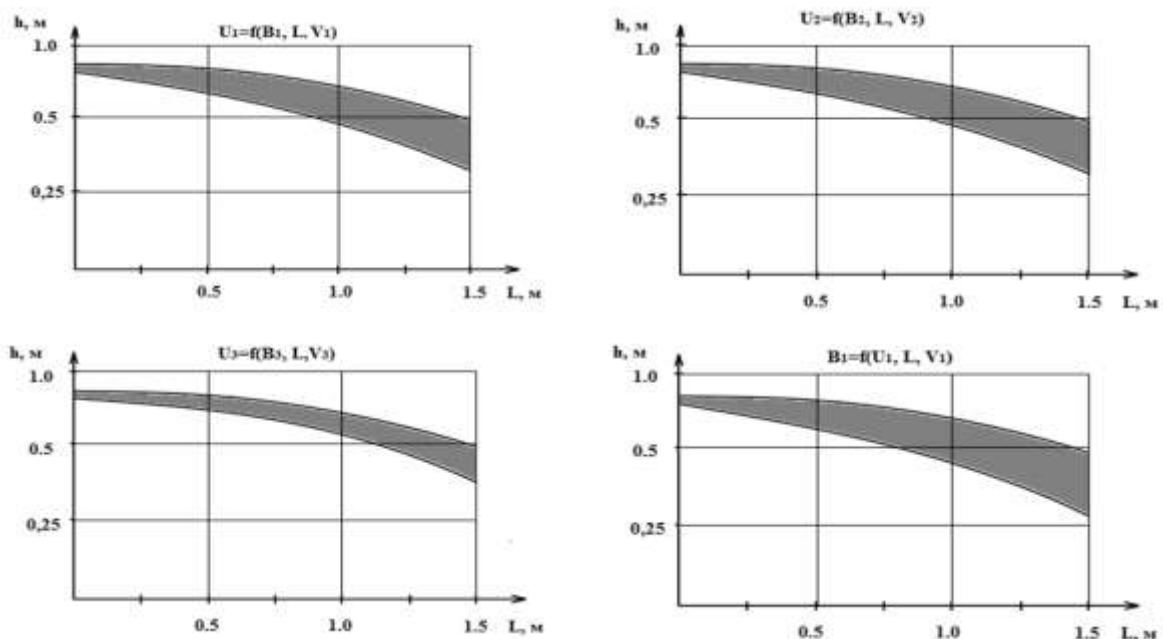


Рис.1. Форма траєкторії руху потоку краплин (табл. 1)

Аналіз (рис. 1-2) показує можливість використання системи рівнянь для отримання параметрів процесу нанесення, які обумовлюють максимальну ефективність процесу нанесення.

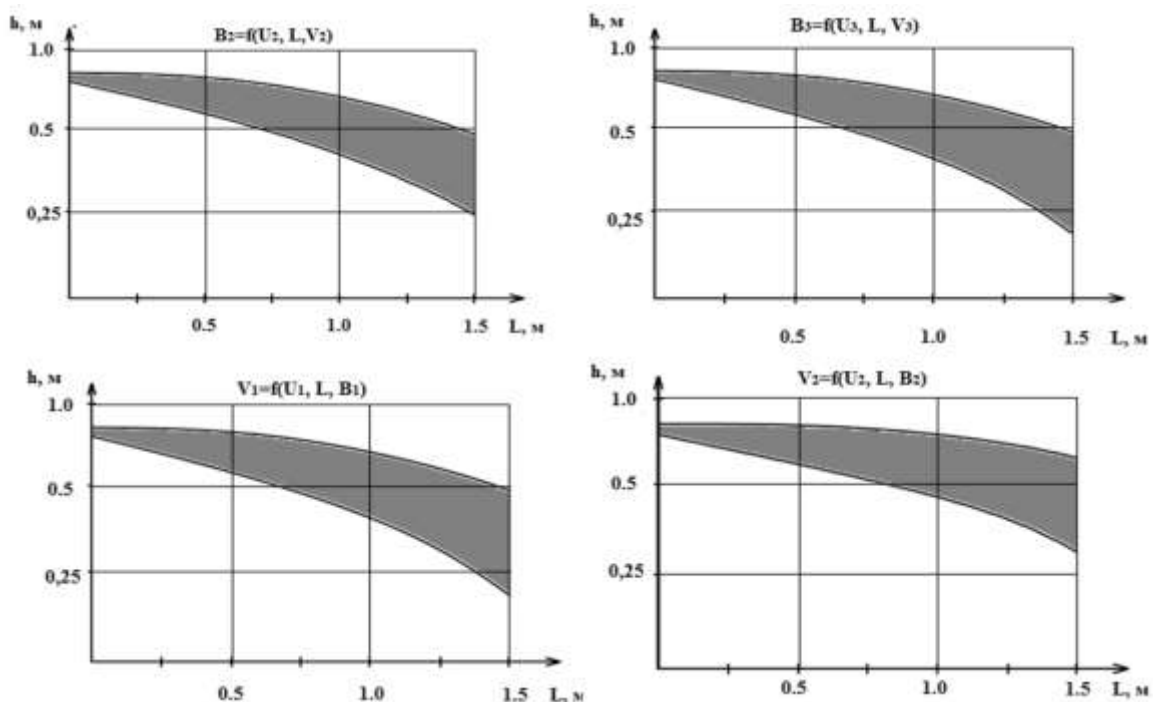


Рис.2. Форма траєкторії руху потоку краплин (табл. 1)

Висновки і перспективи. Розроблена система рівнянь обумовлює можливість підвищення ефективності роботи установок для нанесення живильних та протруювальних розчинів на овочеві культури в електричному полі шляхом керування та визначення ефективних вхідних параметрів процесу нанесення.

Список літератури

1. Верещагин, И. П. Основы электрогазодинамики дисперсных систем /И. П. Верещагин, В. И. Левитов и др. – М.: Энергия, 1974. – 479 с.
2. Іноземцев, Г. Б. Науково-технічні передумови застосування електричного поля при захисті рослин / Г. Б. Іноземцев // Енергетика і автоматика – 2006. – №3(7). – С. 12 – 18.
3. Іноземцев, Г. Б. Активація та стимуляція росту овочевих культур шляхом нанесення живильних розчинів електростатичним методом / Г. Б. Іноземцев, С. Д. Ващишин // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК» –К.: ВЦ НУБіП України, 2012. – Вип 174, ч.2. – С. 199 – 206.
4. Іноземцев, Г. Б. Дослідження електрофізичних параметрів живильних розчинів на здатність їх до електростатичного розпилення / Г. Б. Іноземцев, С. Д. Ващишин // Енергетика і автоматика – 2012.– №2. – С. 58 – 64.

References

1. Vereschagin, I. P. (1974). Osnovy elektrogazodinamiki dispersnyih sistem [Basics of electrogasdynamics of disperse systems]. Moscow, Energiya, 479.
2. Inozemtsev, G. B. (2006). Naukovo-tehnichni peredumovi zastosuvannya elektrichnogo polya pri zahisti roslin [Scientific and technical prerequisites for the application of an electric field in the protection of plants]. Energy and automation, 3(7), 12 – 18.

3. Inozemtsev, G.B., Vaschishin, S.D. (2012). Aktivatsiya ta stimulyatsiya rostu ovochevih kultur shlyahom nanesennya zhivilnih rozchyniv elektrostatchnim metodom [Activation and stimulation of growth of vegetable crops by applying nutrient solutions electrostatic means] Scientific Journal NUBiP Ukraine. A series of "Technology and Energy AIC", 174 (2), 199 - 206.

4. Inozemtsev, G.B., Vaschishin, S.D. (2012). Doslidzhennya elektroflzichnih parametriv zhivilnihrozchyniv na zdattst yih do elektrostatchnogo rozpilennya [The study of electrical parameters nutrient solutions on their ability to electrostatic spraying]. Energy and automation, 2, 58 – 64.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВХОДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ РАСТВОРА НА ОВОЩНЫЕ КУЛЬТУРЫ

С. Д. Ващишин, Г. Б. Иноземцев

Аннотация. *Приведены результаты исследований процесса нанесения питательных и протравливающих растворов на овощные культуры электростатическим методом в условиях закрытого грунта. Теоретически и экспериментально доказано, что разработанная математическая модель в виде системы уравнений обуславливает возможность повышения эффективности работы установок для нанесения питательных и протравливающих растворов на овощные культуры в электрическом поле путем управления входными параметрами процесса. Полученные системы уравнений обуславливают возможность построения с различными технологическими и агротехническими требованиями траекторий движения питательных и протравливающих растворов в электрическом поле, дают возможность эффективного управления процессом нанесения, обеспечивая при этом качественную обработку овощных культур, уменьшая потери рабочих растворов, загрязнение окружающей среды и повышая работоспособность процесса.*

Ключевые слова: *электрический заряд, электрическое поле, траектория движения, питательный и протравливающий раствор, входные параметры процесса нанесения*

MORE EFFECTIVELY MANAGE INPUT PARAMETER APPLICATION PROCESS SOLUTIONS ON VEGETABLE CROPS

S. D. Vaschyshyn, G. B. Inozemtsev

Abstract. *The results of the research process and the application of nutrient solutions on vegetable crops electrostatic means in terms of greenhouses. Theoretically and experimentally proved that the mathematical model in the form of equations makes the possibility of increasing the efficiency of plants for nutrient application and dressing agentsolutions on vegetable crops in the electric field by controlling the input parameters of the*

process. The resulting system of equations determine the possibility of construction of various technological and cultural practices required trajectory of nutrients and dressing agent solutions in the electric field, which allows effective process control application, provided with high-quality processing of vegetables, reduce losses of working solutions, pollution and increases the efficiency of the process.

Keywords: *electric charge, electric field, trajectory, nutrient and dressing agentsolution, input parameters of the application*

УДК 528.7:633

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ЩОДО РАДІОЧАСТОТНОЇ КОРЕКЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ПОСІВІВ, ОТРИМАНИХ ІЗ ДОПОМОГОЮ БПЛА

В. П. ЛИСЕНКО, доктор технічних наук, професор

E-mail: lysenko@nubip.edu.ua

О. О. ОПРИШКО, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: ozon.kiev@gmail.com

Д.С. КОМАРЧУК, кандидат технічних наук, старший викладач

E-mail: dmitruy@mail.ru

А. І. МАРЦИФЕЙ, аспірант*

E-mail: tbomk@mail.ru

Н. А. ПАСІЧНИК, кандидат сільськогосподарських наук, доцент

E-mail: n.pasichnyk@nubip.edu.ua

Анотація. *Стаття присвячена дослідженням щодо використання радіочастотної корекції результатів вимірювань інтенсивності складових кольору знімків у видимому спектрі рослинних насаджень, отриманих із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Стандартні способи калібрування адаптовані під супутникові платформи і не пристосовані для використання із БПЛ. Використання останніх надає принципово нові можливості для програмування врожаю, проте, потребує вирішення проблеми корекції результатів з огляду на нестабільність природнього освітлення.*

Розглянуті основні підходи щодо калібрування як із використанням оптичних шаблонів, так і з використанням службових даних. Приведені результати експериментальних вимірів інтенсивності складових в адитивній моделі кольороутворення на прикладі ярової пшениці, що була отримана в лабораторних умовах із використанням фітотрона – спеціалізованої камери-бокса, де фізично моделюються умови

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В. П. Лисенко

© В. П. Лисенко, О. О. Опришко, Д.С. Комарчук,
А. І. Марцифей, Н. А. Пасічник, 2017

process. The resulting system of equations determine the possibility of construction of various technological and cultural practices required trajectory of nutrients and dressing agent solutions in the electric field, which allows effective process control application, provided with high-quality processing of vegetables, reduce losses of working solutions, pollution and increases the efficiency of the process.

Keywords: *electric charge, electric field, trajectory, nutrient and dressing agentsolution, input parameters of the application*

УДК 528.7:633

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ЩОДО РАДІОЧАСТОТНОЇ КОРЕКЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ПОСІВІВ, ОТРИМАНИХ ІЗ ДОПОМОГОЮ БПЛА

В. П. ЛИСЕНКО, доктор технічних наук, професор

E-mail: lysenko@nubip.edu.ua

О. О. ОПРИШКО, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: ozon.kiev@gmail.com

Д.С. КОМАРЧУК, кандидат технічних наук, старший викладач

E-mail: dmitruy@mail.ru

А. І. МАРЦИФЕЙ, аспірант*

E-mail: tbomk@mail.ru

Н. А. ПАСІЧНИК, кандидат сільськогосподарських наук, доцент

E-mail: n.pasichnyk@nubip.edu.ua

Анотація. *Стаття присвячена дослідженням щодо використання радіочастотної корекції результатів вимірювань інтенсивності складових кольору знімків у видимому спектрі рослинних насаджень, отриманих із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Стандартні способи калібрування адаптовані під супутникові платформи і не пристосовані для використання із БПЛ. Використання останніх надає принципово нові можливості для програмування врожаю, проте, потребує вирішення проблеми корекції результатів з огляду на нестабільність природнього освітлення.*

Розглянуті основні підходи щодо калібрування як із використанням оптичних шаблонів, так і з використанням службових даних. Приведені результати експериментальних вимірів інтенсивності складових в адитивній моделі кольороутворення на прикладі ярової пшениці, що була отримана в лабораторних умовах із використанням фітотрона – спеціалізованої камери-бокса, де фізично моделюються умови

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В. П. Лисенко

© В. П. Лисенко, О. О. Опришко, Д.С. Комарчук,
А. І. Марцифей, Н. А. Пасічник, 2017

навколишнього середовища. Проведено порівняння результатів, отриманих із використанням оптичного шаблону та службових даних про параметри знімків, а саме приведеного терміну експозиції та LightValue (LV). Показано, що найвища точність калібрування щодо освітлення очікується за використання залежності інтенсивності складових кольору від LV. Проте калібрування слід проводити під конкретну марку сенсору фотокамери.

Ключові слова: дистанційне зондування, радіочастотна корекція, безпілотні літальні апарати

Актуальність. Революційні зміни в інформаційних технологіях та робототехніці впродовж останніх десятиліть призвели до появи серійних БПЛА, здатних вирішувати широкий спектр задач для потреб аграрного виробництва. Одним з найбільш перспективних напрямів використання БПЛА є дистанційне зондування рослинних насаджень для потреб раціонального використання добрив. У порівнянні із супутниковим та авіаційним моніторингом БПЛА мають принципові переваги не лише за точністю і вартістю моніторингу, а і можливості їх використання за низької хмарності, що є вкрай актуальним з огляду на потребу в оперативному моніторингу.

У рослинництві БПЛА використовують для ідентифікацій проблемних ділянок поля, контролю якості виконання польових робіт сільськогосподарською технікою тощо. Здійснюються спроби використання дронів для моніторингу стану мінерального живлення рослин на базі, так званих, вегетаційних індексів (VI), що обчислюються за кількісними характеристиками спектрів відбиття у певних частотних діапазонах. Складність вирішення цієї задачі пов'язана із потребою вимірів спектральних характеристик насаджень в умовах змінного освітлення, тобто здійснення радіочастотної (РЧ) корекції. На сьогодні існує кілька методичних підходів щодо радіочастотної корекції для БПЛА, їх оцінка та вибір оптимального рішення для обчислення VI і є метою нашої роботи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. VI використовуються із початку 70-х років після запуску в США програми супутникового моніторингу Landsat. Завдяки отриманому досвіду впровадження супутникових технологій моніторингу було продовжено і тому нині експлуатується кілька десятків супутникових платформ, котрі надають інформацію для більш ніж двохсот різних VegetationIndex (VI) [1]. Як правило, для РЧ корекції використовують оптичні еталони, в якості котрих виступають об'єкти на поверхні Землі із стабільними спектральними характеристиками: глибоководні водойми, дороги тощо. Проте для БПЛА із висотою польоту в кілька сотень метрів використання природних оптичних еталонів ускладнене, завдяки їх дефіциту на виробничих полях.

Апаратно вирішити проблему щодо змін освітлення пропонувалось із використанням додаткового спеціалізованого сенсора освітлення як доповнення до основного сенсора моніторингу. До таких відноситься датчик освітленості LightSensor від Micasense, котрий являє собою 5-ти

смуговий сенсор, що підключається безпосередньо до камери MicaSenseRedEdge (камера спеціалізована для використання з платформи БПЛА). Дані динамічного калібрування від додаткового сенсору записується в метаданих, одержуваних TIFF зображень основного сенсора. JianfengZhou (2016) в [2] за використання такого обладнання отримав добру відтворюваність результатів, проте, таке рішення може використовуватись за щільної хмарності, чи за ясного неба. Якщо ж в небі присутні окремі хмари, зазначений варіант не підходить, що обмежує його використання.

Штучні наземні шаблони для проведення РЧ корекції використовуються найбільш часто, оскільки можливо отримати високу точність вимірів за відносно малої вартості обладнання. Проте збільшення точності вимагає використання різних шаблонів для різних частотних каналів вимірів. Так Haitao Xiang (2011) [3] для отримання індексів NDVI, GNDVI, RVI, GRI використовував 3 оптичні шаблони (використовувались саме 3 канали виміру). А Monica Herrero-Huerta (2014) [4] для підвищення точності вимірів BI використовувала 6 сірих шаблонів із різними відтінками та 6 додаткових шаблонів різного кольору. Збільшення кількості шаблонів покращує точність отриманих даних, проте, використання цього підходу в промислових масштабах ускладнене з організаційних та фінансових причин. Слід відзначити, що для РЧ калібрування, зазвичай, використовують оптичні шаблони сірого кольору. При цьому градацію сірого підбирають емпірично під конкретну модель фотокамери. Сірий колір обирається тому, що його технологічно простіше отримати (барвники фарби є нестабільними). До того ж в суто білому та чорному шаблонах за певного освітлення поверхні сенсором фотокамери сприймаються відповідно як гляцеві та матові, що негативно впливає на точність радіочастотної корекції.

Досвід РЧ корекції освітлення для рухомого обладнання без використання оптичних шаблонів реалізовано в сенсорах GreenSeeker та CropCircle ACS-470 із використанням додаткового джерела опромінення [5]. До того ж за експлуатації GreenSeeker та CropCircle необхідно періодично здійснювати додаткове калібрування. У [6] для РЧ корекції також використовували додаткове джерело освітлення і для підвищення точності вимірів проводили серію знімків із різною тривалістю експозиції. Згідно запропонованої методики в розрахунках використовували meta дані із файлу exiff, що автоматично створюється за формування файлу зображення формату jpeg. Saberioona M. (2014) [7] висловив припущення про можливість використання службових даних фотокамери (файл exiff) для калібрування щодо змін освітленості. Проте досліди здійснювали впродовж одного дня 23.03.2013 о 9-30 ранку. При цьому параметри налагодження були встановлені камерою в автоматичному режимі. Цілком ймовірно, що впродовж дослідження зміни освітлення були не суттєвими, що дозволило отримати добру відтворюваність результатів. Тобто методика вимагає уточнення.

Виходячи з вищезазначеного можна зробити такі висновки:

1) для виготовлення оптичних еталонів доцільно використовувати однотонні сірі панелі або панелі, поверхня котрих складається з ділянок, де кольори відповідають граничним значенням в адитивній моделі кольореутворення;

2) за РЧ корекції доцільно використовувати серію знімків із різними значеннями тривалості експозиції;

3) доцільно розглянути зв'язок між значеннями параметрів налагодження фотокамери з файлу exiff та отриманими результатами щодо інтенсивності складових кольору.

Мета дослідження – використання радіочастотної корекції результатів вимірювань інтенсивності складових кольору знімків у видимому спектрі рослинних насаджень, отриманих із використанням безпілотних літальних апаратів.

Матеріали та методи дослідження. Зразки. Для дослідів було використано зразки пшениці ярової сорту Елегія, що були вирощені впродовж 12.2016-02.2017 в умовах фітотрону, де були фізично змодельовані температуро-вологісний режим та освітлення, характерні для періоду «березень – травень» для Київської області. У період проведення досліджень зразки знаходились у стадії вегетації – вихід в трубку. Для проведення фотозйомки зразки були зрізані на 5-10 мм вище кореня. При цьому на рослинах були відсутні краплі води чи залишку ґрунту. Для експерименту брали зразки виключно з однієї посудини для запобігання похибок, пов'язаних із відмінністю кольорів зразків за рахунок різних умов їх живлення. За розміщення зразків на поверхні шаблону зберігали орієнтацію рослин, а дослідну ділянку вибирали саме із середньої частини рослин.

Відбивну панель (шаблон) для фотозйомки в умовах змінного освітлення виготовили з паперу, щільністю 80г/м². У процесі зйомки шаблон із зразками розміщували на пластиковій плиті білого кольору (для запобігання похибок, пов'язаних із впливом забарвлення підкладки за просвічування шаблону і використання сполоху). Для універсальності шаблону щодо природного освітлення було обрано схему з квадратів чорного та білого кольорів, розміри котрих становили 0,02×0,02 м. Габарити робочої частини шаблону становили 0,34×0,26 м і були достатніми для розміщення рослинного зразка повністю.

Спектральні сенсори оптичного діапазону. Для дослідів було використано стандартну цифрову камеру для БПЛА PHANTOM VISION FC200, а також фотокамери від смартфонів LenovoS660 та A1000. Використання смартфонів було обумовлено досвідом використання цього обладнання як дешевої альтернативи професійному обладнанню для розміщення їх на безпілотних літаючих платформах. Налаштування оптичних сенсорів полягало в коригуванні кількості випромінювання, що потрапляє на світлочутливу матрицю шляхом встановлення (зміни) терміну експозиції. Дані про стан діафрагми та тривалість експозиції, а також інші параметри налаштування отримували з файлу exiff, що утворювався автоматично при кожному вимірі. Експериментальні дослідження проводили в примі-

щені із комбінованим природнім та штучним освітленням (газорозрядні лампи). При зйомці параметр «баланс білого» у ручному режимі встановлювали значення – «ясна погода». Для камер S660 та A1000 використовували штатний сполох.

Обробка результатів. Для отримання значень інтенсивності складових кольорів зразків використовували програмне забезпечення LandDamageExpert(LDE) [8,9]. Програмне забезпечення LDE дозволяє визначати значення інтенсивності складових кольору пікселів зображення для адитивної 8-бітної колірної моделі RGB, в якій зображення отримують із комбінації трьох складових (червоної, зеленої та синьої). Кожна із складових RGB може змінюватись в діапазоні 0-255 умовних одиниць, що є фізичним обмеженням методики.

Результати досліджень та їх обговорення. Оптичний шаблон. На рис. 1 представлено залежності між відповідними складовими кольору дослідного зразка (пшениця) та білої частини оптичного шаблону. Як видно з представленої інформації, для FC200 та S660 за всіма трьома складовими кольору є добра відтворюваність. Експериментально отримані результати добре апроксимувались експоненціальними залежностями за винятком граничних ділянок, де інтенсивності складової кольору шаблону становить 255. Значення коефіцієнтів детермінації для цих результатів досліджень приведені в таблиці. Їх аналіз дозволяє зробити висновок про те, що використання шаблонів не позбавляє від необхідності калібрування конкретних зразків обладнання.

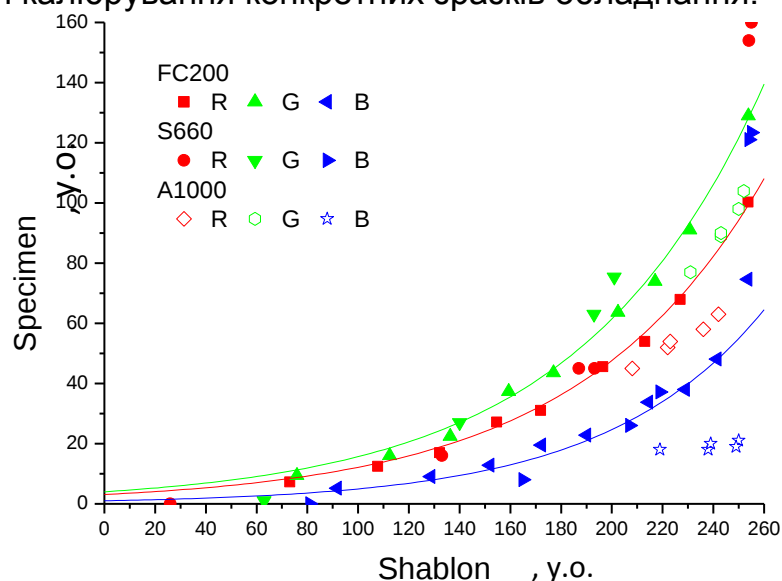


Рис. 1. Залежності інтенсивності складових кольору зразка (specimen) від відповідної інтенсивності шаблону (shablon)

Можливим поясненням різниці в результатах є використання різних алгоритмів перерахунку первісних даних за створення файлу зображення формату jpeg. Слід відзначити, що за корекції тривалості експозиції шляхом збільшення її тривалості за межами моделі виявилось до 40% результатів, що негативно впливає на точність вимірів.

Калібрування на основі тривалості приведеної експозиції. Калібрування базується на використанні службових даних про параметри налагодження фотоапарату, що отримують із службового файлу exif [10]. Величину приведеної експозиції обчислюють із залежності:

$$t_{priv} = t \times 2^{ev}, \quad (1)$$

де t – тривалість експозиції, сек;

ev – значення корекції експозиції.

На рис. 2 представлено отримані залежності між тривалістю приведеної експозиції та інтенсивністю складових кольору. На відміну від першого випадку, коли модель обмежена кольоровим простором шаблону, приведена тривалість експозиції має значно ширші межі, що дає можливість враховувати найбільш цінні дані за максимальних величин інтенсивності складових кольору.

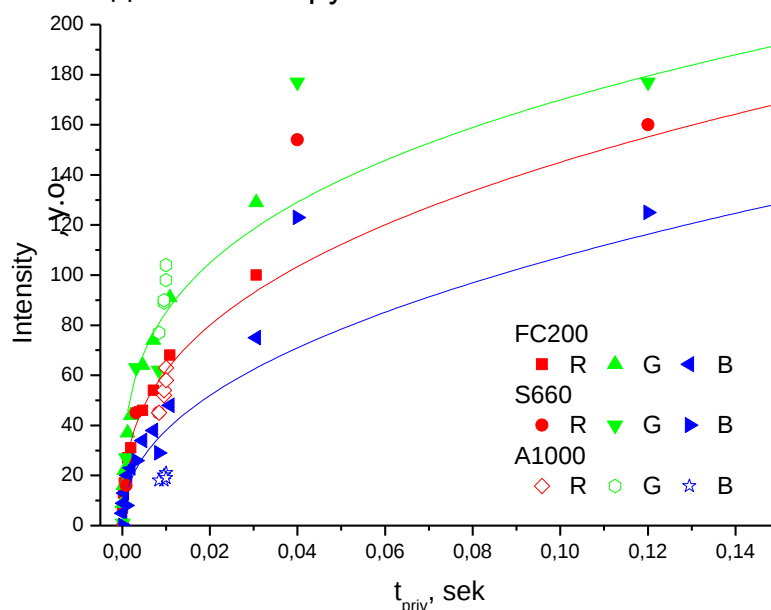


Рис. 2. Залежності інтенсивності складових кольору від величини приведеної експозиції

Отримані результати були апроксимовані простим ступневим рівнянням. Значення коефіцієнтів детермінації приведені в таблиці. За результатами аналізу матеріалів цього дослідження можна стверджувати, що таке калібрування у порівнянні із попереднім (за шаблонами) дає не гіршу збіжність результатів та більш широкі межі для застосування.

Калібрування за величиною LightValue. Кількість світла, що потрапляє до світлочутливого елементу фотокамери можна коригувати, змінюючи величину діафрагми. На цьому принципі авторами пропонується здійснювати калібрування, використовуючи при цьому значення LightValue (LV), що розраховується за виразом:

$$LV = \log_2 \frac{n^2}{t}, \quad (2)$$

де n – значення діафрагми фотокамери;

t – тривалість експозиції, с.

На рис. 3 представлено результати досліджень залежності інтенсивності червоної складової від величини LV для різних фотокамер. Фотокамера FC200 для БЛА використовувалась виключно за природнього освітлення, а інші – за наявності сполоху.

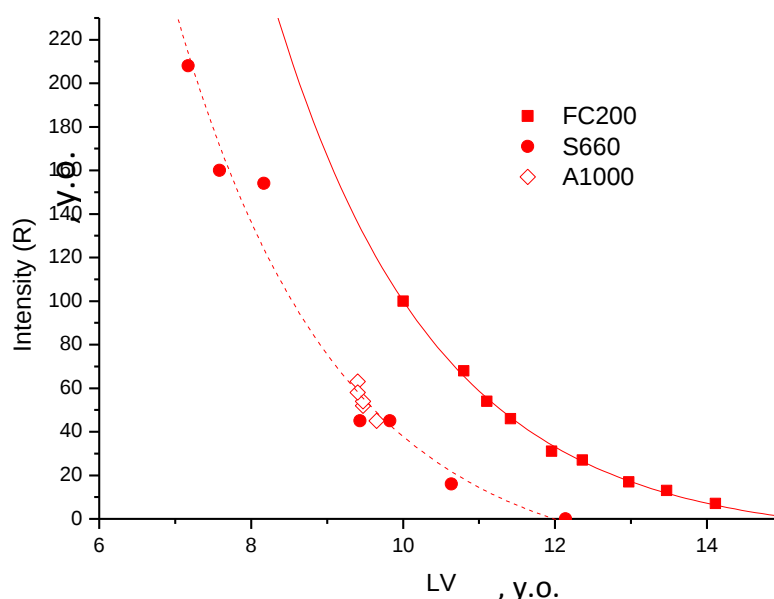


Рис. 3. Залежність інтенсивності червоної складової кольору пшениці від величини LV

Аналогічні залежності були виявлені і для зеленої та синьої складових кольору зразків. Отримані результати представлено в таблиці.

Величина коефіцієнта детермінації за апроксимації експериментальних даних щодо методу корекції

Комбінація обладнання для отримання зображення	Відбивна панель R,G,B∈[0,252]			Приведена експозиція t_{priv}			LightValue LV		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
FC200+S660+A1000	0.92	0.94	0.41	0.93	0.92	0.87	-	-	-
FC200+S660	0.98	0.98	0.96	0.94	0.93	0.93	-	-	-
FC200+S660 + A1000	-	-	-	0.95	0.94	0.63	-	-	-
R,G,B ∈[0,252]	-	-	-	0.95	0.95	0.94	-	-	-
FC200	-	-	-	-	-	-	0.99	0.99	0.99
S660+A1000	-	-	-	-	-	-	0.97	0.95	0.93

Відзначимо, що на відміну від попереднього способу, можна легко оцінювати дані, отримані і за меншої тривалості експозиції (максимальні значення LV). Ця особливість є важливою, виходячи з потреби у великій кількості знімків під час моніторингу полів з платформи БПЛА, враховуючи обмежений термін його польоту.

Висновки та пропозиції подальших досліджень. За використання оптичних шаблонів для моніторингу рослинних насаджень щодо стану їх мінерального живлення найбільш придатні R- та G-

складові. В-складова характеризується невеликим діапазоном вимірів і найгіршою збіжністю результатів ($R^2 = 0,41$).

Калібрування на базі приведеної тривалості експозиції дає добру збіжність результатів за всіма складовими ($R^2 \geq 0,94$), проте, за недостатньої витримки можливі істотні похибки ($EV \pm 1$).

Найвищу точність для всього діапазону корекції експозиції забезпечує отримана в результаті калібрування за величиною LightValue, за максимальної збіжності результатів ($R^2 \geq 0,99$), проте, калібрувальні залежності мають створюватись під конкретну марку обладнання (сенсору).

Список використаних джерел

1. Ahamed T., Tian L., Zhang Y., Ting K.C., "A review of remote sensing methods for biomass feedstock production". Biomass & Bioenergy. vol. 35, №7, pp.2455-2469. July 2011
2. Jianfeng Zhou (2016) Evaluation of ground, proximal and aerial remote sensing technologies for crop stress monitoring // Jianfeng Zhou , Lav R. Khot, Haitham Y. Bahlol, Rick Boydston, Phillip N. Miklas. IFAC-PapersOnLine. Vol. 49, № 16, P. 22–26
3. Haitao Xiang (2011) An automated stand-alone in-field remote sensing system (SIRSS) for in-season crop monitoring // Haitao Xiang, Lei Tian. Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 78, № 1, P.1-8
4. Monica Herrero-Huerta (2014) Vicarious radiometric calibration of a multispectral sensor from an aerial trike applied to precision agriculture // MónicaHerrero-Huerta, David Hernández-López, Pablo Rodriguez-Gonzalvez, Diego González-Aguilera, José González-Piqueras. Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 108, P. 28-38
5. Qiang Caoa (2015) Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems // Qiang Caoa, Yuxin Miaoa, Guohui Fengc, Xiaowei Gaoa, Fei Lid, Bin Liua, Shanchao Yuea, Shanshan Chenga, Susan L. Ustine, R. Khosla. Computers and Electronics in Agriculture Vol. 112, P. 64-57
6. Методичні підходи для керування вибіркоким внесенням добрив. / О. О. Опришко, І. М. Болбот, М. В. Андріїшина, Н. А. Пасічник // Аграрна наука і освіта. - 2008. - Т.9, № 3-4. - С. 100-104
7. Saberioona M. M. (2014) Assessment of rice leaf chlorophyll content using visible bands at different growth stages at both the leaf and canopy scale // M.M. Saberioona, M.S.M. Amina, A.R. Anuarb, A. Gholizadehc, A. Wayayokd, S. Khairunniza-BejodaSmart. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Vol.32 P.35–45
8. Визначення умісту гумусу в ґрунті неконтактними методами / С. Ю. Булигін, О. О. Опришко, Н. А. Гайбура, Д. І. Бідолах // Вісник аграрної науки. - 2005. - № 4. - С. 34-37
9. Опришко, О. О. Робототехнічний комплекс для культивації троянд / О. О. Опришко, Н. А. Пасічник, О. І. Бандурка // Науковий вісник НУБіП – 2012. – Вип. 170. Ч. 1. – С. 262-267
10. Оперативное дистанционное зондирование посевов как инструмент для программирования урожая. / В. Ф. Лысенко., А. А. Опришко, Д. С. Комарчук, Н. А. Пасичник // Вестник БГТУ, 2016. – №2. – С.144-148.

References

1. Ahamed, T., Tian, L., Zhang, Y., Ting, K. (2011). A review of remote sensing methods for biomass feedstock production". Biomass & Bioenergy, 35(7), 2455-2469.
2. Zhou, J., Khot, L., Bahlol, H.,, Boydston, R., Miklas, P. (2016) Evaluation of ground, proximal and aerial remote sensing technologies for crop stress monitoring, IFAC-PapersOnLine, 49(16), 22–26.
3. Xiang, H., Tian, L. (2011) An automated stand-alone in-field remote sensing system (SIRSS) for in-season crop monitoring. Computers and Electronics in Agriculture, 78(1), 1-8.
4. Herrero-Huerta, M., Rodriguez-Gonzalvez, P., González-Aguilera, D., González-Piqueras, J., (2014) Vicarious radiometric calibration of a multispectral sensor from an aerial trike applied to precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 108, 28-38.
5. QiangCaoa, YuxinMiaoa, GuohuiFengc, XiaoweiGaoa, (2015) Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems. Computers and Electronics in Agriculture, 112, 64-57.
6. Opryshko, O., Bolbot, I., Andriishyna, M., Pasichnyk, N., (2008) Metodichni pidkhody dlia keruvannia vybirkovym vnesenniam dobryv [Methodological approaches to control selective fertilization]. Ahrarna nauka i osvita, 9(3-4), 100-104.
7. Saberioona, M., Amina, M., Anuarb, A., Gholizadehc, A., (2014) Assessment of rice leaf chlorophyll content using visible bands at different growth stages at both the leaf and canopy scale. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 32, 35–45.
8. Bulyhin, S., Opryshko, O., Haibura, N., Bidolakh, D., (2005) Vyznachennia umistu humusu v grunti nekontaktnymy metodamy [Determination of the contents of humus in the soil non-contact methods]. Visnyk ahrarnoi nauky, 4, 34-37.
9. Opryshko, O., Pasichnyk, N., Bandurka, O., (2012) Robototekhnichniy kompleks dlia kulyvatsii troiand [Robotic systems for the cultivation of roses]. Naukovyi visnyk NUBIP, 170(1), 262-267.
10. Lysenko, V., Opryshko O., Komarchuk D., Pasychnyk, N., (2016) Operativnoe dystantsyonnoe zondirovanye posevov kak ynstrument dlia prohrammyrovanyia urozhaia [Operative remote sensing of crops as a tool for harvest programming]. Vestnyk BHTU, 2, 144-148.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ КОРРЕКЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОСЕВОВ ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ БПЛА

**В. П. Лысенко, А. А. Опрышко, Д. С. Комарчук,
А. И. Марцифей, Н. А. Пасечник**

Аннотация. *Статья посвящена исследованию использования радиочастотной коррекции результатов измерений интенсивности составляющих цвета снимков в видимом спектре растительных насаждений, полученных с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Стандартные способы калибровки адаптированы под спутниковые платформы и не приспособлены для использования с*

БПЛА. Использование последних предоставляет принципиально новые возможности для программирования урожая, однако требует решения проблемы коррекции результатов с учетом нестабильности естественного освещения.

Рассмотрены основные подходы к калибровке как с использованием оптических шаблонов, так и по использованию служебных данных. Приведены результаты экспериментальных измерений интенсивности составляющих в аддитивной модели цветообразования на примере яровой пшеницы, которая была получена в лабораторных условиях с использованием фитотрона – специализированной камеры-бокса, где физически моделируются условия окружающей среды.

Проведено сравнение результатов, полученных с использованием оптического шаблона и служебных данных о параметрах снимков, а именно приведенного срока экспозиции и LightValue (LV). Показано, что высокая точность калибровки по освещению ожидается при использовании зависимости интенсивности составляющих цвета от LV. Однако калибровки следует проводить под конкретную марку сенсора фотокамеры.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиочастотная коррекция, беспилотные летательные аппараты

METHODOLOGICAL APPROACHES TO CORRECTION RESULTS OF SCANNING IN REMOTE SENSING PLANTS USING UAV

V. Lysenko, O. Opryshko, D. Komarchuk, A. Martsyfey, N. Pasechnik

Abstract. The article is devoted to the investigation of the use of radiofrequency correction of the results of measurements of the intensity of the color components of the images in the visible spectrum of plantations obtained using unmanned aerial vehicles (UAVs). Standard calibration methods are adapted to. Satellite platforms and are not adapted for use with UAVs. The use of the latter provides fundamentally new opportunities for harvest programming, but it requires solving the problem of correction of results taking into account the instability of natural light. The main approaches to calibration are considered with the use of optical templates and the use of service data. The results of experimental measurements of the intensity of constituents in the additive model of color formation on the example of spring wheat, which was obtained under laboratory conditions using a phytotron-a specialized chamber-box, where the environmental conditions are physically modeled. Comparison of the results obtained with the use of an optical template and service data on the parameters of the images, namely the present exposure time and LightValue (LV), is compared. It is shown that a high accuracy of illumination calibration is expected when using the intensity of the constituent colors from LV. However, calibration should be carried out with a specific brand of the sensor of the camera.

Keywords: remote sensing, radio frequency correction, unmanned aerial vehicles

ПАСТЕРИЗАТОР ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ ПО КАНАЛАХ НАГРІВАННЯ І ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА

В. О. МІРОШНИК, кандидат технічних наук, доцент
Т. І. ЛЕНДЄЛ, кандидат технічних наук, старший викладач
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: taraslendel@rambler.ru

Анотація. Створена структурна схема пастеризатора молока і на основі її дослідження розроблені способи керування температурою і параметричні схеми секцій: рекуперації, пастеризації і охолодження пластинчастого пастеризатора молока. Розроблена математична модель пастеризатора, яка складається із системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку процесу теплообміну у секціях. За допомогою моделі у середовищі MathCad виконані розрахунки коефіцієнтів передатної функції об'єкту каналом регулювання температури у секціях. Під час створення математичної моделі пастеризатора прийнято, що втрати тепла з поверхні об'єкта в навколишнє середовище незначні і складають 5% в порівнянні з тепловими потоками, які переходять від теплоносія до продукту. Статичні характеристики секцій пастеризатора отримано завдяки утвореній системі балансових рівнянь для теплових потоків камер окремих секцій. В результаті проведення експериментальних і теоретичних досліджень отримана динамічна характеристика секції пастеризації каналом «витрати гарячої води – температура пастеризованого молока». Зазначена модель дозволить розробити алгоритми керування температурним режимом для збільшення продуктивності пастеризатора.

Ключові слова: математична модель, пластинчастий пастеризатор, передатна функція, температурний режим

Актуальність. Пастеризація – основна операція за оброблення молока на фермах перед відправкою на молокопереробні заводи. Практикою і науковими дослідженнями встановлено, що короткочасне нагрівання молока до температури 71 – 76 °C призводить до знищення патогенних і зменшення кількості термофільних бактерій і дозволяє за подальшого охолодження молока довгий час зберігати продукт без зміни його якості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для пастеризації молока в безперервному потоці, в основному, використовують пластинчасто-охолоджувальні пастеризаційні пристрої [1, 2]. Автоматичні системи керування такими пристроями повинні забезпечувати підтри-

мання заданих режимів нагрівання і охолодження молока, часу його витримки за постійної температури, а також перешкоджати виходу недогрітого продукту із пристрою. Основними функціями системи керування тут є контроль, реєстрація і регулювання температур нагрівання і охолодження молока, стабілізація його витрат, автоматичне керування поверненням недогрітого продукту, запуском, зупинкою і циркуляційною мийкою пристрою після використання.

Мета дослідження – створити математичну модель керування температурним режимом у пастеризаторі за каналами керування температури молока для регулювання коливання температури пастеризації і охолодження.

Матеріали і методи дослідження. Для вибору найбільш раціональної системи керування пастеризаційним пристроєм проведено дослідження його параметричних властивостей (рис. 1), де вивчено вхідні і вихідні параметри, збурюючі дії секцій нагрівання і охолодження пастеризатора. Для спрощення розрахунків об'єднано дві секції рекуперації в одну і дві секції охолодження – в одну.

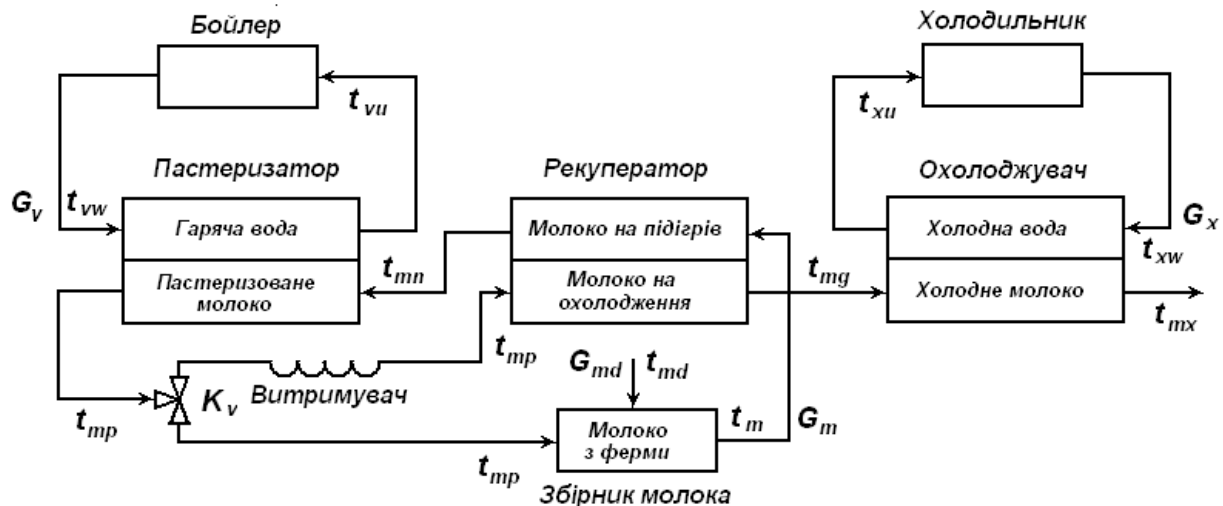


Рис. 1. Структурна схема пастеризатора молока:

$t_m, t_{mn}, t_{mg}, t_{mx}, t_{mp}$ – температура на вході в рекуператор, підігрітого на виході рекуператора, охолодженого після рекуператора, холодного і пастеризованого молока; t_{xw}, t_{xu} – температура холодної води на вході і виході охолоджувача; t_{vw}, t_{vu} – температура гарячої води на виході і вході в бойлер, t_{md} – температура молока з ферми, °C; V_{md}, V_m, V_v, V_x – об'ємні витрати молока з ферми і холодного на рекуператор, витрати гарячої води і води в охолоджувачі, м³/с, G_{md}, G_m, G_v, G_x – масові витрати молока, кг/с, r_m, r_v – середня густина молока і води, кг/м³; C_m, C_v – теплоємність молока і води, Дж/(кг °C); F_p, F_n, F_x – поверхні теплообміну в пастеризаторі, в рекуператорі і в охолоджувачі, м²; V_{vp}, V_{mp} – об'єми води і молока в пастеризаторі, V_{n1}, V_{n2} – холодного і гарячого молока в рекуператорі, V_{vx}, V_{mx} – холодної води і молока в охолоджувачі, м³.

Визначимо коефіцієнти теплопередачі k_p, k_n, k_x – між теплоносіями в рекуператорі, пастеризаторі і охолоджувачі, Вт/(м²·°C).

Регулюючий параметр (коефіцієнт рециркуляції) позначимо як K_v .

Основними причинами, що викликають коливання температури пастеризації t_{mp} молока, є непостійність витрат молока на вході G_{md} , зміни температури молока, що надходить з ферми t_{md} , зміни витрат гарячої води з бойлера t_{vw} , зміна коефіцієнтів теплопередачі k_p, k_n, k_x внаслідок забруднення поверхні теплопередачі секцій пастеризатором коагульованим білком молока. Через конструктивні особливості пастеризатора прийнято наступне: $V_{vp} = V_{mp}, V_{n1} = V_{n2}, V_{vx} = V_{mx}$.

Для стабілізації температури пастеризованого молока t_{mp} в якості керуючої дії приймають витрати енергоресурсів на підігрів гарячої води, що приводить до зміни температури води на виході з бойлера t_{vw} і витрати гарячої води G_v .

На процес рекуперації молока, підігрів холодного молока гарячим, з одночасним охолодженням пастеризованого молока, і стабілізації температури молока на виході рекуператора t_{mn} , яке переходить в пастеризатор. Керуючими діями може бути коефіцієнт рециркуляції молока K_v , а збуреннями – температура молока з ферми t_{md} і витрати молока на пастеризацію G_{md} .

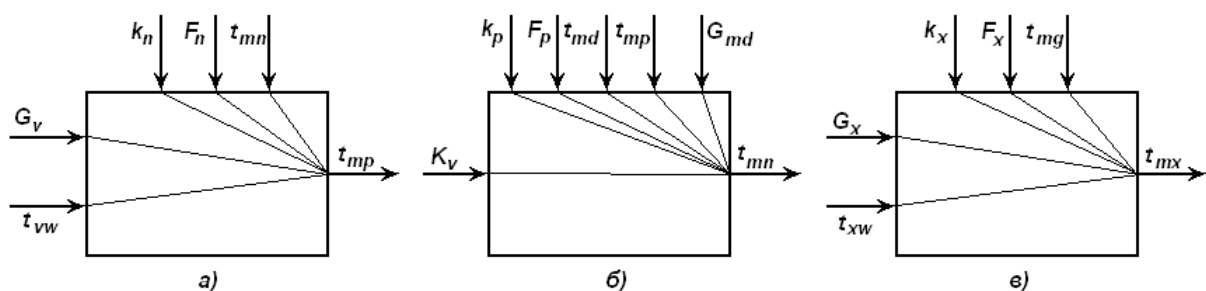


Рис. 2. Параметрична схема секцій пастеризатора молока: а) об'єкт керування пастеризатором; б) об'єкт керування рекуператором; в) об'єкт керування охолоджувачем

Основним джерелом коливань температури молока на виході охолоджувача t_{mx} є зміна температури холодної води t_{xw} і її витрат G_x , на що може впливати тиск холодоагенту в холодильнику для води, витрати молока, що надходить на охолодження. В якості керуючої дії в контурі стабілізації температури холодного молока можна взяти витрати холодної води на охолодження молока G_x .

Інформаційно-параметричні схеми секцій пастеризатора як об'єкти керування за пастеризатором, – рекуператором і охолоджувачем представлені на рис. 2, де зліва показаний керуючий параметр, зверху – вхідні параметри і дії збурень, а з правого боку – параметри керування.

Результати дослідження та їх обговорення. За створення математичної моделі пастеризатора приймемо допущення, що втрати тепла з поверхні об'єкта в навколишнє середовище незначні і складають 5% в порівнянні з тепловими потоками, які переходять від теплоносія до

продукту. Статичні характеристики секцій пастеризатора можна отримати склавши системи балансових рівнянь для теплових потоків камер окремих секцій, які представлені на рис. 3.

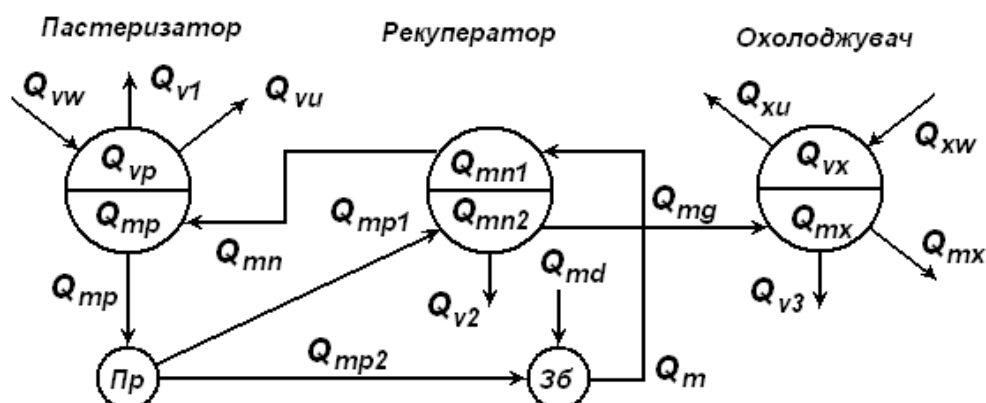


Рис. 3. Схема теплових потоків в пастеризаторі

В схемі вказані теплові потоки (Вт): Q_{vw} і Q_{vu} – гарячої води на вході і виході секції пастеризації, Q_{xw} і Q_{xu} – холодної води на вході і виході секції охолодження молока, Q_{v1} , Q_{v2} і Q_{v3} – втрат тепла за секціями пастеризації, рекуперації і охолодження, які рівні відповідно: $0,05Q_{p1}$, $0,05Q_{p2}$ і $0,05Q_{p3}$ – потоків тепла, які передаються через стінку теплообмінників від теплоносія до продукту в кожній із секцій, Q_{mp} , Q_{mp1} і Q_{mp2} – потоків тепла пастеризованого молока загального, на секцію рекуперації і на рециркуляцію для підігріву холодного молока з ферми. Q_{md} , Q_m , Q_{mn} , Q_{mg} , Q_{mx} – потоки тепла з молоком на вході збірника, після збірника, підігрітого в рекуператорі, охолодженого в ньому і охолодженого в охолоджувачі молока. Також враховується кількість теплоти (Q_{vp} , Q_{mpa} , Q_{mn2} , Q_{mn1} , Q_{mx} , Q_{vx}) гарячої води, пастеризованого молока, гарячого і підігрітого молока в рекуператорі, охолодженого молока і холодної води, Дж.

Молоко, що йде на рециркуляцію залежить від коефіцієнта рециркуляції K_v .

Виходячи зі схеми, складено статичні балансові рівняння теплових потоків для теплоносія і продукту для секцій:

- пастеризації:

$$Q_{vw} - Q_{p1} - Q_{vu} - 0,05Q_{p1} = 0, \quad Q_{mn} + Q_{p1} - Q_{mp} = 0; \quad (1)$$

- рекуперації:

$$Q_{mp1} - Q_{p2} - Q_{mg} - 0,05Q_{p2} = 0, \quad Q_m + Q_{p2} - Q_{mn} = 0; \quad (2)$$

- охолодження:

$$Q_{mg} - Q_{p3} - Q_{mx} - 0,05Q_{p3} = 0, \quad Q_{xw} + Q_{p3} - Q_{xu} = 0. \quad (3)$$

Баланс тепла в перемикачі рециркуляції (Пр) визначається з урахуванням коефіцієнту рециркуляції K_v .

$$Q_{mp} - Q_{mp1} - Q_{mp2} = 0 \quad \text{де} \quad Q_{mp2} = K_v Q_{mp}, \quad Q_{mp1} = (1 - K_v) Q_{mp}, \quad (4)$$

а баланс тепла в збірнику молока (Зб) складе:

$$Q_{mp2} + Q_{md} - Q_m = 0.$$

Значення окремих потоків тепла Q_{vw} , Q_{vu} , Q_{mn} , Q_{mp} (Вт) для секції пастеризації будуть представлені як добуток об'ємних витрат, густини, теплоємності і температури потоку:

$$Q_{p1} = k_p \cdot F_p \cdot \Delta t_p, \quad \text{де} \quad \Delta t_p = 0.5 (t_{vw} + t_{vu} - t_{mn} - t_{mp}). \quad (5)$$

Середня різниця температур між водою і молоком для теплообмінника з протитоком може рахуватися як середньологарифмічна, де велика і мала різниця температур на пастеризаторі Δt_{pb} і Δt_{pm} рахується на виході і вході теплоносія (гарячої води):

$$\Delta t_{pb} = t_{vu} - t_{mp}, \quad \Delta t_{pm} = t_{vw} - t_{mn}. \quad (6)$$

Для секції рекуперації:

$$Q_m = V_{md} \cdot r_m \cdot C_m \cdot t_{md} + K_v \cdot Q_{mp}; \quad Q_{mg} = (1 - K_v) \cdot V_m \cdot r_m \cdot C_m \cdot t_{mg}; \quad (7)$$

$$Q_{p2} = k_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n, \quad \text{де} \quad \Delta t_n = 0.5 (t_{mp} + t_{mg} - t_{mn} - t_m). \quad (8)$$

Для секції охолодження:

$$Q_{xw} = V_x \cdot r_x \cdot C_v \cdot t_{xw}; \quad Q_{xu} = V_x \cdot r_x \cdot C_v \cdot t_{xu}; \quad (9)$$

$$Q_{mx} = (1 - K_v) \cdot V_m \cdot r_m \cdot C_m \cdot t_{mx}; \quad (10)$$

$$Q_{p3} = k_x \cdot F_x \cdot \Delta t_x, \quad \text{де} \quad \Delta t_x = 0.5 (t_{mg} + t_{mx} - t_{xw} - t_{xu}). \quad (11)$$

Враховуючи, що $G = V \cdot \rho$, для збірника холодного молока складемо баланс за масою молока:

$$G_m = G_{mp1} + G_{md} = K_v G_m + G_{md} \quad \text{звідки} \quad G_m = \frac{G_{md}}{1 - K_v}. \quad (12)$$

Баланс за теплом буде таким:

$$G_m \cdot C_m \cdot t_m = G_{mp1} \cdot C_m \cdot t_{mp} + G_{md} \cdot C_m \cdot t_{md}. \quad (13)$$

Якщо вважати теплоємність молока незмінною величиною, то отримаємо:

$$t_m = (1 - K_v) t_{md} + K_v \cdot t_{mp}. \quad (14)$$

Кількість тепла (Дж) в окремих зонах секцій пастеризатора Q_{vp} , Q_{mpa} , Q_{mn2} , Q_{mn1} , Q_{vk} , Q_{mk} можна порахувати як добуток: об'єму секції, густини, теплоємності і середнього арифметичного значення температури між потоками.

Підставляючи рівняння окремих теплових потоків в балансові рівняння і диференціюючи за вихідними температурами теплоносія і продукту кожної секції пастеризатора, отримаємо систему із шести диференціальних рівнянь, які описують динаміку теплообміну пастеризатора:

- в секції пастеризації:

$$0.5 V_{vp} r_v C_v \frac{dt_{vu}}{d\tau} = G_v C_v (t_{vw} - t_{vu}) - (1.05/2) k_p F_p (t_{vw} + t_{vu} - t_{mn} - t_{mp}); \quad (15)$$

$$0.5V_{mp}r_mC_m \frac{dt_{mp}}{d\tau} = G_m C_m (t_{mn} - t_{mp}) + 0.5k_p F_p (t_{vw} + t_{vu} - t_{mn} - t_{mp}); \quad (16)$$

- в секції рекуперації:

$$0.5V_{n2}r_mC_m \frac{dt_{mg}}{d\tau} = (1 - K_v) G_m C_m (t_{mp} - t_{mg}) - (1.05/2)k_n F_n (t_{mp} + t_{mg} - t_m - t_{mn}); \quad (17)$$

$$0.5V_{n1}r_mC_m \frac{dt_{mn}}{d\tau} = C_m (K_v G_m t_{mp} + G_{md} t_{md} - G_m t_{mn}) + 0.5k_n F_n (t_{mp} + t_{mg} - t_m - t_{mn}); \quad (18)$$

- в секції охолодження:

$$0.5V_{mx}r_mC_m \frac{dt_{mx}}{d\tau} = (1 - K_v) G_m C_m (t_{mg} - t_{mx}) - (1.05/2)k_x F_x (t_{mg} + t_{mx} - t_{xv} - t_{xu}); \quad (19)$$

$$0.5V_{vx}r_vC_v \frac{dt_{xu}}{d\tau} = G_x C_v (t_{xw} - t_{xu}) + 0.5k_x F_x (t_{mg} + t_{mx} - t_{xw} - t_{xu}). \quad (20)$$

В результаті проведення експериментальних і теоретичних досліджень отримано, що динамічна характеристика секції пастеризації за каналом «витрати гарячої води – температура пастеризованого молока» може бути виражена передатною функцією:

$$W(p) = \frac{K_n}{T \cdot p + 1} e^{-p\tau_3}, \quad (21)$$

де K_n – коефіцієнт передачі об'єкта, °C/(кг/с);

T – постійна часу об'єкта, с;

τ_3 – час запізнення, с.

Для знаходження параметрів передатної функції використаємо друге рівняння із системи рівнянь щодо зміни температури пастеризованого молока в часі t_{mp} , перетворивши його до виду:

$$\frac{0.5V_{mp}r_mC_m}{G_m C_m + 0.5k_p F_p} \frac{dt_{mp}}{d\tau} + t_{mp} = \frac{G_m C_m t_{mn} + 0.5k_p F_p (t_{vw} + t_{vu} - t_{mn})}{G_m C_m + 0.5k_p F_p}. \quad (22)$$

З цього рівняння можна знайти, що постійна часу об'єкту керування за каналом температури пастеризованого молока дорівнює:

$$T = \frac{0.5V_{mp}r_mC_m}{G_m C_m + 0.5k_p F_p}. \quad (23)$$

Температура пастеризованого молока, на якій вона стабілізується після збудження, дорівнює:

$$t_{cm} = \frac{G_m C_m t_{mn} + 0.5k_p F_p (t_{vw} + t_{vu} - t_{mn})}{G_m C_m + 0.5k_p F_p}. \quad (24)$$

Коефіцієнт передачі об'єкту знайдемо, виходячи із балансу тепла в статичному режимі без врахування втрат тепла в навколишнє середовище для секції пастеризації:

$$G_m \cdot C_m \cdot (1 - \varepsilon) (t_{mp} - t_{mn}) = G_v \cdot C_v \cdot (t_{vw} - t_{vu}), \quad (25)$$

де ε – коефіцієнт регенерації тепла секції пастеризації.

Перетворимо рівняння до виду статичної характеристики нагрівальної частини пристрою:

$$t_{mp} = t_{mn} + \frac{C_v \cdot (t_{vw} - t_{vu})}{G_m \cdot C_m \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot G_v. \quad (26)$$

Таким чином коефіцієнт передачі об'єкту дорівнює:

$$K_n = \frac{C_v \cdot (t_{vw} - t_{vu})}{G_m \cdot C_m \cdot (1 - \varepsilon)}. \quad (27)$$

Час (транспортного) запізнення рахуємо, як час проходження гарячої води від регулюючого органу до секції пастеризації:

$$\tau_3 = \frac{V_{tr}}{2 \cdot V_v}, \quad (28)$$

де V_{tr} – об'єм труби, с:

Коефіцієнт теплопередачі секції пастеризації розраховується за формулою:

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (29)$$

де δ_c – товщина стінки пастеризатора, м,

λ_c – теплопровідність металу стінки пастеризатора, Вт/м град;

α_1 і α_2 – коефіцієнти тепловіддачі від гарячої води до стінки і від стінки до молока, Вт/м² град.

Для знаходження масових витрат потоків молока за секціями пастеризатора необхідно знати густину молока, яка залежна від температури.

Дані щодо густини молока знайдемо у довідниках [1, 2].

1. Залежність густини молока від температури

Температура, °C	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
Густина, кг/м ³	1033	1032	1031	1029	1025	1021	1016.6	1011	1006	999.6

В результаті розрахунків в середовищі MathCad за методом найменших квадратів отримаємо з похибкою $\delta_{tm} = 0.177$ кг/м³ рівняння залежності густини молока від температури для температури від 5 до 80 °C:

$$\rho_m = 1034.83 - 0.24004 \cdot t - 2.4935 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$$

Далі розрахуємо коефіцієнти передатної функції пастеризатора. Розрахунки виконуємо в середовищі пакету MathCad за формулами математичної моделі. Результати розрахунків наведені у табл. 2.

Таким чином передатна функція пастеризатора за каналом регулювання температури молока матиме вигляд:

$$W(p) = \frac{374.8}{159 \cdot p + 1} \cdot e^{-6.8p}. \quad (30)$$

2. Результати розрахунків математичної моделі

Витрати молока, м ³ /год	1
Витрати гарячої води, м ³ /год	3
Ширина проточної частини пластин, м	0,45
Довжина проточної частини пластин, м	0,45
Відстань між пластинами, м	0,004
Еквівалентний діаметр каналу, м ³	0,00793
Об'єм молока і води в пастеризаторі, м ³	0,15
Поверхня теплопередачі в пастеризаторі, м ²	2,24
Товщина пластин, м	0,001
Температура молока на вході пастеризатора, °С	60
Температура молока на виході пастеризатора, °С	76
Температура води на вході пастеризатора, °С	95
Температура води на виході пастеризатора, °С	80
Критерій Прандля	3,86
Критерій Рейнольдса для води	10640,788
Критерій Рейнольдса для молока	2224,8
Критерій Нуссельта для води	94,8
Критерій Нуссельта для молока	17,87
Коефіцієнт теплопровідності	1067,16

Висновки і перспективи подальших досліджень. Створено структурну схему пастеризатора молока і на основі дослідження розроблено математичну модель пастеризатора, яка складається із системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку процесу теплообміну у секціях. Зазначена модель дозволить розробити алгоритми керування температурним режимом для збільшення продуктивності пастеризатора.

Список використаних джерел

1. Брусиловский, Л. П. Автоматизация технологических процессов в молочной промышленности [Текст] / Л. П. Брусиловский, А. Я. Вайнберг. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 344 с.
2. Кук, Г. А. Пастеризация молока [Текст] / Г. А. Кук – М.: Пищепромиздат, 1951. – 240 с.
3. Єресько, Г. О. Технологічне обладнання молочних виробництв [Текст] / Г. О. Єресько, М. М. Шинкарик, В. Я. Ворожук– К.: Фірма „ІНКОС”, центр навчальної літератури, 2007. – 344 с.
4. Лисенко, В. Інтенсифікація та моделювання технологічних об'єктів [Текст] / В. Лисенко, Є. Чернишенко, В. Решетюк, В. Мірошник, Н. Заєць, І. Цигульов. – К.: АграрМедіаГруп, 2016. – 476 с.

References

1. Brusilovskiy, L.P., Vaynberg, A.Ya. (1978). Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v molochnoy promyshlennosti [Automation of technological processes in the dairy industry]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 344.
2. Kuk, G.A. (1951). Pasterizatsiya moloka [Milk pasteurization] . Moscow: Pishchepromizdat, 240.

3. Eres'ko, G.O., Shinkarik , M.M., Voroshchuk ,V.Ya. (2007). Tekhnologichne obladnannya molochnikh virobnitstv [Technological equipment of dairy production]. Kyiv: Firma „INKOS”, tsentr navchal'noї literaturi, 344.

4. Lisenko,V., Chernishenko, E., Reshetyuk, V., Miroshnik, V., Zaets', N., Tsigul'ov, I. (2016). Intensifikatsiya ta modelyuvannya tekhnologichnikh ob'ektiv [Intensification and modeling of technological objects]. Kyiv: AgrarMediaGrup, 476.

ПАСТЕРИЗАТОР КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ ПО КАНАЛАХ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОКА

В. А. Мирошник, Т. И. Лендел

Аннотация. Создана структурная схема пастеризатора молока и на основе ее исследования разработаны способы управления температурой и параметрические схемы секций: рекуперации, пастеризации и охлаждения пластинчатого пастеризатора молока. Разработана математическая модель пастеризатора, состоящая из системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику процесса теплообмена в секциях. С помощью модели в среде MathCad выполнены расчеты коэффициентов передаточной функции объекта по каналу регулирования температуры в секциях. При создании математической модели пастеризатора принято, что потери тепла с поверхности объекта в окружающую среду незначительны и составляют 5% по сравнению с тепловыми потоками, которые переходят от теплоносителя к продукту. Статические характеристики секций пастеризатора получены благодаря составленной системе балансовых уравнений для тепловых потоков камер отдельных секций. В результате проведения экспериментальных и теоретических исследований получена динамическая характеристика секции пастеризации по каналу «расход горячей воды – температура пастеризованного молока». Указанная модель позволит разработать алгоритмы управления температурным режимом для увеличения производительности пастеризатора.

Ключевые слова: математическая модель, пластинчатый пастеризатор, передаточная функция, температурный режим

ASTEURIZER AS OBJECT OF CONTROL ON CHANNELS OF HEATING AND COOLING MILK

V. Miroshnik, T. Lendiel

Annotation. Created block diagram pasteurizers and based its study developed ways to control temperature and parametric diagrams sections: recovery, pasteurization and cooling plate pasteurizers. The mathematical model pasteurizer, which consists of a system of differential equations describing the dynamics of the process heat in sections. Using the model in environment MathCad calculations of the coefficients of the transfer function of the object through the channel temperature control in sections. When creating

a mathematical model pasteurizer accepted that heat loss from the surface of the object to the environment and make minor 5% compared to the heat flow coming from the coolant to the product. Static characteristics sections pasteurizer received back system of balance equations for heat flow chambers separate sections. As a result of experimental and theoretical studies obtained dynamic characteristics of pasteurization used by the channel "discharge of hot water - temperature pasteurized milk." This model will develop control algorithms temperature conditions to increase productivity pasteurizer.

Keywords: *mathematical model, plate pasteurizer, transfer function, temperature control*

УДК 621.313

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ НА БАЗІ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

М. М. ЗАБЛОДСЬКИЙ, доктор технічних наук, професор
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

П. Б. КЛЕНДІЙ, кандидат технічних наук, доцент
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

Г. Я. КЛЕНДІЙ, старший викладач
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

О. П. ДУДАР, інженер
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний коледж»
E-mail: pklen_@i.ua⁸

Анотація. *В статті розглянуто питання впливу температурних режимів біогазових установок на вихід біогазу та часу зброджування. Для створення оптимального температурного режиму пропонується використання поліфункціонального електромеханічного перетворювача, який буде виконувати роль джерела теплової енергії та насоса, що дозволить не спалювати вироблений біогаз і замінити електродвигун і насос одним пристроєм.*

Ключові слова: *біогазова установка, температурні режими, поліфункціональний електромеханічний перетворювач*

Актуальність. Біогазові установки забезпечують переробку органічних відходів (стоків тваринницьких виробництв і рослинництва) і осадів стічних вод в біогаз (горючий газ). Поряд з біогазом біогазові установки виробляють

⁸ © М. М. Заблудський, П. Б. Клендій,
Г. Я. Клендій, О. П. Дудар, 2017

a mathematical model pasteurizer accepted that heat loss from the surface of the object to the environment and make minor 5% compared to the heat flow coming from the coolant to the product. Static characteristics sections pasteurizer received back system of balance equations for heat flow chambers separate sections. As a result of experimental and theoretical studies obtained dynamic characteristics of pasteurization used by the channel "discharge of hot water - temperature pasteurized milk." This model will develop control algorithms temperature conditions to increase productivity pasteurizer.

Keywords: *mathematical model, plate pasteurizer, transfer function, temperature control*

УДК 621.313

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ НА БАЗІ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

М. М. ЗАБЛОДСЬКИЙ, доктор технічних наук, професор
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

П. Б. КЛЕНДІЙ, кандидат технічних наук, доцент
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

Г. Я. КЛЕНДІЙ, старший викладач
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

О. П. ДУДАР, інженер
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний коледж»
E-mail: pklen_@i.ua⁸

Анотація. *В статті розглянуто питання впливу температурних режимів біогазових установок на вихід біогазу та часу зброджування. Для створення оптимального температурного режиму пропонується використання поліфункціонального електромеханічного перетворювача, який буде виконувати роль джерела теплової енергії та насоса, що дозволить не спалювати вироблений біогаз і замінити електродвигун і насос одним пристроєм.*

Ключові слова: *біогазова установка, температурні режими, поліфункціональний електромеханічний перетворювач*

Актуальність. Біогазові установки забезпечують переробку органічних відходів (стоків тваринницьких виробництв і рослинництва) і осадів стічних вод в біогаз (горючий газ). Поряд з біогазом біогазові установки виробляють

⁸ © М. М. Заблодський, П. Б. Клендій,
Г. Я. Клендій, О. П. Дудар, 2017

високоєфективне дороге рідке органічне добриво [1]. Метанові бактерії проявляють свою життєдіяльність за температури 0-70 ° С.

Швидкість процесу бродіння у значній мірі залежить від температури. Принципово важливою є закономірність: чим вище температура, тим швидше відбувається розкладання і тим більший обсяг виробництва газу.

Для забезпечення найбільшого виходу біогазу та отримання якісних, позбавлених патогенної мікрофлори, гельмінтів, їх яєць і насіння бур'янів, органічних добрив в біогазовій установці повинен підтримуватися оптимальний температурний режим – найважливіший фактор процесу зброджування (рис.1).

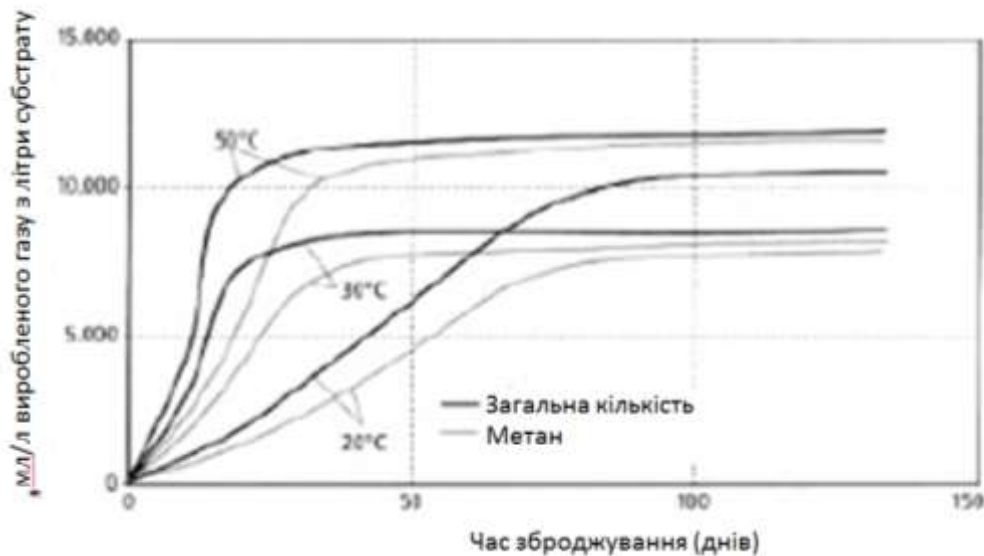


Рис. 1. Залежність виходу біогазу та часу зброджування від температури

З урахуванням оптимізації процесу переробки органічних відходів для отримання біогазу виділяють три температурні режими:

- 1) психрофільний – до 20-25 ° С;
- 2) мезофільний – 25-40 ° С;
- 3) термофільний – понад 40 ° С.

Мезофільний і термофільний процеси вимагають наявності зовнішнього джерела тепла і суворого контролю за температурою.

Вимоги до допустимих меж коливання температури для оптимального газоутворення тим жорсткіші, чим вище температура процесу зброджування: за психрофільного температурного режимі – ± 2 ° С на годину; мезофільного – ± 1 ° С на годину; термофільного – $\pm 0,5$ ° С на годину.

Оптимальна температура метаногенеза залежить від виду перероблюваної установкою сировини – органічних відходів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Енергія, потрібна для процесу бродіння, витрачається на підігрів субстрату від температури рідкого гною, що подається до реактора, до температури бродіння, а також на компенсацію втрат, викликаних радіацією і теплопровідністю.

Теплота, яка потрібна для підігріву маси, що завантажується в реактор, до температури процесу залежить від маси субстрату, його середньої питомої теплоємності, різниці між температурою процесу і температурою, що завантажується.

У всіх випадках застосування ефективної теплоізоляції може знизити на кілька відсотків потребу в енергії втрат тепла теплопередачею, решта теплоти компенсується за рахунок використання стороннього джерела енергії:

- частину утвореного біогазу можна безпосередньо спалюватися в газовому котлі для підігріву води, що пропускається через теплообмінник;

- використання електричного котла для обігріву реактора [2,3].

Мета дослідження – розробка енергоефективної системи теплозабезпечення біогазових установок.

Матеріали і методи дослідження. Теплозабезпечення біогазових установок можна здійснити на базі поліфункціонального електро-механічного перетворювача, коли один пристрій виконує роль джерела механічної і теплової енергії, тобто підігріває та прокачує воду через теплообмінник біогазової установки.

Ефект енергозбереження для таких систем формується шляхом використання дисипативної складової енергії, редукції частоти обертання і кратного посилення моменту за рахунок модульного формування механічної характеристики [4].

Ефективність структури ПЕМП, як теплообмінної системи з внутрішніми джерелами теплової енергії, у разі виконання всіх призначених для перетворювача функцій досягається за максимального перекриття на температурно-ентальпійній площині складових кривих «холодних» і «гарячих» потоків і їх економічно доцільному зближенні (пінч-принцип) [5].

Результати дослідження та їх обговорення. Дольовий розподіл електромагнітної потужності за двома потоками корисної потужності здійснюється відповідно до величини поточного ковзання, яка виходячи зі співвідношення електромагнітних моментів двигунного (ДМ) і гальмівного (ТМ) модулів встановлюється на рівні, який забезпечує необхідну для даного технологічного режиму корисну механічну і теплову потужність:

$$W_2^B = W_{2TP} + W_{2Mex.} = \frac{m_1 \cdot R'_2(1)C_1^2}{\sqrt{(t_g - t_c)}} \cdot \left[\int_{t_c}^{t_g} (I_{2Д}'')^2 dt \right]^{0,75} \times$$

$$\times \left[\sqrt{\frac{1}{H} \int_{t_c}^{t_g} (M_{ЭМП} - M_C) dt} + \frac{1 - \frac{1}{H} \int_{t_c}^{t_g} (M_{ЭМП} - M_C) dt}{\sqrt{\frac{1}{H} \int_{t_c}^{t_g} (M_{ЭМП} - M_C) dt}} \right], \quad (1)$$

де H – інерційна постійна ротора ПЕМП;

$(t_g - t_c)$ – період часу від моменту початку руху ротора до усталеного значення швидкості;

I''_2 – струм головного кола Г-подібної схеми заміщення (в.о.);
 $R'_2(1)$ – зведений активний опір масивного ротора у в.о. для ДМ за $S = 1$ і $I''_2 = I_{ном} = 1$;

$M_{EMP} = (MEM(ДМ) \pm MEM(ТМ))$ - результуючий електромагнітний момент.

Закон зміни ковзання в період $(t_c - t_g)$:

$$s_D = \frac{1}{H} \int_{t_c}^{t_g} (M_{EMP} - M_C) dt, \quad (2)$$

де H – інерційна постійна ротора ПЭМП;

$M_{EMP} = M_{ЭМ.Д} \pm M_{ЭМ.Т}$ – результуючий електромагнітний момент ДМ и ТМ. Знак «+» відповідає узгодженому обертанню ДМ и ТМ.

Значення ковзання для ТМ визначається за виразом:

$$s_T = \frac{p_T}{p_D} (1 - s_D) \pm 1, \quad (3)$$

де p_D, p_T – число пар полюсів відповідно ДМ и ТМ.

Знак «+» відповідає зустрічному, а «-» – узгодженому обертанню магнітних полів ДМ и ТМ.

Крім того, вихідна енергія ТМ може формуватися за трьома варіантами:

а) у разі зустрічного обертання магнітних полів ТМ отримує електричну енергію з мережі і механічну від ДМ. В результаті вся отримана енергія повністю дисипує в тепло;

б) у разі приголосного обертання магнітних полів і $p_T = p_D, M_D > M_T$ електромагнітна енергія в проміжку ТМ перетвориться в теплову і механічну енергію ротора;

в) у разі узгодженого обертання магнітних полів і $p_T > p_D, M_D \gg M_T + M_C$ ТМ працює в генераторному режимі з рекуперацією електричної енергії в мережу і частковим виділенням тепла в роторі.

За нерухомого ротора відведення тепла і передача його в периферійні об'єми матеріалу здійснюється за допомогою теплопровідності відповідно до закону Фур'є

$$q_\lambda = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (4)$$

е q_λ - питомий тепловий потік;

λ - коефіцієнт теплопровідності.

Обертання ротора (стан Б) створює переважні умови для вимушеного теплообміну відповідно до закону Ньютона:

$$q_\alpha = \alpha \cdot \Delta T, \quad (5)$$

де $\alpha = \frac{1}{t_B - t_C} \int_{t_c}^{t_g} \alpha(t) dt$ – середній коефіцієнт тепловіддачі за

теплообміну впродовж періоду розгону ротора.

Тривалість роботи ПЕМП в режимі короткого замикання достатня для отримання і передачі через теплообмінну систему ПЕМП такої

кількості теплової енергії, яка здатна здійснити нагрів води до 80°C і не перевищує часу настання граничного перевищення температури електричної ізоляції ПЕМП.

Висновки і перспективи. Використання поліфункціональних електромеханічних перетворювачів в біогазових установках дозволить :

- забезпечити необхідний температурний режим;
- підвищити енергоефективність.

Список використаних джерел

1. Биогазовые установки. Практическое пособие. [Електронний ресурс] / Режим доспуга: http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas_plants_Practics.pdf.
2. Павліський, В. М. Удосконалення системи експлуатації електротермічного обладнання біогазових установок / В. М. Павліський, В. Г. Подобайло, М. В. Потапенко // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – Т.13. – №3. – С. 144 – 148.
3. Подобайло, В. Г. Підвищення енергоефективності біогазових установок / В. Г. Подобайло, М. В. Потапенко, Н. П. Семенова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2014. – Вип. 153. – С. 93-95.
4. Заблодский, Н. Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения: Монография / Н. Н.Заблодский. – Алчевск: ДонГТУ, 2008. – 295 с.
5. Заблодский, Н. Н. Модифицированный метод эквивалентных тепловых схем для анализа процессов в электротепломеханических преобразователях / Н. Н. Заблодский // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського: наукові праці КПДУ. – Кременчук, 2007. – Вип. 3/2007 (44)Ч. 1. – С. 121-124.

References

1. Biogazovyye ustanovki. Prakticheskoye posobiye [Biogas installation. Practical textbook]. Available at: http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas_plants_Practics.pdf.
2. Pavliskyi, V. M. Podobailo, V. H., Potapenko, M. V. (2008). Udoshkonalennia systemy ekspluatatsii elektrotermichnoho obladdannia biohazovykh ustanovok [Improving the operation of biogas plants electrothermal equipment]. Visnyk Ternopil'skoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu, 13 (3), 144 – 148.
3. Podobailo, V. H., Potapenko, M. V., Semenova, N. P. (2014). Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti biohazovykh ustanovok [Improving the energy efficiency of biogas plants]. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu sil'skoho hospodarstva imeni Petra Vasylenska, 153, 93-95.
4. Zablodskiy, N. N. (2008). Polifunktsional'nyye elektromekhanicheskiy preobrazovateli tekhnologicheskogo naznacheniya: Monografiya [Polyfunctional electromechanical converter technological purpose: monograph]. Alchevsk, DonGTU, 295.
5. Zablodskiy, N. N. (2007). Modifitsirovannyi metod ekvivalentnykh teplovykh skhem dlya analiza protsessov v elektroteplomekhanicheskikh preobrazovatelyakh [Modify method equivalent thermal circuits for analysis of processes in electromechanical converter]. Visnyk Kremenchuts'kogo derzhavnogo politekhnichnoho universitetu imeni Mikhayla Ostrograds'kogo: Naukovi pratsi KPDU. Kremenchuk, 3/2007 (44), Ch. 1, 121-124.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Н. Н. Заблодский, П. Б. Клендий, Г. Я. Клендий, О. П. Дудар

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы влияния температурных режимов биогазовых установок на выход биогаза и времени сбраживания. Для создания оптимального температурного режима предлагается использование полифункционального электромеханического преобразователя, который будет выполнять роль источника тепловой энергии и насоса, что позволит не сжигать произведенный биогаз и заменить электродвигатель и насос одним устройством.

Ключевые слова: биогазовая установка, температурные режимы, поли функциональный электромеханический преобразователь

OPTIMIZATION OF HEAT MODE OF BIOGAS ON THE BASIS OF POLYFUNCTIONAL ELECTROMECHANICAL CONVERTER

N. N. Zablodsky, P. B. Klendiy, H. Y. Klendiy, O. P. Dudar

Abstract. In the article the question of influence over temperature modes of biogas plants for biogas yield and fermentation time is considered. To create the optimal temperature mode is offered the use of polyfunctional electromechanical converter, which will serve as a source of heat energy and a pump, that allow don't burn the produced biogas and replace the electric motor and pump on one device.

Keywords: biogas plants, temperature models, polyfunctional electromechanical converter

ОЦІНКА ІМОВІРНІСНОЇ НЕСИМЕТРІЇ СТРУМІВ І НАПРУГ НА ОСНОВІ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕННЯ КОМУНАЛЬНО-ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ

О. О. МІРОШНИК, доктор технічних наук, доцент
**Харківський національний технічний університет
сільського господарства ім. П. Василенка**
E-mail: Miroshnyk@rambler.ru

Анотація. Наведено теоретичні обґрунтування та рекомендації щодо практичного застосування методики розрахунку імовірнісної несиметрії в чотирипровідних мережах 0,38/0,22 кВ на основі використання графіків навантаження за тривалістю на підстанції. Вирішено задачу оцінки імовірнісної оцінки несиметрії за умови кутової симетрії струмів і пофазної рівності середніх значень коефіцієнтів потужності. Наведено графіки залежності симетричних складових струмів в чотирипровідних мережах 0,38/0,22 кВ, які показали, що похибка за апроксимації графіків комунально-побутових споживачів не перевищує 5%. Наведено сімейство кривих, що показують характер зміни коефіцієнтів заповнення графіків від частки силових споживачів в загальному складі навантаження для споживчих підстанцій з різною встановленою потужністю. Визначені залежності показників ступеня апроксимуючої функції для всіх видів графіків навантаження споживчих трансформаторних підстанцій 10/0,4 кВ. Виконана перевірка інтеграла імовірності на основі результатів статистичної обробки численних безпосередніх вимірювань фазних струмів на вводах трансформаторів споживчих підстанцій 10/0,4 кВ. Виконано статистичний аналіз даних вимірювань в сільських розподільних мережах 0,38/0,22 кВ, який показав, що розподіл струмів в фазах підпорядковується нормальному закону.

Ключові слова: несиметрія струмів, втрати електричної енергії, мережа 0,38/0,22 кВ, графіки навантаження

Актуальність. Ефективність використання електричної енергії визначається створенням таких умов її споживання, за яких забезпечується необхідна якість електричної енергії, що впливає на додаткові втрати в мережі [1, 2]. Актуальність проблеми покращення якості та зменшення додаткових втрат при цьому особливо зростає в сільських електричних мережах, напругою 0,38/0,22 кВ. Несиметрія струмів і напруг у мережах приводить до збільшення у вузлах навантаження відхилення напруги від допустимого значення, скороченню терміну служби електродвигунів агропромислового комплексу та іншим негативним явищам у мережах і приймачах електроенергії. Тому знання

величини несиметрії в мережі дозволяє уточнити рівень втрат електроенергії та застосувати відповідні заходи щодо їх зниження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Численні дослідження, присвячені аналізу режимів роботи сільських мереж напругою до 0,38/0,22 кВ [3, 4], показали, що несиметрія струмів обумовлена роботою комунально-побутового навантаження, основну частину якого становлять нерівномірно розподілені за фазами однофазні електроприймачі, що мають випадковий характер включення.

Розрізняють два види несиметрії: систематичну та імовірнісну або випадкову. Систематична несиметрія обумовлена постійним в часі нерівномірним навантаженням фаз, імовірнісна несиметрія відповідає навантаженням, які змінюються в часі випадково [3]. За розгляду питань імовірнісної несиметрії випадковими величинами є струми у фазах трифазної мережі. Оскільки втрати напруги є лінійними функціями фазних струмів, то й закон розподілу буде таким же, як і для струмів.

Мета дослідження – виконати оцінку імовірнісної несиметрії в розподільних мережах 0,38/0,22 кВ на основі використання графіків навантаження за тривалістю на підстанції.

Матеріали і методи дослідження. Зазвичай на практиці криві розподілу ймовірностей навантаження (графіки густини ймовірностей) невідомі. Однак можуть бути відомі графіки навантаження, виражені потужностями або, що значно частіше зустрічається за експлуатації трансформаторних підстанцій, струмами. Між графіками густини ймовірностей навантаження та графіками навантаження, перебудованими за тривалістю, існує проста залежність. Якщо рівняння графіка навантаження за тривалістю відоме, може бути легко отримане рівняння графіка щільності ймовірностей навантаження та навпаки.

Нехай графік навантаження за тривалістю заданий рівнянням

$$t = f(I) . \quad (1)$$

Імовірність появи струму I дорівнює:

$$P(I) = dt = -t' I dI . \quad (2)$$

З іншого боку, розглядаючи рівняння графіка густини ймовірностей

$$P = f(I) , \quad (3)$$

видно, що

$$P(I) = f(I) dI . \quad (4)$$

Порівнюючи (2) і (4), одержимо співвідношення:

$$f(I) = -t' I . \quad (5)$$

Вираз (5) встановлює зв'язок між графіком густини ймовірностей і графіком навантаження за тривалістю.

Розглянемо методику вирішення задачі імовірнісної оцінки несиметрії в трифазній четирипровідній мережі. Нехай задані криві розподілу (графіки густини ймовірностей) трьох незалежних випадкових величин своїми рівняннями:

$$P_1 = f_1(\xi) , P_2 = f_2(\eta) , P_3 = f_3(\zeta) . \quad (6)$$

Значення ξ , η і ζ , прийняті випадковими величинами, змінюються в інтервалах:

$$a_1 \leq \xi \leq b_1, a_2 \leq \eta \leq b_2, a_3 \leq \zeta \leq b_3, \quad (7)$$

де $f_1 \xi$, $f_2 \eta$, $f_3 \zeta$ – безперервні функції.

Нехай дана деяка залежність (у вигляді нерівності) між величинами ξ , η і ζ :

$$F \xi, \eta, \zeta \leq M. \quad (8)$$

Потрібно знайти імовірнісну оцінку виконання цієї залежності:

$$P F \xi, \eta, \zeta \leq M, \quad (9)$$

де M – дійсна позитивна або негативна постійна.

Згідно [3] вираз (9) запишеться:

$$\begin{aligned} P F \xi, \eta, \zeta \leq M &= \\ &= \iiint_V f_1 \xi f_2 \eta f_3 \zeta d\xi d\eta d\zeta, \end{aligned} \quad (10)$$

причому область інтегрування являє собою перетин куба, що обмежений площинами

$$\xi = a_1, \xi = b_1, \eta = a_2, \eta = b_2, \zeta = a_3, \zeta = b_3,$$

з множиною точок простору $O\xi\eta\zeta$, обумовленою нерівністю:

$$F \xi, \eta, \zeta \leq M. \quad (11)$$

Ввівши у вираз (10) замість густини імовірностей $f_1 \xi$, $f_2 \eta$, $f_3 \zeta$ функції, що описують графіки навантажень за тривалістю $t_1 I_1$, $t_2 I_2$, $t_3 I_3$, одержимо:

$$\begin{aligned} P F I_1, I_2, I_3 \leq M &= \\ &= \iiint t_1' I_1 t_2' I_2 t_3' I_3 dI_1 dI_2 dI_3. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким чином, для вирішення даної задачі необхідно знати рівняння графіків навантаження за тривалістю та функцію $F I_1, I_2, \dots$, що визначає область інтегрування. На підстанціях, що не обслуговуються, графіки навантаження можуть бути отримані в результаті спеціальних вимірювань, а на підстанціях, що обслуговуються, вони будуються регулярно за показниками приладів обліку. Що стосується функції $F I_1, I_2, \dots$, тобто співвідношення між струмами, то вона визначається умовами поставленої задачі.

Перейдемо до вирішення задачі імовірнісної оцінки несиметрії за умови кутової симетрії струмів і пофазної рівності середніх значень коефіцієнтів потужності.

Позначимо навантаження трьох фаз через x , y і z ($I_{\min} = x$, $I_{cp} = y$, $I_{\max} = z$). Тоді відповідно до (2) запишемо:

$$dt x = -t' x dx,$$

$$dt \ y = -t' \ y \ dy, \quad (13)$$

$$dt \ z = -t' \ z \ dz.$$

Якщо розглядати ці диференціали як імовірності появи відповідних навантажень, то тривалість одночасної дії навантажень x , y і z буде дорівнювати:

$$dt \ x \ dt \ y \ dt \ z = -t' \ x \ t' \ y \ t' \ z \ dx dy dz. \quad (14)$$

Виконаємо оцінку нерівномірності навантажень через відносні різниці значень фазних струмів:

$$a = \frac{I_{cp} - I_{min}}{I_{max}} \quad b = \frac{I_{max} - I_{cp}}{I_{max}}, \quad (15)$$

де I_{max} , I_{cp} , I_{min} – відповідно діючі значення струмів максимально, середньо та мінімально навантаженої фази.

Несиметрія, викликана різними за величиною навантаженнями фаз, може визначатися завданням двох величин a та b за виразами:

$$\begin{aligned} y &= x + a, \\ z &= y + b. \end{aligned} \quad (16)$$

На рис. 1 показані графіки залежності симетричних складових струмів у чотирипровідній мережі 0,38/0,22 кВ від величин a і b . Тривалість несиметрії, що перевищує або дорівнює значенням a і b , є функцією цих значень. Позначимо її $S_{a,b}$. Вона являє собою імовірність того, що будуть виконані нерівності:

$$y - x \geq a \text{ і } z - y \geq b, \quad (17)$$

тобто

$$S_{a,b} = P \ y - x \geq a; z - y \geq b. \quad (18)$$

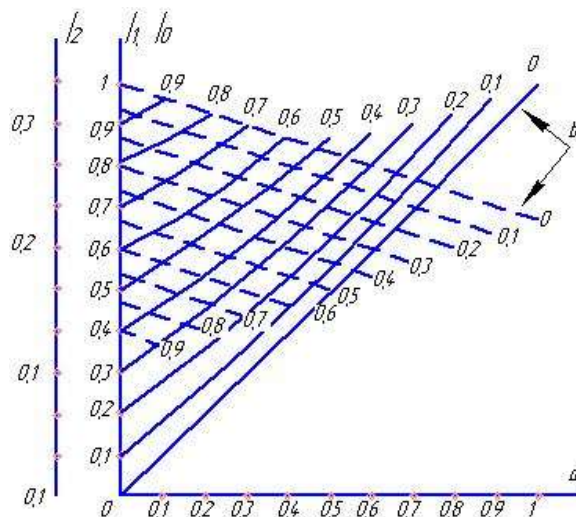


Рис. 1. Графіки залежності симетричних складових струмів у чотирипровідній мережі від величин a і b

Цю величину згідно з теоремою додавання імовірностей [5], одержимо потрійним інтегруванням (12) за областю V , яка обумовлена нерівностями:

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 1, \\ y - x \geq a, z - y \geq b, \end{aligned} \quad (19)$$

$$S_{a,b} = \iiint_V t' x t' y t' z dx dy dz. \quad (20)$$

Беручи до уваги (19), вираз (20) вирішує поставлену задачу. Розставивши межі інтегрування, одержимо остаточно:

$$\begin{aligned} P_{y-x \geq a; z-y \geq b} = \\ = \int_0^{1-a-b} t' x dx \int_{x+a}^{1-b} t' y dy \int_{y+b}^1 t' z dz. \end{aligned} \quad (21)$$

За виконання обчислень повинна бути дотримана умова:

$$a + b \leq 1. \quad (22)$$

Трипровідні відгалуження можуть розглядатися як окремий випадок, коли, наприклад, $z = 0$. При цьому необхідне здійснення умови

$$S_a = P_{y-x \geq a}. \quad (23)$$

Тобто, для вирішення задачі потрібно взяти подвійний інтеграл за областю D , що обумовлена в площині xy наступними умовами $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$, $x - y \geq a$:

$$S_a = \iint_D t' x t' y dx dy. \quad (24)$$

Розставивши межі інтегрування, одержимо:

$$S_a = 2 \int_a^1 dx \int_0^{x-a} t' x t' y dy. \quad (25)$$

Формула (25) вирішує дану задачу.

Результати дослідження та їх обговорення. Порівняльний аналіз методів апроксимації, що запропоновані різними авторами [5-7] показав, що для вирішення даної задачі найбільш прийнятною є функція апроксимації виду:

$$t = 1 - i^n, \quad (26)$$

де

$$n = \frac{1 - k_3}{k_3},$$

k_3 – коефіцієнт заповнення графіка.

Розрахунки показують, що похибка за апроксимації графіків комунально-побутових споживачів за допомогою виразу (25) не перевищує 5%.

Для випадків, коли $n = 1, 2, 3, \dots, r, r + 1$, інтеграл імовірності (21) обчислюється точно, якщо n – величина дробова, вираз інтегрується приблизно.

У якості апроксимуючої може бути також запропонована дрібно-лінійна функція виду:

$$i = \frac{d + et}{q + t}. \quad (27)$$

За відповідного вибору коефіцієнтів d і e , функція (27) задовольняє основним вимогам:

- 1) є спадаючою;
- 2) при $t = 0$, $i = 1$;
- 3) при $t = 1$, $i = i_{min}$;

4) площа криволінійної трапеції, що визначається рівнянням $i = f t$, дорівнює кількості спожитої електроенергії.

На рис. 2 наведене сімейство кривих [4, 5], що показують характер зміни коефіцієнтів заповнення графіків від частки силових споживачів у загальному складі навантаження $k_s = f P_c \%$ для споживчих підстанцій із установленою потужністю 0 – 50 кВт; 50 – 100 кВт і 100 – 300 кВт.

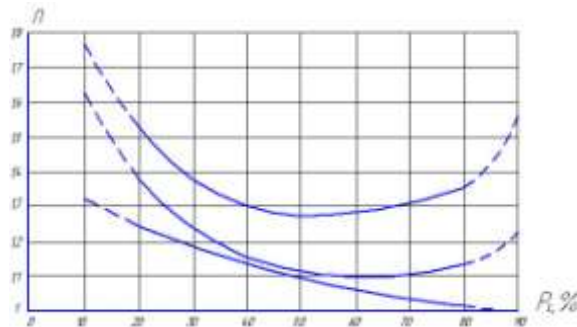


Рис. 2. Характер зміни коефіцієнтів заповнення графіків від частки силових споживачів у загальному складі навантаження $k_s = f P_c \%$

На основі наведених кривих обчислені залежності показників ступеня апроксимуючої функції (26) для всіх видів графіків навантаження споживчих підстанцій 10/0,4 кВ. Криві $n = f P_c \%$ показані на рис. 3.

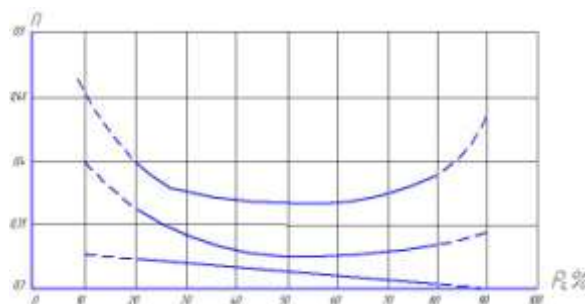


Рис. 3. Залежності показників ступеня апроксимуючої функції для всіх видів графіків навантаження споживчих підстанцій 10/0,4 кВ $n = f P_c \%$

Аналіз показує, що для всіх практично реальних випадків, коли до складу навантаження входять силові споживачі, показник ступеня перебуває в межах $1 \leq n \leq 2$.

Для випадків, коли силове навантаження відсутнє ($P_c = 0$), показник ступеня збільшується і для типового графіка із $P_c = 0$ наближається до 3.

Таким чином можна вважати, що для всього діапазону складу навантаження $0\% \leq P_c \leq 100\%$ будемо мати $3 \geq n \geq 1$.

Виходячи із установлених меж зміни n , обчислені значення інтеграла імовірності та побудовані криві $P_{y-x \geq a; z-y \geq b} = S_{a,b}$ для $n = 1, 2, 3$, наведені на рис. 4 – рис. 6.

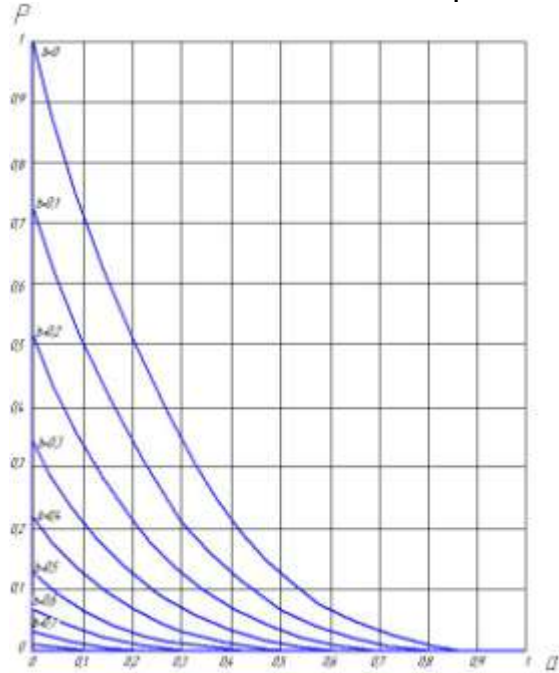


Рис. 4. Значення інтеграла імовірності для $n = 1$

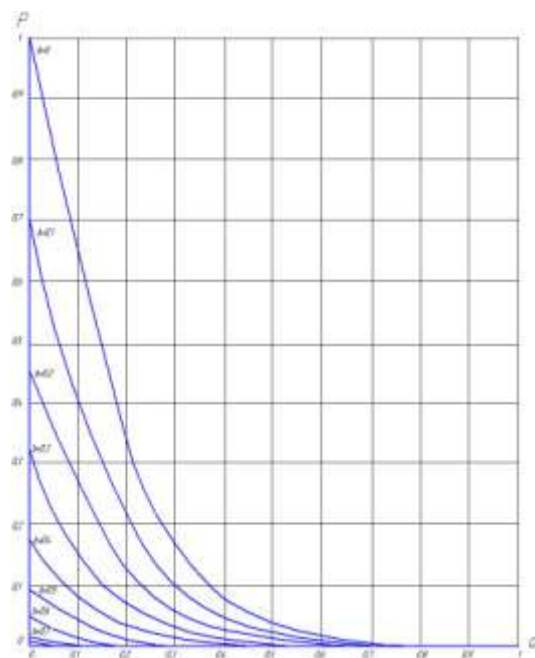


Рис. 5. Значення інтеграла імовірності для $n = 2$

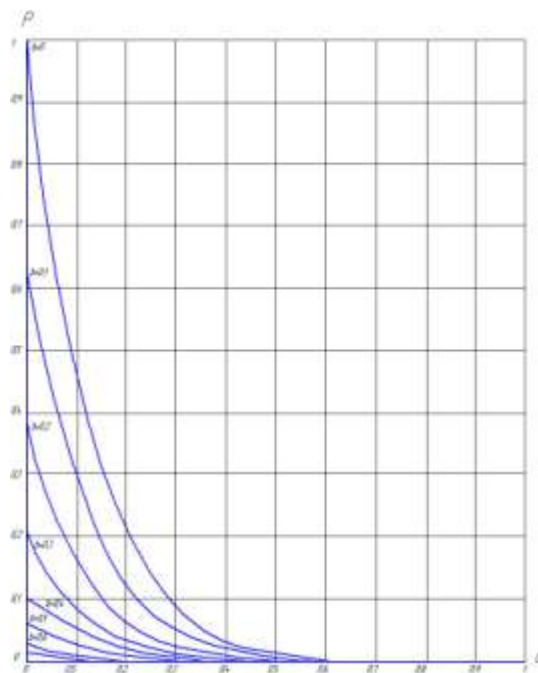


Рис. 6. Значення інтеграла імовірності для $n = 3$

Коефіцієнти заповнення графіків окремих видів навантаження перебувають у межах 0,60 – 0,85. До таких навантажень відносяться, наприклад, ферми із чотириразовим доїнням, пташники, інкубатори і ряд інших. Крім того, підстанції (фідери) живлять однофазні побутові навантаження та висвітлення, розподілені за фазами.

На підставі викладеного вище очевидно, що апроксимація графіків такого сумарного навантаження може бути виконана за допомогою функції з $n \leq 0,5$.

Обчислення інтеграла імовірності для чотирипровідної мережі з $n = 0,5$ пов'язане з відомими труднощами та може бути виконане лише приблизно.

Перевірка інтеграла імовірності проведена за результатами статистичної обробки численних безпосередніх вимірювань фазних струмів на виводах 0,38 кВ трансформаторів споживчих підстанцій 10/0,4 кВ.

На підставі обробки вимірювань побудовані статистичні криві:

$$P_{y-x \geq a; z-y \geq b} = S_{a,b}, \quad (28)$$

для $b = 0$ та $b = 0,2$, показані на рис. 7. Тут же нанесені імовірнісні криві (пунктир) для тих же значень при $n = 1, 2$, і 3.

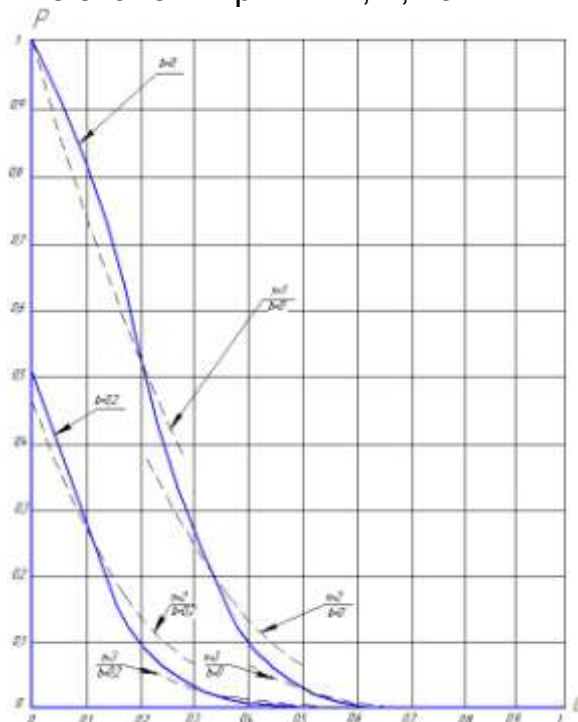


Рис. 7. Статистичні криві

Як можна бачити, характер статистичних кривих досить близький до теоретичних залежностей.

Статистичні криві умовно розділені на частини, у межах яких їх наближення до імовірнісних може вважатися задовільним.

Частка участі силових споживачів у загальному навантаженні підстанцій, на яких проводилися вимірювання, була різною, внаслідок чого коефіцієнти заповнення графіків також не були однаковими.

Різний склад навантаження на обстежених підстанціях привів до того, що, наприклад, статистичні криві для $b=0$ у верхній частині наближаються до теоретичних для $b=0$ при $n=1$, у середній – до $n=2$, а в нижній – до $n=3$.

Статистичний аналіз даних масових вимірювань в мережах 038/0,22 кВ показує, що розподіл струмів у фазах підкоряється нормальному закону. Виходячи із цього, може бути запропонований метод практичного розрахунку інтегральної імовірності несиметрії струмів у повнофазних елементах і ділянках чотирипровідної мережі, а також у трипровідних (дві фази та нуль) відгалуженнях від чотирипровідних мереж.

У загальному випадку інтеграл імовірності може бути записаний у вигляді:

$$P = \frac{1}{2\pi^{\frac{3}{2}} \prod_{i=1}^3 \sigma_i} \iiint_V e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{I_a^2}{\sigma_1} + \frac{I_b^2}{\sigma_2} + \frac{I_c^2}{\sigma_3} \right)} di_a di_b di_c. \quad (29)$$

Рішення інтеграла (29) представляє відомі труднощі. Перехід до сферичних координат дозволяє визначити межі інтегрування та після деяких допущень і перетворень одержати рішення.

Так, вважаючи

$$I_a = \rho \sin \Theta \cos \varphi, I_b = \rho \sin \Theta \sin \varphi, I_c = \rho \cos \Theta, \quad (30)$$

одержимо:

$$P = \frac{1}{2\pi^{\frac{3}{2}} \prod_{i=1}^3 \sigma_i} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\delta} e^{-a\rho^2} \rho^2 \sin \Theta d\rho d\varphi d\Theta, \quad (31)$$

де

$$a = \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2 \varphi \sin^2 \Theta}{\sigma_1} + \frac{\sin^2 \varphi \sin^2 \Theta}{\sigma_2} + \frac{\cos^2 \Theta}{\sigma_3} \right),$$

$$\delta = \sqrt{1 - \sin \Theta \sin \varphi \cos \varphi + \cos \Theta \sin \varphi + \cos \Theta \cos \varphi},$$

$$M = I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 - I_a I_b - I_a I_c - I_b I_c, \text{ тобто } M = I_n = 3I_0.$$

Відповідно

$$0 \leq I_n \leq 1.$$

Рішення інтеграла може бути отримане у вигляді:

$$P = \frac{M^3}{12\sqrt{2\pi} \prod_{i=1}^3 \sigma_i}. \quad (32)$$

Похибка у результаті за інтегрування з урахуванням прийнятих допущень дорівнює:

$$\Delta < \frac{a\rho^5}{5} = \frac{a}{5} \left(\frac{M}{\sigma} \right)^5. \quad (33)$$

Відповідно для трипровідних відгалужень маємо:

$$P = \frac{M^2}{2\sqrt{3} \prod_{i=1}^2 \sigma_i}. \quad (34)$$

Висновки і перспективи. Запропонована методика розрахунків струмів і напруг у несиметричних режимах чотирипровідних мереж 0,38/0,22 кВ, інформаційною основою якої є використання графіків навантаження, дозволяє визначити імовірнісну характеристику випадкової несиметрії мережі та уточнити розрахункові значення додаткових втрат.

Список використаних джерел

1. Левин, М. С. Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,38 кВ / М. С. Левин, Т. Б. Лещинская // Электричество, 1999, №5. – С. 18 – 22.
2. Мирошник, А. А. Методы вычисления потерь мощности в элементах несимметрично нагруженной сети / А. А. Мирошник // Научно-практический журнал «Электротехника і електромеханіка», 2011. – №5. – С. 66 – 69.
3. Теория вероятностей. /А. В. Печинкин, О. И. Тескин, Г. М. Цветкова и др. – Учеб. для ВУЗов – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 456 с.
4. Мірошник, О. О. Методи та підходи до розрахунку втрат електричної енергії в розподільчих електричних мережах / О. О. Мірошник // Праці ТДАТА «Наукове фахове видання» – Мелітополь: ТДАТА, 2007. – Вип. 7, Т. 3. – С. 162–172.
5. Воротницкий, В. Э. Многофакторная корреляционная модель для анализа и прогнозирования потерь энергии в распределительных сетях / В. Э. Воротницкий // Электричество, 1975. – № 1. – С.29–31
6. Наумов, И. В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств / И. В. Наумов. – Дисс. докт. тех. наук, 05.20.02 – Иркутск, 2002. – 387 с.
7. Ангелов, Д. Д. Исследование нессиметрии в воздушных электрораспределительных сетях 0,38/0,22 кВ и пути ее ограничения: автореф. дис. ...канд. техн. наук:шифр./ Д. Д. Ангелов. – институт – София, 1980. – 24 с.

References

1. Levyn, M. S., Leshchynskaia, T. B. (1999). Analiz nesymmetrychnykh rezhymov selskykh setei 0,38 kV [Analysis of asymmetric modes of rural networks 0.38 kV]. Elektrychestvo, 5, 18 – 22.
2. Myroshnyk, A. A. (2011). Metody vychysleniya poter moshchnosty v elementakh nesymmetrychno nahruzhennoi sety [Methods for calculating power losses in elements of an asymmetrically loaded network]. Elektrotekhnika i elektromekhanika, 5, 66 – 69.
3. Pechynkyn, A. V., Teskyn, O. Y., Tsvetkova, H. M. y dr. (2004). Teoryia veroiatnostei [Theory of Probability]. Moscow, MHTU ym. N.E. Bauman, 456.
4. Miroshnyk, O. O. (2007). Metody ta pidkhody do rozrakhunku vtrat elektrychnoi enerhii v rozpodilchykh elektrychnykh merezhakh [Methods and approaches for calculating power losses in power distribution networks]. Pratsi TDATA «Naukove fakhove vydannia», Melitopol: TDATA, 7, (3), 162–172.

5. Vorotnytskyi, V. E. (1975). Mnohofaktornaia korreliatsyonnaia model dlia analiza y prohnozyrovanyia poter enerhyy v raspredelytelnykh setiakh [Multifactorial correlation model for analysis and forecasting of energy losses in distribution networks]. Elektrychestvo, 1, 29–31.

6. Naumov, Y. V. (2002). Snyzhenye poter y povyshenye kachestva elektrycheskoi enerhyy v selskykh raspredelytelnykh setiakh 0,38 kV s pomoshchiu symmetryruiushchykh ustroystv [Decrease in losses and increase of quality of electric energy in rural distribution networks 0,38 kV with the help of balancing devices]. Irkutsk, 387.

7. Anhelov, D. D. (1980). Yssledovanye nessymetriy v vozdushnykh elektroraspredelytelnykh setiakh 0,38/0,22 kV y puty ee ohranycheniya [Investigation of nonsymmetry in aerial power distribution networks 0.38 / 0.22 kV and ways to limit it]. Sofya, 24.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТНОЙ НЕСИММЕТРИИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ КОММУНАЛЬНО-БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

А. А. Мирошник

Аннотация. Приведены теоретические обоснования и рекомендации по практическому применению методики расчета вероятностной несимметрии в четырехпроводных сетях 0,38/0,22 кВ на основе использования графиков нагрузки по продолжительности на подстанции. Решена задача вероятностной оценки несимметрии при угловой симметрии токов и пофазном равенстве средних значений коэффициентов мощности. Приведены графики зависимости симметричных составляющих токов в четырехпроводных сетях 0,38/0,22 кВ, которые показали, что погрешность при аппроксимации графиков коммунально-бытовых потребителей не превышает 5%. Приведено семейство кривых, которое показывают характер изменения коэффициентов заполнения графиков от доли силовых потребителей в общем составе нагрузки для потребительских подстанций с разной установленной мощностью. Определены зависимости показателей степени аппроксимирующей функции для всех видов графиков нагрузки потребительских трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ. Выполнена проверка интеграла вероятности на основе результатов статистической обработки многочисленных непосредственных измерений фазных токов на вводах трансформаторов потребительских подстанций 10/0,4 кВ. Выполнен статистический анализ данных измерений в сельских распределительных сетях 038/0,22 кВ, который показал, что распределение токов в фазах подчиняется нормальному закону.

Ключевые слова: несимметрия токов, потери электрической энергии, сеть 0,38/0,22 кВ, графики нагрузки

THE ESTIMATION OF PROBABILITY UNBALANCED CURRENTS AND VOLTAGES BASED ON THE GRAPH OF HOUSEHOLD CONSUMERS LOAD

O. O. Miroshnyk

Annotation. We cited a theoretical bases and recommendation on the practical application of methods of calculating probability of asymmetry in the four-network of 0.38 / 0.22 kV on the basis of load charts for the duration of the substation. The problem of probabilistic assessment asymmetry under the stipulation that angular symmetry of currents and sentence-by-sentence equality of power factor average values. The graphs shows dependences of symmetrical components of currents in four-network of 0.38 / 0.22 kV, which showed that the error of approximation graphs communal consumers does not exceed 5 %. We cited a group of curves, which show the variation of coefficient of filling the graphs from the share of power consumers in the total load for the consumer substations with different installed capacity. The dependence of the exponents approximating function for all kinds of load profiles of consumer transformer substations of 10 / 0.4 kV are defined. The verification of the integral probability completed. It based on the statistical processing of the results of numerous direct measurements of the phase currents on the transformer bushings consumer substations 10 / 0.4 kV. A statistical analysis of measurement data in the rural distribution network of 038 / 0.22 kV completed. It showed that the distribution of the currents in the phases obeys the normal law.

Keywords: *current asymmetry, graphs of load, loss of electrical power, network of 0.38 / 0.22 kV*

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ СИСТЕМИ
УТИЛІЗАЦІЇ НАДЛИШКОВОЇ І ВІДПРАЦЬОВАНОЇ ТЕПЛОТИ З
ҐРУНТОВИМ АКУМУЛЯТОРОМ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ
ВИРОБНИЧИХ СПОРУД**

Б. І. КОТОВ, доктор технічних наук, професор
Вінницький національний аграрний університет,
В. О. ГРИЩЕНКО, кандидат технічних наук
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: bepeck2001@rambler.ru

Анотація. В статті обґрунтовано доцільність використання акумуляторів тепла в сільськогосподарських виробничих спорудах з метою зменшення енерговитрат на забезпечення мікроклімату за рахунок нагрівання акумулюючої насадки в час максимального надходження зовнішньої теплоти і нагрівання припливного повітря за відсутності зовнішніх теплонадходжень. На прикладі теплиці з трубно-водяним опаленням, біологічними об'єктами та вентиляторами розроблена математична модель теплових режимів з системою утилізації надлишкової теплоти. Тепловий акумулятор реалізовано у вигляді ізольованого каналу заповненого насадкою, розміщеною в середині ґрунтового масиву під шаром субстрату, який має повітряне сполучення із шатром теплиці.

Запропонована розгорнута математична модель динаміки радіаційно-теплогового режиму культивацийної споруди з акумулятором надлишкової теплоти, яка складається з рівнянь теплового балансу за стаціонарного теплового процеуі для: світлопрозорого огороження; рослинного покриву; повітря в об'ємі теплиці; повітря в об'ємі насадки; насадки акумулятора. Враховуючи замкненість повітряного тракту системи теплиця-акумулятор-теплиця використано умови спряження двох ланок: температура на виході теплиці дорівнює температурі повітря на вході в акумулятор, а на виході акумулятора температури повітря на вході в теплицю. Шляхом перетворень та спрощень отримано спрощені аналітичні залежності для визначення добової зміни температури повітря в повітряному об'ємі споруди.

Ключові слова: математична модель, тепловий режим, надлишкова теплота, вентиляція, акумулятор теплоти

Актуальність. Одним із ефективних методів зменшення енерговитрат в системах забезпечення технологічного мікроклімату виробничих приміщень з біологічними об'єктами (тваринницькі, птахівницькі будівлі і культивовані споруди) в перехідний і холодні пори року є застосування

утилізації надлишкової і відпрацьованої теплоти вентиляційних викидів [1]. Викидне повітря тваринницьких приміщень містить значну кількість теплової енергії, в культивацийні споруди (теплиці) в сонячні дні поступає значна кількість теплової енергії за рахунок сонячної радіації, що викликає перегрівання повітря і рослин та зумовлює необхідність «провітрювання» шатра теплиці шляхом видалення надлишкової теплоти через вентиляційні прийоми зовні [2,3].

Перспективним напрямом утилізації (повторного використання теплових повітряних викидів) є регенерація теплоти в акумуляторах з дисперсною насадкою [4], розташованих, наприклад, в ґрунті під спорудою. Являє науковий і практичний інтерес розглянута динаміка радіаційно-теплового режиму споруди (на прикладі теплиці як найбільш енергоємного об'єкту), оснащеної системою примусової вентиляції і акумулятором теплової енергії, у вигляді проточної ємності заповненою дисперсною насадкою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В сонячні дні в культивацийні споруди (теплиці парники) надходить значна кількість теплової енергії за рахунок сонячної радіації. Час перегрівів повітря в теплицях складає 25–40 % загального часу експлуатації теплиць в залежності від кліматичної зони держави. Для нормального розвитку рослин необхідно підтримувати температуру повітря в оптимальних межах. Регулювання параметрів внутрішнього повітря в теплицях (ліквідація перегріву), зазвичай, здійснюється двома способами: відкриттям вентиляційних прорізів, що забезпечує видалення перегрітого повітря з об'єму теплиці і подачу холодного зовнішнього повітря, нормалізуючи температуру в зоні рослин; зниженням температури теплоносія в трубних реєстрах системи обігріву; екрануванням частини світлопрозорого покриття.

Однак ці способи не вирішують проблему раціонального використання теплової енергії, хоча і забезпечують регламентований температурний режим. Велика протяжність і відповідно інерційність трубного обігріву розтягує в часі (1.5–2 години) реагування системи подачі теплоносія і відбувається викид перегрітого повітря через вентиляційну систему назовні, тобто виникають непродуктивні витрати теплоти.

Перспективним є будівництво теплиці (або її реконструкція) із спорудженням акумуляторів теплоти. В періоди інтенсивного сонячного випромінювання для провітрювання теплиці вмикають вентилятори і надлишкову теплоту перегрітим повітрям спрямовують в тепловий акумулятор. Це дозволяє в нічні години доби обігрівати шатер теплиці повітрям, нагрітим за рахунок акумульованої сонячної енергії. Таким чином, необхідність акумулювання теплоти зумовлена нерівномірністю надходження сонячної радіації протягом доби [1].

В якості акумуляторів короткочасового зберігання теплової енергії використовують теплоізольовані ємності, заповнені камінням (подрібненим), галькою, сосудами з парафіном, а трубопроводи повітря занурені в ґрунт під теплицею [2]. Оскільки для акумуляції теплоти

шляхом теплопередачі найголовнішим параметром є величина теплопередаючої поверхні, то найбільш простими і ефективними є теплові акумулятори у вигляді трубопроводу [3] (довільного перетину), заповнені дисперсною насадкою (галька, щебінка, гранули з речовиною, яка має фазові переходи, наприклад, плавлення). При цьому являє практичний і науковий інтерес розглянути динаміку радіаційно-теплого режиму теплиці з акумулятором теплоти, так як в роботах [2, 4] розглядаються системи акумулювання викидної теплоти виробничих споруд в стаціонарному режимі.

Мета досліджень – розробка математичної моделі динамічних теплових режимів культивативної споруди, оснащеною системою вентиляції з акумулятором теплоти.

Матеріали і методи дослідження. Використано аналітичний метод досліджень шляхом складання рівнянь теплового балансу і їх спрощеного розв'язку наближеним методом для отримання аналітичних залежностей зміни параметрів циркулюючого в системі повітря в часі, при зміні зовнішніх теплових надходжень.

Результати дослідження та їх обговорення. Розрахункова модель теплиці являє собою повітряний об'єм, обмежений світлопрозорим огородженням – шатром і поверхнею ґрунтового масиву (рис.1). В шатрі теплиці розміщені прилади трубно-водяного опалення (технологічне обладнання), біологічне наповнення рослини та вентилятори. В середині ґрунтового масиву під шаром субстрату розміщений тепловий акумулятор у вигляді ізольованого каналу, заповненого насадкою (твердий кусковий матеріал), який має повітряне сполучення із шатром теплиці.

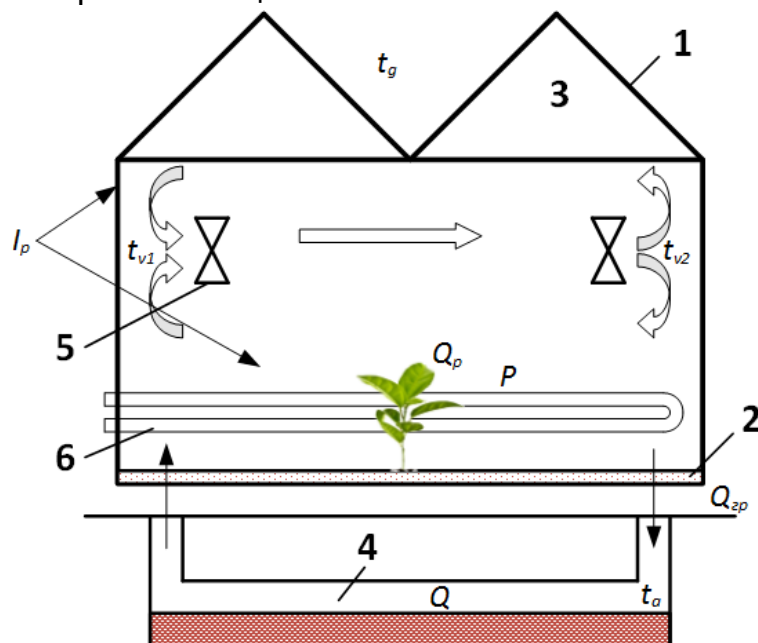


Рис. 1. Технологічна схема опалюваної теплиці з підґрунтовим акумулятором (з гравійною насадкою): 1 – осклене огороження; 2 – ґрунт; (субстрат); 3 – повітряний об'єм теплиці-шатра; 4 – канал акумулятора, заповнений насадкою; 5 – вентилятор; 6 – трубне опалення

За складання математичної моделі динаміки теплових процесів приймаються наступні спрощення: об'єм теплиці розглядається як обмежений простір, заповнений однорідною речовиною з ефективною теплоємністю; теплоємність рослинності можна віднести до повітряного об'єму, а сама рослинність розглядається як напівпрозорий екран; вологовиділення рослин враховується коефіцієнтами теплообміну; складові радіаційного теплообміну враховується коефіцієнтами теплообміну; нагрівання насадки безградієнтне (нерівномірність теплового поля елементів насадки враховується коефіцієнтом теплопередачі); розподіл температури повітря в акумуляторі в напрямку руху повітря рівномірний; система – «шатер–акумулятор» розглядається як модель ідеального змішування.

Виходячи із фізичного уявлення теплових процесів і прийнятих припущень запишемо рівняння теплового балансу теплиці за стаціонарного теплового процесу:

– для світлопрозорого огороження:

$$IF_c G_c + \alpha_k F_c + \alpha_k F_c (\bar{t}_v - q - Q_c) + \alpha_c F_c (Q_p - Q_c) = \alpha_g F (Q_c - Q_g). \quad (1)$$

В рівнянні (1) ліва частина – це сума кількості теплоти, яку отримує огороження теплиці від поглиненої сонячної радіації, внутрішнього повітря (конвективною тепловіддачею), і від нагрітої поверхні рослин (вимірюванням), а права частина – кількість теплоти яку віддає поверхня огороження в зовнішнє середовище;

– для рослинного покриву:

$$I_a \tau_p (F_p)^A = \alpha_k \cdot F_p (Q_p - \bar{t}_v) + \alpha_l F_p (Q_p - Q_c) + r \cdot \beta \cdot F_p \cdot Q_p. \quad (2)$$

В рівнянні (2) ліва частина – це кількість теплоти, отриманої поглинанням сонячної радіації, яка проникає крізь світлопрозоре огороження, а права – це сума кількості теплоти, переданої конвективно від рослини повітрю і випромінюванням від рослин до поверхні огороження. При цьому теплота, яка витрачається на випаровування води може бути врахована збільшенням коефіцієнтів теплообміну $\alpha_k = \alpha_k + \Delta \alpha_w$;

– для повітря в об'ємі теплиці:

$$P_{TP} + G_v C_v t_{v1} \alpha_k F_p (Q_p - \bar{t}_v) = \alpha_k F_c (t_v - Q_c) + G_v C_v \cdot t_{v2}. \quad (3)$$

В рівнянні (3) ліва частина визначає сумарну кількість, що надходить до повітряного об'єму теплиці від приладів нагріву, акумулятора і рослин, а права – сума кількості теплоти, що передається огороженню і відводиться в теплоакумулятор.

Рівняння теплового балансу акумулятора теплоти у стаціонарному режимі:

– для повітря в об'ємі насадки:

$$G_v C_v t_{a1} = \alpha_k^a F_a (\bar{t}_a - Q) + G_v C_v t_{a1}, \quad (4)$$

ліва частина рівняння визначає кількість теплоти, що надходить в акумулятор з об'єму теплиці, а права сумарну кількість теплоти переданої до насадки і виведеної з повітрям з акумулятора в об'єм теплиці;

– для насадки акумулятора

$$\alpha_k^a F_a (t_a - Q) = K_{zp} F (Q - Q_{zp}). \quad (5)$$

Теплота, отримана насадкою в сталому режимі передається через зовнішню поверхню акумулятора (каналу) в ґрунт.

В рівняннях (1) – (5) використано наступні позначення:

$t_v = 0.5$, $t_{v1} = 0.5t_{v2}$ – середня температура повітря в шатрі теплиці, °C;

$t_a = 0.5t_{a1} + 0.5t_{a2}$ – середня температура в об'ємі акумулятора, °C;

t_{v1} , t_{a1} – температура повітря на вході в теплицю і в акумулятор, °C;

t_{v2} , t_{a2} – температура повітря на виході теплиці і акумулятора, °C;

Q_p – температура рослин, °C;

I, I_a – інтенсивність падаючої та проникаючої (крізь скло) сонячної радіації, Вт/м²;

P_{mp} – потужність (теплова) трубного обігріву, Вт;

G_v – витрати повітря, кг/с;

α_k, α_l – коефіцієнти теплообміну конвекцією і випромінюванням, Вт/(м²·°C);

θ – температура насадки акумулятора, °C;

F_c, F_p, F_a – поверхня огороження, рослин, насадки акумулятора, м²;

F_{pa} – поверхня опромінення рослин м²;

F_k – зовнішня поверхня акумулятора;

K_{zp} – коефіцієнт теплопередачі від повітря в акумуляторі до ґрунту, Вт/(м²·°C).

Враховуючи замкненість повітряного тракту системи теплиця-акумулятор-теплиця, запишемо умови спряження двох ланок: температура на виході теплиці дорівнює температурі повітря на вході в акумулятор, а на виході акумулятора – температурі повітря на вході в теплицю, тобто:

$$t_{v2} = t_{a1}, \quad t_{a2} = t_{v1}. \quad (6)$$

За порушення теплової рівноваги, наприклад, у разі зміни потужності нагріву ΔP , об'єкт перейде до нестационарного режиму, зміни температури елементів об'єкту в часі. Рівняння теплового балансу для нестационарного процесу теплообміну з урахуванням (6) будуть мати вигляд:

$$M_c C_c \frac{dQ_c}{d\tau} = I G_c F_c + \alpha_k F_c (t_v - Q_c) + \alpha_l F_c (Q_p - Q_c) - a_c F_c (Q_c - t_g), \quad (7)$$

$$M_c C_c \frac{dQ_3}{d\tau} = I_l G_c F_c + \alpha_k F_p (Q_p - t_v) - \alpha_l F_p (Q_p - Q_c), \quad (8)$$

$$M_v C_v \frac{dt_{v2}}{d\tau} = P_{mp} + C_{tv} C_v (t_{v1} - t_{v2}) + \alpha_k F_a (t_a - Q), \quad (9)$$

$$M_{va}C_v \frac{dt_{a2}}{d\tau} = +C_{tv}C_v [t_{a1} - t_{a2}] - \alpha_k^a F_a [t_a - Q], \quad (10)$$

$$M_a C_a \frac{dQ}{d\tau} = \alpha_k^a F_a (Q_a - Q) - K_{cp} F_{ak} (Q - Q_{cp}), \quad (11)$$

де $M_c, M_p, M_v, M_{va}, M_a$ – маса осклена, рослин, повітря в об'ємі теплиці і в акумуляторі та маса насадки, кг;

C_c , C_p , C_v , C_a – питома теплоємність огороження, рослин, повітря, насадки, Дж/(кг·°С).

Для отримання аналітичних залежностей зміни температури повітря теплиці з акумулятором тепла в часі, зробимо додаткові спрощення понижуючи порядок рівнянь.

Температуру світлопрозорого огородження можна визначити як середню між температурами зовнішнього і внутрішнього повітря

$$Q_c = 0.5(t_v + t_a), \quad (12)$$

де $t_v = (t_{v2} + t_{a2})0.5$ – середня температура повітря в об'ємі теплиці, °С.

Теплову ємність рослин можна віднести до теплоємності повітря, визначивши останню як еквівалентну теплоємність $M_v C_v = (M_v C_v + M_p C_p)$.

Теплову ємність насадки акумулятора також можна віднести до теплоємності повітря в акумуляторі $M_{ak}C_{ak} = (M_{va}C_v + M_aC_a)$.

Тоді рівняння (8) і (11) замінимо рівнянням (2) і (5) для стаціонарного процесу теплообміну.

З рівняння (2) з урахуванням (12) визначимо температуру рослин:

$$Q_p = a_0 \cdot I + a_1 \bar{t}_v + a_2 Q_c, \quad (13)$$

$$\text{де } a_0 = \frac{\tau \cdot 0.5}{\alpha_k \alpha_n}; a_1 = \frac{\alpha'_k}{\alpha'_k \alpha_n}; a_2 = \frac{\alpha_n}{\alpha_k \alpha_n}.$$

Підставляючи значення Q_p (13) в рівняння (9) після відповідних перетворень матимемо:

$$M_v C_v \frac{dt_{v2}}{d\tau} = P_{mp} M_1 t_{a2} M_1 t_{v2} + 0.5 a_2 t_g + a_0 \alpha_k F_k \cdot I; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{де } M_1 &= G_v C_v - \alpha F & ; & & n_1 = G_v C_v - \alpha F 0.5 & ; \\ \alpha F &= \alpha'_k F_p \alpha_k F_c (\alpha_1 + 0.5 a_2). \end{aligned}$$

З рівняння (5) визначимо температуру насадки акумулятора

$$Q = B_1 t_{a2} + B_2 t_{v2} + B_3 Q_{mn}, \quad (15)$$

$$\text{де } B_1 = \frac{0.5\alpha_k^a F_a}{\alpha_k^a F_a + K_{\text{зп}} F_{\text{зп}}}; B_2 = \frac{\alpha_k^a F_a}{\alpha_k^a F_a + K_{\text{зп}} F_{\text{зп}}}; B_3 = \frac{K_{\text{зп}} F_a}{\alpha_k^a F_a + K_{\text{зп}} F_{\text{зп}}}.$$

Підставляючи значення Q (15) в рівняння (10) після перетворень матимемо:

$$M'_{va} C'_p \frac{dt_{a2}}{d\tau} = M_2 t_{v2} - n_2 t_{a2} + \alpha_k^a F Q_{cp}, \quad (16)$$

де $M_2 = G_v C_v - 0.5 \alpha_k^a F_a + \alpha_k^a F_a B_2$; $n_2 = G_v C_v - 0.5 \alpha_k^a F_a - \alpha_k^a F_a B_1$.

Таким чином в спрощеному варіанті математичної моделі теплові процеси в теплиці і акумуляторі описано системою двох диференціальних рівнянь (14) і (16).

Введемо такі позначення:

$$T_1 = \frac{M_v C_v}{M_1}; \quad a_1 = \frac{n_1}{M_1}; \quad B_1 = \frac{P_{cp}}{M_1} + \frac{0.5 a_2 t_3}{M_1} + \frac{a_0 \alpha_k F_k}{M_1} \cdot 1; \quad T_2 = \frac{M_v C_v}{M_2};$$

$$a_1 = \frac{n_2}{M_2}; \quad B_2 = \frac{P_{cp}}{M_2} + \frac{\alpha_k^a a_2 t_3}{M_2} + \frac{a_0 \alpha_k F_k}{M_2} \cdot 1.$$

Перепишемо рівняння (14) і (16) у вигляді

$$\begin{cases} T_1 \frac{dt_{v2}}{d\tau} + a_1 t_{v2} - b_1 = t_{a2} \\ T_2 \frac{dt_{a2}}{d\tau} + a_2 t_{a2} - b_2 = t_{v2} \end{cases}. \quad (17)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (17) відносно t_{v2} і t_{a2} (далі t_v і t_a) будемо мати два незалежних рівняння:

$$A \frac{d^2 t_v}{d\tau^2} + B \frac{dt_v}{d\tau} + C t_v = D_1, \quad (18)$$

$$A \frac{d^2 t_a}{d\tau^2} + B \frac{dt_a}{d\tau} + C t_a = D_2. \quad (19)$$

Розв'язок неоднорідних рівнянь (18) і (19) за початкових умов: $\tau = 0$; $t_v = t_{v0}$; $t_a = t_{a0}$; $\frac{dt_v}{d\tau} = \frac{dt_a}{d\tau}$; $I = const$; $t_g = const$, отримаємо у вигляді:

$$t_v(\tau) = \frac{t_{v0} C - D_1}{C r_1 - r_2} \cdot e^{r_1 \tau} r_2 e^{r_2 \tau} + \frac{D_1}{C}, \quad (20)$$

$$t_a(\tau) = \frac{t_{a0} C - D_2}{C r_1 - r_2} \cdot e^{r_1 \tau} r_2 e^{r_2 \tau} + \frac{D_2}{C}. \quad (21)$$

Розглянемо перехідні процеси теплиці і теплового акумулятора за нестационарних збурень: $I = I \cdot \cos \omega \tau$; $t_g = t_g \cdot \cos \omega \tau$. Прийнемо, в першому наближенні, що температура зовнішнього повітря і інтенсивність сонячної радіації змінюються в часі (добові зміни) за гармонічним законом:

$$t_g(\tau) = t_0 + t_a \cos \omega \tau, \quad I(\tau) = I_a \cos \omega \tau, \quad (22)$$

за $6 \leq \tau \leq 18$ та $I(\tau) = 0$ за $18 \leq \tau \leq 6$,

де t_0 – середньодобові значення зовнішньої температури, °C;

t_a – амплітуда коливань температури, °C;

I_a – максимальна сонячна радіація, Вт/м²;

$\omega - \pi/12$, частота коливань (добових) 1/год.

Перепишемо рівняння (19) у вигляді:

$$A \frac{d^2 t_v}{d\tau^2} + B \frac{dt_v}{d\tau} + Ct_v = K + P \cos \omega \tau, \quad (23)$$

$$\text{де} \quad K = B_2 - a_2(P_{sp} + K_g t_0) ; \quad P = a_2(K_g t \Delta - K_j) ; \quad P = \frac{P_{mp}}{M_1} ;$$

$$K_3 = \frac{0.5a_2}{M} ; \quad K_j = a_0 \alpha_k F_p.$$

Початкові умови: $\tau = 0$; $t_v = t_{v0}$; $\frac{dt_v}{d\tau} = 0$.

Розв'язок неоднорідного рівняння (23) отримаємо у вигляді

$$t_v = C_1 e^{r_1 \tau} + C_2 e^{r_2 \tau} + \frac{K}{C_1} + \frac{r}{a^2 + b^2} [\sin \omega \tau - a \cos \omega \tau], \quad (24)$$

де $a = A\omega^2 - c$; $b = B\omega$.

Сталі інтегрування C_1 і C_2 визначені з початкових умов представимо:

$$C_1 = \frac{r_2}{r_2 - r_1} \left(t_{v0} - \frac{k}{c} + \frac{p}{a^2 + b^2} \left(a - \frac{b\omega}{r_2} \right) \right),$$

$$C_2 = \frac{r_1}{r_1 - r_2} \left(t_{v0} - \frac{k}{c} + \frac{p}{a^2 + b^2} \left(a - \frac{b\omega}{r_1} \right) \right).$$

Висновки і перспективи. Запропоновано розгорнуту математичну модель динаміки радіаційно-теплового режиму культивационної споруди з акумулятором надлишкової теплоти.

Отримано спрощені аналітичні залежності для визначення добової зміни температури повітря в повітряному об'ємі споруди.

Список використаних джерел

1. Ильяхин, М. С. Теплоснабжение отраслей АПК / М. С. Ильяхин. – М. : Агропромиздат, 1990. – 175 с.
2. Корчемний, М. Энергозбереження в агропромисловому комплексі / М. Корчемний, В. Федорейко, В. Щербань: підручник. – Тернопіль: Підручники & посібники, 2001. – 974 с.
3. Теплицы и тепличные хозяйства : справочник / под ред. Г. Г. Шишко. – Киев : Урожай, 1993. – 421 с.
4. Вардияшвили, А. Б. Гидравлический и теплотехнический расчет подпочвенной аккумулирующей системы гелиотеплиц // Гелиотехника, – 1980. – № 6. С. 48–53.

References

1. Il'yukhin, M. S. (1990). Teplosnabzhenie otraslei APK [Heating agribusiness sectors]. Agropromizdat, 175.

2. Korchemnyi, M., Fedoreiko, V., Shcherban, V. (2001) Enerhozberezhennia v ahropromyslovomu kompleksi [Energy conservation in agriculture]. Ternopil: Pidruchnyky & posibnyky, 974.

3. Shishko, G. G. ed (1993). Teplitsy i teplichnye khozyaïstva [Greenhouses and greenhouse farming]. – Kiev: Urozhaï, 421.

4. Vardiyashvili, A. B. (1980). Gidravlicheskiï i teploekhnicheskii raschet podpochvennoiï akkumuliruyushcheï sistemy gelioteplits [Hydraulic and Thermal calculation subsoil accumulating solar greenhouses Systems]. Gelioekhnika, 6, 48–53.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ИЗБЫТОЧНОЙ И ОТРАБОТАННОЙ ТЕПЛОТЫ С ГРУНТОВЫМ АККУМУЛЯТОРОМ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

Б. И. Котов, В. А. Грищенко

Аннотация. В статье обоснована целесообразность использования аккумуляторов тепла в сельскохозяйственных производственных сооружениях с целью уменьшения затрат энергии на обеспечение микроклимата за счет нагревания аккумулирующей насадки во время максимального поступления внешней теплоты и нагрева приточного воздуха при отсутствии внешних теплопоступлений. На примере теплицы с трубно-водяным отоплением, биологическими объектами и вентиляторами разработана математическая модель тепловых режимов с системой утилизации избыточной теплоты. Тепловой аккумулятор реализован в виде изолированного канала, заполненного насадкой, размещенной в середине грунтового массива под слоем субстрата, который имеет воздушное сообщение с шатром теплицы. Предложена развернутая математическая модель динамики радиационно-теплогового режима культивационного сооружения с аккумулятором избыточной теплоты, состоящая из уравнений теплового баланса при стационарном тепловом процессе для: прозрачного ограждения; растительного покрова; воздуха в объеме теплицы; воздуха в объеме насадки; насадки аккумулятора.

Учитывая замкнутость воздушного тракта системы теплица-аккумулятор-теплица, использованы условия сопряжения двух звеньев: температура на выходе теплицы равна температуре воздуха на входе в аккумулятор, а на выходе аккумулятора – температуре воздуха на входе в теплицу. Путем преобразований и упрощений полученных уравнений получены упрощенные аналитические зависимости для определения суточного изменения температуры воздуха в воздушном объеме сооружения.

Ключевые слова: математическая модель, тепловой режим, избыточная теплота, вентиляция, аккумулятор теплоты

MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMIC MODES OF THE SYSTEM OF UTILIZATION OF EXCESS AND WASTE HEAT WITH GROUND ACCUMULATOR FOR AGRICULTURAL PRODUCTION FACILITIES

B. I. Kotov, V. O. Hryshchenko

Annotation. *The article substantiates the expediency of using heat accumulators in agricultural production facilities in order to reduce energy costs for providing a microclimate by heating the accumulating headpiece during the maximum intake of external heat and heating up the supply air in the absence of external heat input. On the example of a greenhouse with pipe-water heating, biological objects and fans, a mathematical model of thermal regimes with a system for utilizing excess heat has been developed. The thermal battery is realized in the form of an isolated channel filled with a nozzle placed in the middle of a soil massif under a layer of substrate that has air communication with a greenhouse tent. The proposed mathematical model is proposed for the dynamics of the radiation-thermal regime of cultivation structures with an excess heat accumulator consisting of the heat balance equations for a stationary thermal process for: transparent fencing; Vegetation cover; Air in the volume of the greenhouse; Air in the volume of the nozzle; Battery attachments. Taking into account the closedness of the air path of the greenhouse-battery-greenhouse system, the conjugation conditions of the two links are used: the temperature at the output of the greenhouse is equal to the air temperature at the entrance to the accumulator, and at the exit of the battery the air temperature at the entrance to the greenhouse. By means of transformations and simplifications of the equations obtained, simplified analytical dependencies were obtained to determine the diurnal change in air temperature in the air volume of the structure.*

Keywords: *mathematical model, thermal regime, excess heat, ventilation, accumulator of heat*

МЕТОД ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТІВ РУХУ БЕЗПІЛОТНОЇ ЗБИРАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

С. А. ШВОРОВ, доктор технічних наук, професор

Д. С. КОМАРЧУК, кандидат технічних наук

В. Є. ЛУКІН, кандидат педагогічних наук

Д. В. ЧИРЧЕНКО, інженер

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: sosdok@i.ua

Анотація. Проаналізовані сучасні тенденції щодо застосування безпілотних засобів у сільському господарстві західних держав. Розглянуті перспективні інноваційні технології та метод планування маршрутів безпілотної збиральної техніки в залежності від наявності врожаю та перешкод на шляху їх руху. Сформульовані основні задачі щодо комплексного застосування безпілотних літальних апаратів та безпілотної збиральної техніки для ефективного планування та збирання врожаю.

Ключові слова: *технологія, безпілотні літальні апарати, точне землеробство, планування маршрутів, керування рухом, безпілотна збиральна техніка*

Актуальність. Нині все більше уваги приділяється «точному землеробству», що забезпечує максимальну продуктивність сільсько-господарських робіт з урахуванням різного стану рослин та середовища їх вирощування. При цьому найбільш перспективним є комплексне використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та безпілотної збиральної техніки (БЗТ) в залежності від наявності врожаю та перешкод на кожній ділянці поля.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Результати проведеного аналізу наукових праць [1-3] показують, що за кордоном активно ведуться роботи щодо створення і впровадження «безпілотних» тракторів та комбайнів для сільськогосподарського виробництва. Наприклад, фінська компанія «Valtra» представила концептуальний трактор RoboTrac, який управляється за допомогою GPS-навігаторів і інтернету. Швейцарська фірма "Leica Geosystems" підписала довготерміновий контракт з китайським виробником спецтехніки YTO на поставку свого обладнання для безпілотного управління тракторами. За останні роки багато компаній представляли свої концепції і рішення подібних завдань, але витрати на таку техніку були нерентабельними. Проте, ситуація кардинально змінилася, коли фермери багатьох штатів

США почали зазнавати колосальних збитків через відсутність навчених і добре підготовлених механізаторів. Щорічно окремі напрями сільського господарства США втрачають до 30 відсотків свого врожаю через неможливість вчасно провести його збирання тому, що для цього знадобився б 24-годинний робочий день, чого фізично не витримає людина. Як відомо, компанія Case IH вже розробила спеціальні автоматизовані безпілотні комбайни, що забезпечують виконання робіт у нічний час та зменшення експлуатаційних витрат в умовах нестабільного землеробства. Компанія «Джон Дір» (США), а також німецькі виробники випускають експериментальні безпілотні модифікації тракторів і комбайнів, які успішно експлуатуються на великих сільськогосподарських підприємствах США і Європи. Компанія "АвтоКрАЗ" і запорізька інжинірингова компанія "Інфоком Лтд" завершили роботу над створенням автопілоту Pilotdrive, який на основі інформації від комплексу спеціальних датчиків (тепловізор, відеокамера з охопленням 360 градусів, передній і задній радар для виявлення перешкод, далекомір, ємнісний датчик присутності людини в радіусі 18 метрів) дозволяє легко орієнтуватися в дорозі. При цьому в сучасній літературі не достатньо повно приділяється уваги комплексному застосуванню безпілотних наземних та повітряних засобів для автоматизації процесів планування та керування БЗТ.

Мета дослідження – розробка методу планування маршрутів руху безпіотної збиральної техніки в залежності від наявності врожаю та перешкод на ділянках поля, визначених за допомогою БПЛА.

Матеріали та методи дослідження. Процес планування змісту та часу виконання польових робіт поділяється на декілька етапів, а саме: формування електронної карти місцевості та уточнення стану врожаю на кожній ділянці за допомогою безпілотних літальних апаратів, а також визначення компромісно-оптимальних маршрутів руху збиральної техніки на полях з перешкодами та складними геометричними формами. Як правило, оцінка стану рослинності за допомогою зйомки БПЛА визначається на основі використання нормалізованого вегетаційного індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Цей індекс розраховується як різниця значень відображення в ближній інфрачервоній і червоній областях спектру, поділена на їх суму [4-7]. При цьому використовується спеціальна NIR-модифікована камера, що значно збільшує вартість зйомки порівняно зі звичайною фотоапаратурою.

Як показують результати експериментальних досліджень, звичайні цифрові фотокамери можна ефективно використовувати за програмування врожаю та визначення різних перешкод на шляху руху БЗТ на кожній ділянці поля. Після проведення фотозйомки на електронній карті поля на основі статистичної обробки RGB-сигналів визначається декілька контрастних за оптичними характеристиками зон (ділянок). Для кожної з цих зон експериментально розраховуються контрольні обсяги врожаю, які використовуються для навчання нейронної мережі. Таким чином, на основі статистичної обробки спектральних характеристик цифрових знімків кожної ділянки місцевості та за допомогою апарату

нейронних мереж визначаються обсяги врожаю на шляху руху безпілотних комбайнів, що забезпечує оперативне прийняття рішень для розподілу, планування маршрутів та керування рухом збиральної техніки за мінімальних вартісних (порівняно з космічними зйомками) витрат.

Результати досліджень та їх обговорення. Для обробки графічних даних за результатами фотозйомки з БПЛА було використане спеціальне програмне забезпечення виробництва НУБіП LDE - Land damage expert, інтерфейс та блок налагодження якого наведені на рис. 1.

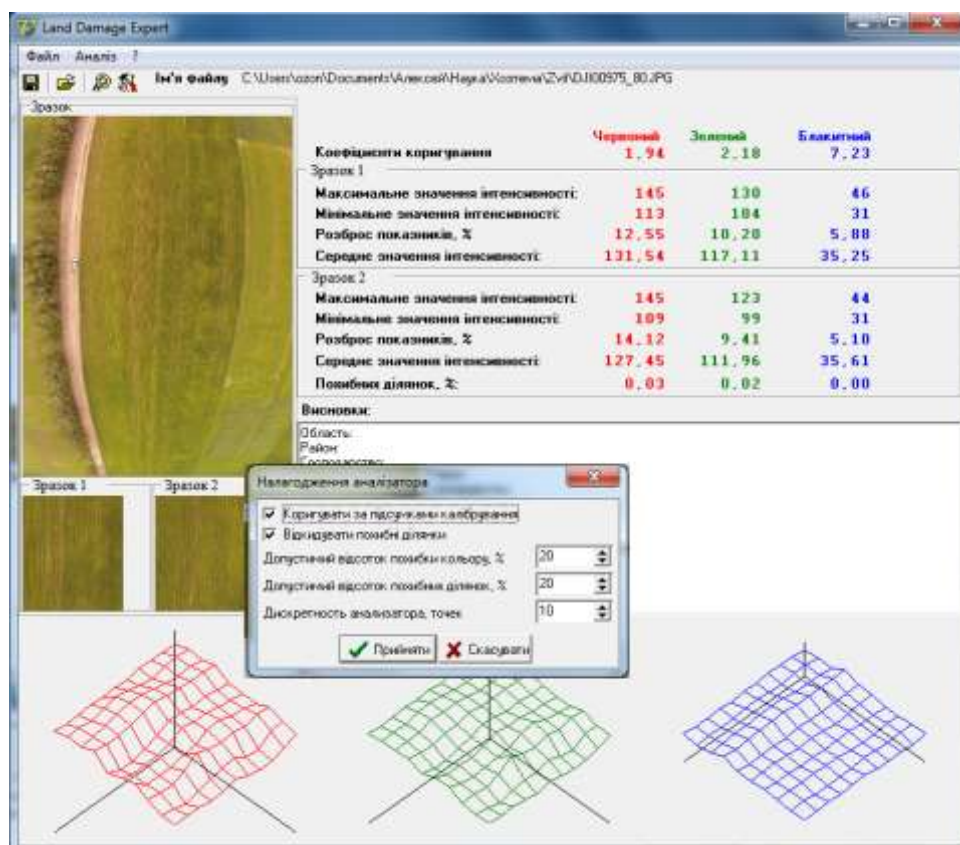


Рис. 1. Інтерфейс та блок налагодження програми Land damage expert

Програма LDE дозволяє за допомогою маніпулятора (миші) на фотографії виділяти 2 дослідні ділянки, для яких проводиться статистична обробка графічних даних. Оскільки стандартний формат Jpeg визначає значення RGB не для кожного конкретного пікселя, а для ділянок з однаковими параметрами, програма LDE перетворює дані із формату Jpeg в формат BMP, в якому значення яскравості складових адитивної моделі кольору утворення визначаються для кожного пікселя.

Програма має можливість визначення координати перешкод на електронній карті місцевості, значення RGB яких відрізняються від середнього на відповідний відсоток, що враховується за налагодження програми (рис. 1).

Для планування руху БЗТ відомою інформацією є координати площі, на якій планується збирання врожаю, початкове місце

знаходження кожної БЗТ та кінцеві точки їх маршруту, координати перешкод та ділянок без врожаю, що отримані за допомогою БПЛА та оброблені програмним забезпеченням Land damage expert.

Необхідно знайти такі компромісно-оптимальні маршрути руху БЗТ, за яких забезпечується: а) мінімальний шлях руху БЗТ; б) об'їзд стаціонарних перешкод; в) об'їзд ділянок без біомаси (врожаю). Тобто, як показано на рис. 2, задача зводиться до пошуку компромісно-оптимальних траєкторій переміщення БЗТ з урахуванням мінімальної довжини маршруту, об'їзду перешкод та ділянок без біомаси.

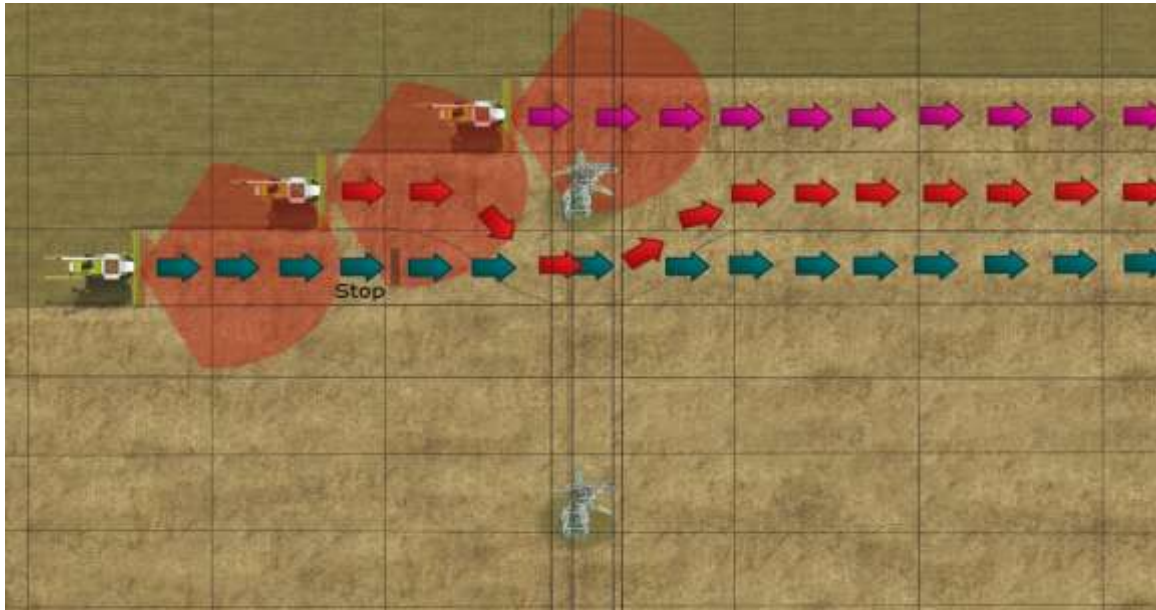


Рис. 2. Схема переміщення збиральної техніки полем

Відправна задача приводиться до дискретного вигляду. Для цього область простору станів, що нас цікавить, накривається Q -ою мережею $L^1 \times L^2 \times \dots \times L^Q$. При цьому вважається, що БЗТ може переміщуватися тільки з одного вузла цієї мережі до іншого.

Задача синтезу компромісно-оптимальних траєкторій руху в заданих умовах розв'язується методом динамічного програмування з узагальненим критерієм оптимальності за нелінійною схемою компромісів [8]. При цьому для визначення оптимального шляху, з граничною умовою $F(0, S) = 0$, в кожному τ -у допустиму точку за координатою X та за координатою Y j -го рівня на кожному кроці розв'язується функціональне рівняння Беллмана:

$$F(j, \tau) = \min_{i \in I_{j-1}} \Delta F_{j-1, i}^{j, \tau} + F(j-1, i), \quad j \in 1, J, \quad (1)$$

де j – кількість рівнів переходу на мережі по координаті X, Y ;

I_{j-1} – кількість допустимих точок на $j-1$ -му рівні мережі;

S – номер початкової точки за координатою X на нульовому рівні мережі;

$F(j, \tau)$ – сумарні втрати за узагальненим критерієм оптимальності за переходу з початкової точки $(0, s)$ в точку (j, τ) мережі;

$\Delta F_{j-1,i}^{j,m}$ – прирощення узагальненого критерію за переходу з точки $(j-1, i)$ в точку (j, τ) мережі.

В узагальнений критерій якості входять три критерії. Перший критерій кількісно визначає ступінь небезпеки наближення до перешкод (G). Другий – характеризує довжину переходу з точки $(j-1, i)$ в точку (j, m) мережі $D_{j-1,i}^{j,m}$. Третій критерій λ визначає ступінь наближення БЗТ до ділянки без біомаси. Розрахунок першого та третього критеріїв відбувається за допомогою програми Land damage expert.

Довжина шляху БЗТ характеризується довжиною переходу з рівня $j-1$ за координатою Y на рівень j . При цьому вважається, що БЗТ, знаходячись в одній із допустимих точок на $j-1$ -му рівні мережі, може переходити лише в одну з допустимих точок на j -му рівні.

Довжина переходу БЗТ між рівнями мережі визначається за формулою

$$D_{j-1,i}^{j,m} = \sqrt{(x_m - x_{i-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2}, \quad (2)$$

де x_i, y_{j-1} – координати БЗТ на $(j-1)$ -му рівні мережі;

x_m, y_j – координати допустимої точки на j -му рівні мережі.

Задача синтезу оптимальної траєкторії руху в заданих умовах розв'язується методом динамічного програмування з узагальненим критерієм оптимальності за нелінійною схемою компромісів. При цьому для визначення оптимального шляху в кожному m допустиму точку за координатами x j -го рівня та y на кожному кроці розв'язується функціональне рівняння Беллмана:

$$F(j, m) = \min_{i \in I_{j-1}} \Delta F_{j-1,i}^{j,m} + F(j-1, i), \quad j \in 1, J, \quad (3)$$

з граничною умовою $F(0, s) = 0$,

де j – кількість рівнів переходу за координатою y на мережі;

I_{j-1} – кількість допустимих точок на $j-1$ -му рівні мережі;

s – номер початкової точки за координатою x на нульовому рівні мережі;

$F(j, m)$ – сумарні втрати за узагальненим критерієм оптимальності за переходу з початкової точки $(0, s)$ в точку (j, m) мережі;

$\Delta F_{j-1,i}^{j,m}$ – прирощення узагальненого критерію за переходу з точки $(j-1, i)$ в точку (j, m) мережі.

Структура узагальненого критерію будується у відповідності до методології нелінійної схеми компромісів [8] та визначається виразом:

$$\Delta F_{j-1,i}^{j,m} = \frac{G_{\max}}{G_{\max} - G_{j,m}} + \frac{D_{\max}}{D_{\max} - D_{j-1,i}^{j,m}} + \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\max} - \lambda_{j-1,i}^{j,m}}. \quad (4)$$

В якості оптимальної на рівні j вибирається та допустима точка даного рівня, якій відповідає мінімум сумарних втрат за узагальненим критерієм оптимальності (4). Розраховані за допомогою даного методу компромісно-оптимальні траєкторії руху передаються в навігаційну апаратуру БЗТ.

Висновки і перспективи. Таким чином, запропоновані технологічні основи та метод планування маршрутів руху безпілотної збиральної техніки, в залежності від наявності врожаю та перешкод на шляху руху БЗТ, визначених за допомогою БПЛА, передбачають більш високу оперативність та точність керування БЗТ, а також зменшення витрат пального. Одержані дані з БПЛА дають можливість на основі використання програми Land damage expert оперативно визначити ефективну площу посівів, площу просівів, обсяги врожаю та перешкоди на шляху руху безпілотної збиральної техніки, що забезпечує оптимальне планування збиральної кампанії.

Список використаних джерел

1. Нагайцев, М. В. «Беспилотные» автомобили – этапы разработки и испытаний / М. В. Нагайцев, А. М. Сайкин, Д. В. Ендачёв // Журнал автомобильных инженеров 2012. – №5 (76) – С. 32-39.
2. Перший безпілотний [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
3. КрАЗ – перший «розумний» український автомобіль. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ria.ru/world/20161006/1478677087.html>, <http://www.autokraz.com.ua/index.php/uk/novini-ta-media/news/item/2839-pershyi-bezpilotnyi-kraz-pershyi-rozumnyi-ukrainskyi-avtomobil>
4. Система автоматического вождения Trimble Autopilot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.poletehnika.com.ua/ru/item/43-sistema_avtomaticheskogo_vozhdeniya_trimble_autopilot.
5. Використання БПЛА для дистанційного зондування посівів під час програмування врожаю / [Лисенко В. П., Опришко О. О., Комарчук Д. С., Пасічник Н. А.] // Науковий вісник НУБіП України. 2016. – Випуск 256. – С. 146-150.
6. Трускавецький, С. Р. Можливості супутникової зйомки в ідентифікації зернових культур харківської області / С. Р. Трускавецький, Л. П. Коляда, О. І. Шерстюк // Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області. 2013. – Випуск 15. – С. 178-183.
7. Балюк, С. А. Солоха, М. О. Методичні рекомендації щодо стану зрошуваних земель та сільськогосподарських культур на базі аерофотозйомки / С. А. Балюк, М. О. Солоха // Завершені наукові розробки – 2013 [за ред. С. А. Балюка]. – Харків: ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського», 2014. – 44 с.
8. Щодо використання бпла для оцінки стану посівів/ [Ачасов А. Б., Ачасова А. О., Титенко Г. В., Селиверстов О. Ю., Седов А. О.] // Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія», 2015. – Випуск 13. – С. 13-18.
9. Підхід до вирішення задачі компромісно-оптимального вибору маршруту руху об'єктів в конфліктному середовищі / С. А. Шворов, А. М. Берназ О. І. Бурчак [та ін.] // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: Київський університет, 2008. – № 19. – С. 63–71.

References

1. Nahaitsev, M., Saikyn, A., Endachev D., (2012) «Bespylotnye» avtomobyly – etapy razrabotky i yspytanyi ["Unmanned" cars - stages of development and testing]. Journal of Automotive Engineers, 5(76), 32–39.
2. The first unmanned, KrAZ - the first "smart" Ukrainian automobile. Available at: <https://ria.ru/world/20161006/1478677087.html>, <http://www.autokraz.com.ua/index.php/uk/novini-ta-media/news/item/2839-pershyy-bezpilotnyi-kraz-pershyy-rozumnyi-ukrainskyi-avtomobil>.
3. Automatic driving system Trimble Autopilot. Available at: http://www.poletehnika.com.ua/ru/item/43-sistema_avtomaticheskogo_vozhdeniya_trimble_autopilot.
4. Lysenko, V., Opryshko, O., Komarchuk, D., Pasichnyk, N., (2016) Vykorystannia BPLA dlia dystantsiinoho zonduvannia posiviv pid chas prohramuvannia vrozhaiu [Using UAV for remote sensing of crops during harvest programming]. Scientific Journal NUBiP Ukraine, 256, 146–150.
5. Truskavetskyi, S., Koliada, L., Sherstiuk, O., (2013) Mozhlyvosti suputnykovoï ziomky v identyfikatsii zernovykh kultur kharkivskoi oblasti [Features satellite imagery to identify crops Kharkiv region]. Herald TSNZ APV Kharkiv region, 15, 178–183.
6. Baliuk, S., Solokha, M., (2014) Metodychni rekomendatsii shchodo stanu zroshuvanykh zemel ta silskohospodarskykh kultur na bazi aerofotoziomky [Guidelines on state land and irrigated crops based on aerial photography]. Kharkov: NSC "ISSAR behalf ON Sokolovsky", 44.
7. Achasov, A., Achasova, A., Tytenko, H., Selyverstov, O., Sedov, A. (2015) Shchodo vykorystannia bpla dlia otsinky stanu posiviv [To use the UAV to assess the condition of crops]. Bulletin of KNU named VN Karazin series "Ecology", 13, 13–18.
8. Shvorov, S., Bernaz, A., Burchak O., (2008) Pidkhid do vyrishennia zadachi kompromisno-optymalnoho vyboru marshrutu rukhu ob'ektiv v konfliktnomu seredovyschu [The approach to solving the problem of compromise, the optimal route selection of objects in a conflict environment]. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, 19, 63–71.

МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ УБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

С. А. Шворов, Д. С. Комарчук, В. Е. Лукин, Д. В. Чирченко

Аннотация. Проанализированы современные тенденции применения беспилотных средств в сельском хозяйстве западных государств. Рассмотрены перспективные инновационные технологии и метод планирования маршрутов беспилотной уборочной техники в зависимости от наличия урожая и препятствий на пути их движения. Сформулированы основные задачи по комплексному применению беспилотных летательных аппаратов и беспилотной уборочной техники для эффективного планирования и сбора урожая.

Ключевые слова: технология, беспилотные летательные аппараты, точное земледелие, планирование маршрутов, управление движением, беспилотная уборочная техника

METHOD FOR PLANNING THE ROUTES OF UNMANNED HARVESTING VEHICLES USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

S. Shvorov, D. Komarchuk, V. Lukin, D. Chyrchenko

Abstract. *The current trends in the use of unmanned vehicles in the agriculture of Western countries are analyzed. Prospective innovative technologies and the method of planning routes for unmanned harvesting equipment are considered depending on the availability of crops and obstacles on their way of travel. The main tasks for the integrated use of unmanned aerial vehicles and unmanned harvesting equipment for effective planning and harvesting are formulated.*

Keywords: *technology, unmanned aerial vehicles, precision agriculture, route planning, traffic control, unmanned harvesting equipment*

УДК 504.064.3:631.589

АЛГОРИТМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ КРАПЕЛЬНОГО ЗРОШЕННЯ В ТЕПЛИЦІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ ПРО СТАН РОСЛИНИ

В. М. РЕШЕТЮК, кандидат технічних наук, доцент
Т. І. ЛЕНДЄЛ, кандидат технічних наук, старший викладач
Б. В. КУЛЯК, аспірант*

**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: kul10@i.ua

Анотація. *Наведено текстовий опис та блок-схему алгоритму прийняття рішень щодо проведення зрошення огірка за вирощування у тепличних умовах.*

Метою роботи є розробка алгоритму прийняття рішень для керування системою краплинного зрошення із використанням інформації про біометричний стан рослини.

Динаміка водного потоку в рослині на фоні змін параметрів навколишнього середовища визначалась за даними системи вимірювання тургорного тиску в листках рослини в режимі реального часу, чутливим елементом якої було вибрано електростатичний (ємнісний) перетворювач. Даний перетворювач реалізований у вигляді сенсора (SG-1000 Leaf Sensor, Agrihouse Inc.). Виходи напруги від сенсорів подавались на виходи багатоканального А/D-перетворювача

* Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент В. М. Решетюк

© В. М. Решетюк, Т. І. Лендєл, Б. В. Куляк, 2017

METHOD FOR PLANNING THE ROUTES OF UNMANNED HARVESTING VEHICLES USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

S. Shvorov, D. Komarchuk, V. Lukin, D. Chyrchenko

Abstract. *The current trends in the use of unmanned vehicles in the agriculture of Western countries are analyzed. Prospective innovative technologies and the method of planning routes for unmanned harvesting equipment are considered depending on the availability of crops and obstacles on their way of travel. The main tasks for the integrated use of unmanned aerial vehicles and unmanned harvesting equipment for effective planning and harvesting are formulated.*

Keywords: *technology, unmanned aerial vehicles, precision agriculture, route planning, traffic control, unmanned harvesting equipment*

УДК 504.064.3:631.589

АЛГОРИТМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ КРАПЕЛЬНОГО ЗРОШЕННЯ В ТЕПЛИЦІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ ПРО СТАН РОСЛИНИ

В. М. РЕШЕТЮК, кандидат технічних наук, доцент
Т. І. ЛЕНДЄЛ, кандидат технічних наук, старший викладач
Б. В. КУЛЯК, аспірант*

**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: kul10@i.ua

Анотація. *Наведено текстовий опис та блок-схему алгоритму прийняття рішень щодо проведення зрошення огірка за вирощування у тепличних умовах.*

Метою роботи є розробка алгоритму прийняття рішень для керування системою краплинного зрошення із використанням інформації про біометричний стан рослини.

Динаміка водного потоку в рослині на фоні змін параметрів навколишнього середовища визначалась за даними системи вимірювання тургорного тиску в листках рослини в режимі реального часу, чутливим елементом якої було вибрано електростатичний (ємнісний) перетворювач. Даний перетворювач реалізований у вигляді сенсора (SG-1000 Leaf Sensor, Agrihouse Inc.). Виходи напруги від сенсорів подавались на виходи багатоканального А/D-перетворювача

* Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент В. М. Решетюк

© В. М. Решетюк, Т. І. Лендєл, Б. В. Куляк, 2017

програмованого пристрою Arduino Mega ADK, який виконує функцію керування системою фітомоніторингу.

У роботі проведено аналіз даних про біометричний стан рослини (тургорний тиск) та мікроклімат в теплиці, отриманих від розробленого вимірювального електротехнічного комплексу (системи фітомоніторингу).

Розроблено алгоритм прийняття рішень для системи автоматичного керування зрошенням із використанням інформації про товщину листка.

Наведено економію використання живильного розчину системою керування зрошення із біометричними даними про рослину порівняно із звичайною системою з часовим режимом, що сягає до 30%.

Ключові слова: алгоритм, режими керування, крапельне зрошення, мікроклімат в теплиці, сенсор, фітомоніторинг

Актуальність. Потенціал тепличного виробництва дозволяє отримувати великі врожаї лише за умов створення оптимального мікроклімату, який досягається розробкою ефективного алгоритму прийняття рішень для системи управління технологічними процесами [8]. В кожній рослині проходить водний обмін речовин, необхідний для підтримки життєдіяльності. Загальний вигляд водного обміну наступний: вода поглинається корінням, піднімається стеблом (ксилемний потік) і через листя потрапляє назовні (транспірація). З даним явищем пов'язані практично всі процеси, які протікають в рослині. Технологічний процес, від якого напряму залежить водний баланс та подача необхідних мікроелементів для забезпечення життєдіяльності рослини – це крапельне зрошення. Створення режиму для керування наведеним вище процесом і пропонується в даній роботі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для спостереження за фізіологічним станом рослин застосовують методологію фітомоніторингу [3, 4], головним завданням якого є діагностика рослин відповідного генотипу за різних ґрунтово-кліматичних умов [2].

Існує декілька способів визначення дефіциту водного живлення рослини.

Нестачу у водному живленні можна визначати за вмістом цукрів в клітинному соку рослини, який визначається рефрактометрично. Недоліком даного варіанту є те, що для аналізу беруться окремі частини рослини. Даний метод не можна застосовувати, коли потрібно визначати стан окремої рослини без порушення її життєдіяльності [5].

Також відомий спосіб визначення дефіциту водного живлення на основі вимірювання різниці температур листка рослини і навколишнього повітря. За даним способом вважається, що рослина потребує води, якщо температура листка на 1-3°C вище температури повітря. Недоліком методу являється те, що критерій оцінки не є цілком адекватним для прийняття рішень щодо необхідності подачі живлення [6].

Для поставленої задачі було вибрано спосіб, за якого дефіцит водного живлення рослини визначається без порушення її життєдіяльності і отримання кількісної оцінки рівня дефіциту, який наведений [7] і полягає у визначенні тургорного тиску листка рослини за допомогою зовнішніх сенсорів.

Мета дослідження – на підставі аналізу даних про біометричний стан рослини та мікроклімат в теплиці, отриманих від раніше розробленого вимірювального електротехнічного комплексу (системи фітомоніторингу), розробити алгоритм прийняття рішень щодо режиму керування виконавчими механізмами системи краплинного зрошення.

Матеріали і методи дослідження. Динаміка водного потоку в рослині на фоні змін параметрів навколишнього середовища визначалась за даними системи вимірювання тургорного тиску в листках рослини в режимі реального часу, чутливим елементом якої було вибрано електростатичний (ємнісний) перетворювач. Даний перетворювач реалізований у вигляді сенсора (SG-1000 Leaf Sensor, Agrihouse Inc.). Виходи напруги від сенсорів подавались на виходи багатоканального A/D-перетворювача програмованого пристрою Arduino Mega ADK, який виконує функцію керування раніше розробленою системою фітомоніторингу [1]. Дані відображались і реєструвались на портативному комп'ютері за допомогою спеціального програмного забезпечення для збору даних, розробленого на базі апаратно-обчислювальної платформи Arduino, основним компонентом для розробки є середовище Processing/Wiring на мові програмування, що є підмножиною C/C++. Сенсори товщини листка були відкалібровані від відомих товщин різних тонких матеріалів та кожен був прикріплений до відповідного листка на рослині. Інформація про товщину листа записувалася у файл з даними кожні 5 сек., де точність вимірювання становила 0,5 ... 1 мкм.

Результати досліджень та їх обговорення. 3 грудня 2015 року по березень 2016 року на дослідній теплиці науково-практичного центру тепличних технологій були проведені дослідження з автоматизованої реєстрації значень зміни тургорного тиску в листках рослин (гібрид огірків Беттіна F1), а також температури та вологості повітря навколо рослин, температури та вологості ґрунту, рівня освітленості та концентрації CO₂ у повітрі. За результатами вимірювань встановлено закономірність зміни товщини листка за різних стресових ситуацій.

На рис. 1 наведено добовий графік коливань товщини листка за відсутності стресових умов навколишнього середовища. Із добового графіка видно, що товщина листка в нічні години (0 ... 6 год.) майже не змінювалась і коливалась біля позначки 150 мкм, але почала зменшуватися близько 6 год. 50 хв. ранку в час сходу сонця. Згідно технології вирощування о 7 год. 30 хв. ранку система керування вмикала крапельне зрошення. Між 9 год. 30 хв. і 13 год. 30 хв. проявились помітні коливання товщини листка – це свідчить про активізацію процесів життєдіяльності у рослині, таких як відновлення водного балансу через коріння, ксилемний потік стеблом рослини, транспірація та фотосинтез.

Біля 15 години спостерігалася мінімальна товщина листка, близько 130 мкм, що пояснюється прискореним вивільненням вологи рослини (транспірація) у зв'язку з піковим значенням денної температури. Завершення процесу фотосинтезу сповільнило транспірацію і зазначене дало змогу накопичувати воду в рослині, тому на графіку спостерігається збільшення товщини листка із 19 год. до 23 год. А в подальші нічні години значення товщини листка залишалось майже не змінним.



Рис. 1. Добовий графік товщини листка за відсутності стресових умов навколишнього середовища (24.02.2016 р.)

Провівши вище наведені вимірювання, було отримано дані товщини листка (130...150 мкм) без стресових ситуацій та за звичайного режиму крапельного зрошення за таймером.

Потім були проведені дослідження із використанням вище проаналізованої інформації про товщину листка – як вхідний параметр для системи зрошення, а не за часовим режимом. Відсоток порогового рівня зрошення варіювався від 5 до 30% з кроком 5%, враховуючи максимальну товщину листа та змінювався автоматично у момент запуску процесу зрошення.

Враховуючи граничний рівень зрошення проводилося вмикання системи автоматичного регулювання процесу поливу. Нами визначено, що рівень зрошення в межах 5-15% не може бути використаний за зрошення, оскільки товщина листа знаходиться у необхідних межах. В ході експерименту товщина листка зменшувалася до 20% нижче максимального значення для визначення закономірності зміни зменшення товщини листа від дефіциту води протягом добових коливань, що дозволить використовувати цю інформацію для ініціювання запуску автоматичної системи крапельного зрошення.

Для керування системою крапельного зрошення за фізіологічним станом рослин було підібрано алгоритм, котрий виконуватиме зазначені обмеження:

1) зрошення починаються тоді, коли рівень значення товщини листка (k) знижується більш ніж на 20% ($k > 20$) по відношенню до заданого максимального значення;

2) зрошення, з метою усунення водного дефіциту у рослині, в денні години відбуваються за температурі повітря більше $+18^{\circ}\text{C}$ та вологості ґрунту менше 85%;

3) зрошення вимикається за падіння температури нижче $+18^{\circ}\text{C}$ та зниження вологості повітря 65% і ґрунту менше 60% ,так як ці значення виходять за рекомендовані агротехнічні норми вирощування;

4) зрошення вимикають у разі досягненні значення $k < 20$;

5) обов'язковою умовою проведення крапельного зрошення є переривчастий цикл роботи системи (зрошення-пауза).

На основі обмежень створено алгоритм прийняття рішень автоматичного керування системою крапельного зрошення.

За умови забезпечення процесу зрошення вимірюються параметри:

s – товщина листка рослини (приймає значення рівне 0, якщо $k < 20$, та дорівнює 1, якщо $k > 20$); T – температура повітря, $^{\circ}\text{C}$; H – відносна вологість повітря, %; G – відносна вологість ґрунту, %.

На блок-схемі (рис. 2) наведено такі позначення:

- умова №1: ($T \geq 18^{\circ}\text{C}$) AND ($H \geq 65\%$) AND ($G \geq 60\%$);
- умова №2: ($G \geq 85\%$);
- умова №3: ($s = 0$).

Помилка: сигналізує про параметри мікроклімату, які недопустимі для вирощування рослин, що вказує на несправність системи автоматичного керування мікрокліматом в теплиці.

Складений алгоритм роботи системи керування наведено блок-схемою на рис. 2.

На схемі представлений алгоритм прийняття рішень для необхідності увімкнення зрошення за даними про біометричний стан рослини (тургорний тиск в листках) та параметрів мікроклімату в теплиці. Вимірювання параметрів проводиться через зведені до мінімуму проміжки часу.

Змінна алгоритму для увімкнення/вимкнення зрошенням:

- *irrigation* – змінна, що приймає значення 0, якщо зрошення вимкнено та дорівнює 1, якщо зрошення увімкнено;
- якщо товщина листка менша від заданого значення ($s = 1$), то систему зрошення потрібно увімкнути, і в протилежному випадку ($s = 0$) систему необхідно вимкнути.

Наведений алгоритм прийняття рішень реалізований в середовищі Processing/Wiring на базі апаратно-обчислювальної платформи Arduino.

Після розробки алгоритму прийняття рішень для нового режиму, було проведено дослідження, що спрямоване на визначення витрат живильного розчину за стандартного керування за таймером та за автоматичного керування зрошенням з використанням інформації про товщину листка, результати якого наведені нижче (рис. 3).

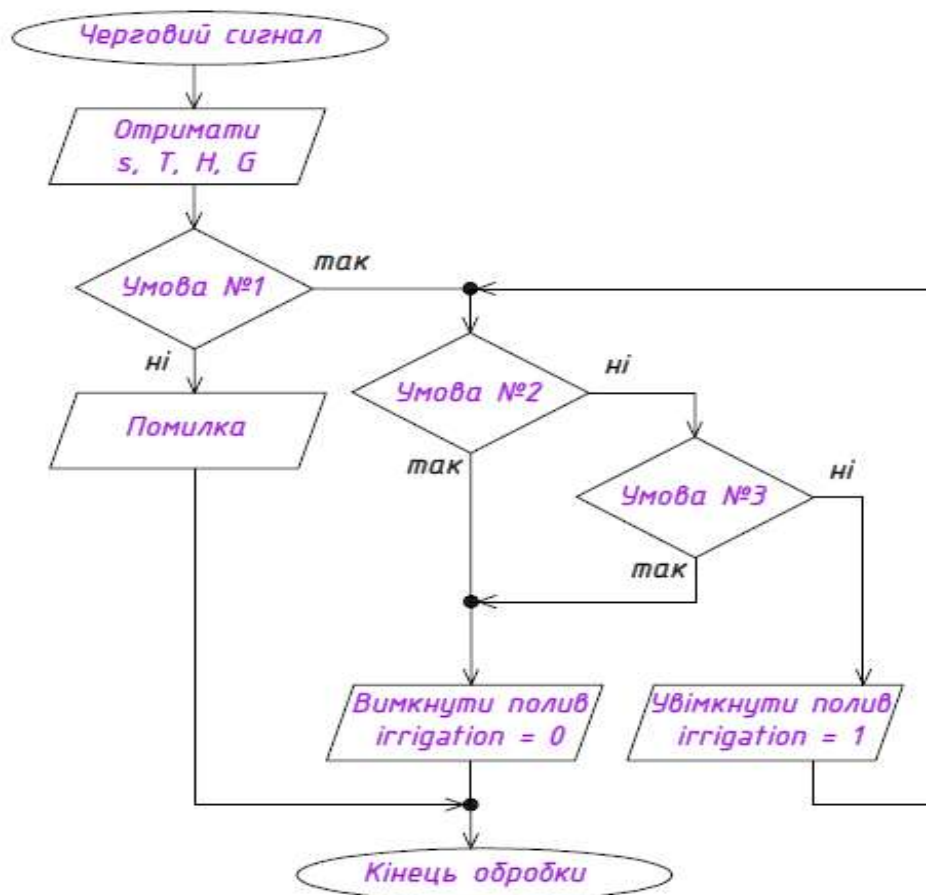


Рис. 2. Блок-схема процесу керування режимом крапельного зрошення

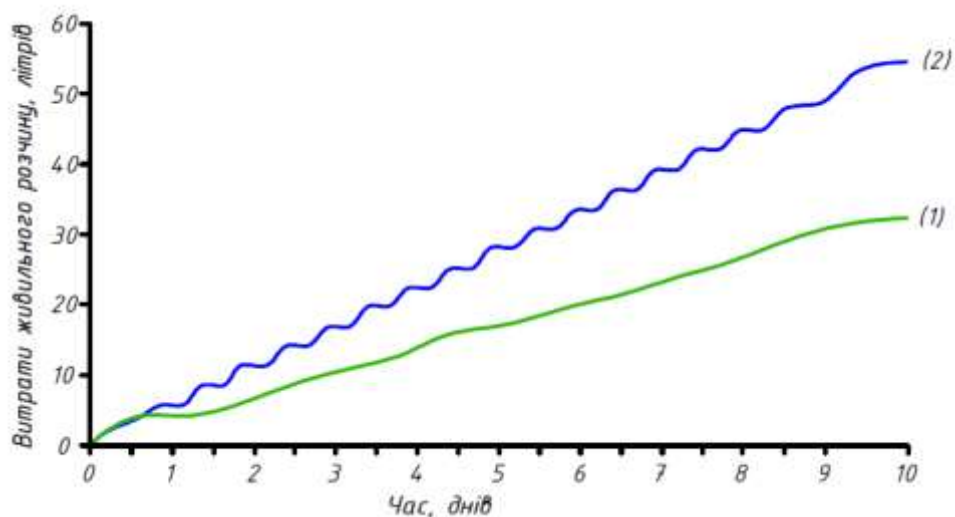


Рис. 3. Сукупні витрати живильного розчину системою 1 з використанням інформації про товщину листка для автоматичного зрошення порівняно із системою 2 зрошення за часовим режимом

Аналізуючи дані із систем, отримуємо результати: системою керування за часовим режимом було використано 55 літрів живильного розчину протягом 10 днів, у свою чергу, системою керування із даними від

сенсора товщини листка було витрачено 32 літри розчину для живлення рослин.

Таким чином, автоматизованій системі зрошення з використанням інформації від сенсорів товщини листа та з розробленим алгоритмом прийняття рішень потрібно в середньому лише 70% живильного розчину від використаного розчину системою із таймерним режимом зрошення.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведено аналіз даних про біометричний стан рослини (тургорний тиск) та мікроклімат в теплиці, отриманих від розробленого вимірювального електротехнічного комплексу (системи фітомоніторингу). Визначено, що тургорний тиск (товщина листка) рослини, залежить від обраного режиму керування системою зрошення.

Розроблено алгоритм прийняття рішень для системи автоматичного керування зрошенням із використанням інформації про товщину листка.

Наведено економію використання живильного розчину системою керування зрошення із біометричними даними про рослину порівняно із звичайною системою з часовим режимом, що сягає до 30%.

Надалі передбачається розробка алгоритму прийняття рішень для системи автоматичного керування іншими технологічними процесами в теплиці з метою зменшення витрат електроенергії технічними засобами.

Список використаних джерел

1. Вимірювальний електротехнічний комплекс для моніторингу параметрів біометричного стану рослини та мікроклімату в теплиці / В. М. Решетюк, Т. І. Лендел, Б. В. Куляк // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2016. – Вип. 176. – С. 51–53.
2. Ильницкий, О. А. Основы фитомониторинга / О. А. Ильницкий, М. Ф. Бойко, М. И. Федорчук [и др.] – Херсон, 2005. – 345 с.
3. Лисенко, В. П. Фітотемпературний критерій оцінки розвитку рослини / В. П. Лисенко, І. М. Болбот, Т. І. Лендел. // Енергетика і автоматика. – 2013. – №3. – С. 122-128.
4. Радченко, С. С. Фитомониторинг и диагностика / С. С. Радченко // Биопизика растений и фитомониторинг: сб. науч. трудов. – Ленинград: АФИ, 1990. – С.11-27.
5. Способ диагностирования сроков и норм полива виноградников. Патент Российской Федерации МПК A01G25/00 [Текст] / Мусаев И. А., Салманов М. М., Караев М. К. – №2257706; заявка 25.11.2002; опубл. 10.08.2011.
6. Способ определения сроков полива при мелкодисперсном дождевании. Патент Российской Федерации МПК A01G25/00 [Текст] / Грамматикати О. Г.; Кузнецова Е. И. – №2113110; заявка 25.10.1995; опубл. 20.06.1998.
7. Hans-Dieter Seelig, J. Stoner II Richard, Alexander Hoehn, William Walter Adams, III (2010) Phytometric intelligence sensors. US patent. № 7660698 B1; app. 11/714,490; published 9.02.2010.
8. Korobiichuk, I., Lysenko, V., Reshetiuk, V., Lendiel, T., Kamiński, M. (2016). Energy-Efficient Electrotechnical Complex of Greenhouses with Regard to Quality of

Vegetable Production. In International Conference on Systems, Control and Information Technologies. – 2016 (pp. 243-251). Springer International Publishing.

References

1. Reshetiuk, V. M., Lendiel, T. I., Kuliak, B. V. (2016) Vymiriuvalnyy elektrotekhnichnyi kompleks dlia monitorynhu parametriv biometrychnoho stanu roslyny ta mikroklimatu v teplytsi [Measuring range of electrical parameters for monitoring the state of biometric plants and microclimate in the greenhouse] Kharkov, Ukraine: Visnyk KNTUSH im. P. Vasylenka, 51–53.
2. Ylnytskyi, O. A., Boiko, M. F., Fedorchuk, M. Y. (2005) Osnovy fitomonytorynha [Basics of phytomonitoring] Kherson, Ukraine, 345.
3. Lysenko, V. P., Bolbot, I. M., Lendiel, T. I. (2013) Fitotemperaturnyi kryterii otsinky rozvytku roslyny [Phyto-temperature criterion for evaluation of plant] Kyiv, Ukraine: Enerhetyka i avtomatyka, 3, 122–128.
4. Radchenko, S. S. (1990) Fytomonytorynh i dyahnostyka [Phytomonitoring and diagnostics] Leningrad, Russia: AFY, 11–27.
5. Musaev, Y. A., Salmanov, M. M., Karaev M. K. (2002) Method for diagnosing the timing and norms of watering vineyards. Patent of the Russian Federation IPC. A01G25/00. №2257706; declared 25.11.2002; published 10.08.2011.
6. Hrammatykaty, O. H.; Kuznetsova, E. Y. (1998) Method for determining the timing of irrigation with fine sprinkling. Patent of the Russian Federation IPC. A01G25/00. №2113110; declared 25.10.1995; published 10.08.2011.
7. Hans-Dieter Seelig, J. Stoner II Richard, Alexander Hoehn, William Walter Adams, III (2010) Phytometric intelligence sensors. US patent. № 7660698 B1; app. 11/714,490; published 9.02.2010.
8. Korobiichuk, I., Lysenko, V., Reshetiuk, V., Lendiel, T., Kamiński, M. (2016). Energy-Efficient Electrotechnical Complex of Greenhouses with Regard to Quality of Vegetable Production. In International Conference on Systems, Control and Information Technologies, 243-251. Springer International Publishing.

АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ В ТЕПЛИЦАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИИ РАСТЕНИЯ

В. М. Решетюк, Т. І. Лендєл, Б. В. Куляк

Аннотация. Приведены текстовое описание и блок-схема алгоритма принятия решений о проведении орошения огурца при выращивании в тепличных условиях.

Целью работы является разработка алгоритма принятия решений для управления системой капельного орошения с использованием информации о биометрическом состоянии растения.

В работе исследована динамика водного потока в растении на фоне изменений параметров окружающей среды, которые определялись по данным системы измерения тургорного давления в листьях растения в режиме реального времени, чувствительным элементом которого был выбран электростатический (емкостный) преобразо-

ватель. Данный преобразователь реализован в виде сенсора (SG-1000 Leaf Sensor, Agrihouse Inc.). Выходы напряжения от сенсоров подавались на выходы многоканального А / D-преобразователя программируемого устройства Arduino Mega ADK, который выполняет функцию управления системой фитомониторинга.

В статье проведен анализ данных о биометрическом состоянии растения (тургорного давления) и микроклимата в теплице, полученных от разработанного измерительного электротехнического комплекса (системы фитомониторинга).

Разработан алгоритм принятия решений для системы автоматического управления орошением с использованием информации о толщине листа.

Выявлена экономия использования питательного раствора системой управления орошения с биометрическими данными о растении по сравнению с обычной системой с временным режимом и которая достигает 30%.

Ключевые слова: алгоритм, режимы управления, капельное орошение, микроклимат в теплице, сенсор, фитомониторинг

ALGORITHM OF DECISION-MAKING FOR IRRIGATION IN GREENHOUSES USING INFORMATION ON PLANT CONDITION

V. Reshetiuk, T. Lendiel, B. Kuliak

Abstract. A textual description and a block diagram of the algorithm for making decisions on irrigation of cucumber during growing in greenhouse conditions are given.

The aim of the work is the development of a decision algorithm for controlling the drip irrigation system using information on the biometric state of the plant.

Materials and methods of research. The dynamics of the water flow in the plant against the background of changes in the environmental parameters was determined from the data of the system for measuring turgor pressure in plant leaves in real time, the sensitive element of which was an electrostatic (capacitive) converter. This re-engraving is realized in the form of a sensor (SG-1000 Leaf Sensor, Agrihouse Inc.). The voltage outputs from the sensors were fed to the outputs of the multichannel A / D converter of the Arduino Mega ADK programmable device, which performs the function of controlling the phytomonitoring system.

Conclusions and prospects. The data on the biometric state of the plant (turgid pressure) and the microclimate in the greenhouse obtained from the developed measuring electrotechnical complex (phytomonitoring system) were analyzed.

A decision algorithm for the automatic irrigation control system was developed with the use of sheet thickness information.

The economy of the use of a nutrient solution by the irrigation management system with biometric data on the plant as compared with a conventional system with a time regime reaches 30%.

Keywords: *algorithm, control modes, drip irrigation, microclimate in the greenhouse, sensor, phytomonitoring*

УДК 514.18

НЕПЕРЕВНЕ ЗГИНАННЯ МІНІМАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ, УТВОРЕНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕВОЛЬВЕНТИ КОЛА, ЗАДАНОЇ ФУНКЦІЯМИ НАТУРАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА

С. Ф. ПИЛИПАКА, доктор технічних наук, професор

М. М. МУКВИЧ, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: engmech_centre@twin.nauu.kiev.ua

Анотація. У цій статті здійснено аналітичний опис ізотропних ліній та мінімальних поверхонь за допомогою функцій комплексної змінної. Для знаходження рівнянь ізотропних ліній використано параметричні рівняння евольвенти кола, заданої функціями натурального параметра. Аналітичний опис мінімальних поверхонь та приєднаних мінімальних поверхонь здійснено у комплексному просторі з ізотропними лініями у ролі ліній сітки переносу. За згинання мінімальних поверхонь знайдено однопараметричну множину асоційованих мінімальних поверхонь. Наведено вирази коефіцієнтів першої та другої квадратичних форм утворених мінімальних поверхонь. Показано, що евольвента кола, задана функціями натурального параметра, належить утвореним мінімальним поверхням.

У загальному випадку для будь-якої плоскої кривої, яку задано параметричними рівняннями натурального параметра, можна знайти аналітичний опис ізотропної лінії нульової довжини. Кожній ізотропній лінії відповідає мінімальна поверхня та приєднана мінімальна поверхня, які допускають неперервне згинання. Використання функцій комплексної змінної дозволяє отримати нескладний аналітичний опис мінімальних поверхонь та досліджувати їх конструктивні геометричні параметри.

Перспективи подальших досліджень полягають у визначенні диференціальних характеристик утворених мінімальних поверхонь для оптимізації інженерних методів проектування поверхонь технічних форм.

Ключові слова: ізотропна лінія, мінімальна поверхня, приєднана мінімальна поверхня, асоційована мінімальна поверхня, евольвента кола, квадратична форма поверхні, згинання поверхні, функція комплексної змінної

The economy of the use of a nutrient solution by the irrigation management system with biometric data on the plant as compared with a conventional system with a time regime reaches 30%.

Keywords: *algorithm, control modes, drip irrigation, microclimate in the greenhouse, sensor, phytomonitoring*

УДК 514.18

НЕПЕРЕВНЕ ЗГИНАННЯ МІНІМАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ, УТВОРЕНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕВОЛЬВЕНТИ КОЛА, ЗАДАНОЇ ФУНКЦІЯМИ НАТУРАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА

С. Ф. ПИЛИПАКА, доктор технічних наук, професор

М. М. МУКВИЧ, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: engmech_centre@twin.nauu.kiev.ua

Анотація. У цій статті здійснено аналітичний опис ізотропних ліній та мінімальних поверхонь за допомогою функцій комплексної змінної. Для знаходження рівнянь ізотропних ліній використано параметричні рівняння евольвенти кола, заданої функціями натурального параметра. Аналітичний опис мінімальних поверхонь та приєднаних мінімальних поверхонь здійснено у комплексному просторі з ізотропними лініями у ролі ліній сітки переносу. За згинання мінімальних поверхонь знайдено однопараметричну множину асоційованих мінімальних поверхонь. Наведено вирази коефіцієнтів першої та другої квадратичних форм утворених мінімальних поверхонь. Показано, що евольвента кола, задана функціями натурального параметра, належить утвореним мінімальним поверхням.

У загальному випадку для будь-якої плоскої кривої, яку задано параметричними рівняннями натурального параметра, можна знайти аналітичний опис ізотропної лінії нульової довжини. Кожній ізотропній лінії відповідає мінімальна поверхня та приєднана мінімальна поверхня, які допускають неперервне згинання. Використання функцій комплексної змінної дозволяє отримати нескладний аналітичний опис мінімальних поверхонь та досліджувати їх конструктивні геометричні параметри.

Перспективи подальших досліджень полягають у визначенні диференціальних характеристик утворених мінімальних поверхонь для оптимізації інженерних методів проектування поверхонь технічних форм.

Ключові слова: ізотропна лінія, мінімальна поверхня, приєднана мінімальна поверхня, асоційована мінімальна поверхня, евольвента кола, квадратична форма поверхні, згинання поверхні, функція комплексної змінної

Актуальність. Дослідження методів аналітичного опису мінімальних поверхонь є важливою проблемою геометричного моделювання поверхонь технічних форм та архітектурних конструкцій. Мінімальна поверхня, яка проходить через замкнену плоску або просторову лінію, має найменшу площу. Геометрична форма мінімальної поверхні забезпечує рівномірний розподіл зусиль в оболонці та додаткову жорсткість [1, с. 43].

Знаходження аналітичного опису мінімальної поверхні, яка проходить через замкнену лінію, зводиться до розв'язування нелінійного диференціального рівняння Ейлера-Лагранжа у частинних похідних, яке у загальному випадку не інтегрується [2, с. 683]. Тому одним із напрямів сучасних досліджень є удосконалення чисельних методів розв'язування диференціального рівняння Ейлера-Лагранжа [3, 4].

Для знаходження аналітичного опису мінімальних поверхонь існує інший напрям наукових досліджень, пов'язаний із використанням властивостей функцій комплексної змінної, що дозволяє отримати параметричні рівняння мінімальних поверхонь, досліджувати їх диференціальні характеристики, оптимізувати інженерні методи проектування поверхонь технічних форм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для знаходження аналітичного опису мінімальних поверхонь за допомогою функцій комплексної змінної необхідно визначити параметричні рівняння ізотропної лінії нульової довжини [5]. Метод аналітичного опису ізотропних кривих, які лежать на поверхнях обертання, віднесених до сітки ізометричних ліній, реалізовано у роботах [6, 7]. Дослідження, опубліковані у статті [8], присвячені задачі аналітичного опису ізотропних кривих за допомогою логарифмічної спіралі – їх горизонтальної проекції. Слід зазначити, що потребує дослідження аналітичний опис ізотропних ліній за допомогою плоских кривих, заданих функціями натурального параметра.

Мета дослідження – знайти аналітичний опис ізотропної лінії за допомогою евольвенти кола, заданої функціями натурального параметра. За допомогою знайденої ізотропної лінії визначити однопараметричну множину асоційованих мінімальних поверхонь, які допускають неперервне згинання.

Матеріали і методи дослідження. Аналітичний опис мінімальних поверхонь здійснено у комплексному просторі з твірними ізотропними лініями переносу.

Результати дослідження та їх обговорення. Розглянемо плоску криву, задану параметричними рівняннями від довжини її дуги s :

$$x = x(s); y = y(s), \quad (1)$$

де s – натуральний параметр плоскої кривої, тоді [6]: $\left(\frac{dx}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dy}{ds}\right)^2 = 1$.

Просторова крива, задана рівняннями:

$$x = x(s); y = y(s); z = i \cdot s, \quad (2)$$

де i – уявна одиниця.

Дана крива є уявною ізотропною кривою нульової довжини, бо її диференціал дуги дорівнює:

$$\sqrt{\left(\frac{dx}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dy}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dz}{ds}\right)^2} \cdot ds = 0.$$

Для знаходження рівнянь мінімальної та приєднаної до неї мінімальної поверхні необхідно в параметричних рівняннях ізотропної кривої (2) увести заміну [6]: $s = u + i \cdot v$. Тоді отримаємо параметричні рівняння мінімальної поверхні $X(u, v), Y(u, v), Z(u, v)$:

$$X(u, v) = \operatorname{Re} x(u + i \cdot v); Y(u, v) = \operatorname{Re} y(u + i \cdot v); Z(u, v) = \operatorname{Re} i \cdot x(u + i \cdot v) + i \cdot y(u + i \cdot v); \quad (3)$$

та приєднаної мінімальної поверхні $X^*(u, v), Y^*(u, v), Z^*(u, v)$:

$$X^*(u, v) = \operatorname{Im} x(u + i \cdot v); Y^*(u, v) = \operatorname{Im} y(u + i \cdot v); Z^*(u, v) = \operatorname{Im} i \cdot x(u + i \cdot v) + i \cdot y(u + i \cdot v). \quad (4)$$

Кількість плоских кривих, параметричні рівняння яких можна записати за допомогою функцій натурального параметра – обмежена, але для кожної з них можна знайти аналітичний опис мінімальної (3) та приєднаної мінімальної поверхні (4), причому мінімальна поверхня (3) буде проходити через плоску криву (1).

Розглянемо евольвенту кола, задану рівняннями від натурального параметра s :

$$x(s) = a \cos\left(\sqrt{\frac{2s}{a}}\right) + a \cdot \sqrt{\frac{2s}{a}} \sin\left(\sqrt{\frac{2s}{a}}\right); y(s) = a \sin\left(\sqrt{\frac{2s}{a}}\right) - a \cdot \sqrt{\frac{2s}{a}} \cos\left(\sqrt{\frac{2s}{a}}\right), \quad (5)$$

де $a > 0$ – радіус кола.

Тоді рівняння ізотропної кривої, горизонтальною проекцією якої є евольвента кола (5), має вигляд:

$$\begin{aligned} x(s) &= a \cos\left(\sqrt{\frac{2s}{a}}\right) + a \cdot \sqrt{\frac{2s}{a}} \sin\left(\sqrt{\frac{2s}{a}}\right); \\ y(s) &= a \sin\left(\sqrt{\frac{2s}{a}}\right) - a \cdot \sqrt{\frac{2s}{a}} \cos\left(\sqrt{\frac{2s}{a}}\right); \quad z(s) = i \cdot s. \end{aligned} \quad (6)$$

Уведемо заміну $s = u + i \cdot v$, тоді, відокремивши дійсну та уявну частину для кожної з функцій, згідно (3), (4), маємо рівняння мінімальної поверхні:

$$\begin{aligned} X(u, v) &= a \cdot \operatorname{ch}(m \cdot \sin \alpha) \cdot \cos(m \cdot \cos \alpha) + m \cdot \cos \alpha \cdot \sin(m \cdot \cos \alpha) - \\ &\quad - a \cdot m \cdot \cos(m \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{sh} m \sin \alpha; \\ Y(u, v) &= a \cdot \operatorname{ch}(m \cdot \sin \alpha) \cdot \sin(m \cdot \cos \alpha) - m \cdot \cos \alpha \cdot \cos(m \cdot \cos \alpha) - \\ &\quad - a \cdot m \cdot \sin(m \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{sh} m \sin \alpha; \\ Z(u, v) &= -v, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{де } \alpha = \alpha(u, v) = \frac{1}{2} \cdot \arctg\left(\frac{v}{u}\right); \quad m = m(u, v) = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{u^2 + v^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{4}}.$$

Рівняння приєднаної мінімальної поверхні:

$$X^*(u, v) = a \cdot \operatorname{sh}(m \cdot \sin \alpha) \cdot (-\sin(m \cdot \cos \alpha) + m \cdot \cos \alpha \cdot \cos(m \cdot \cos \alpha)) + a \cdot m \cdot \sin(m \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{ch} m \sin \alpha;$$

$$Y^*(u, v) = a \cdot \operatorname{sh}(m \cdot \sin \alpha) \cdot (\cos(m \cdot \cos \alpha) + m \cdot \cos \alpha \cdot \sin(m \cdot \cos \alpha)) - a \cdot m \cdot \cos(m \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{ch} m \sin \alpha;$$

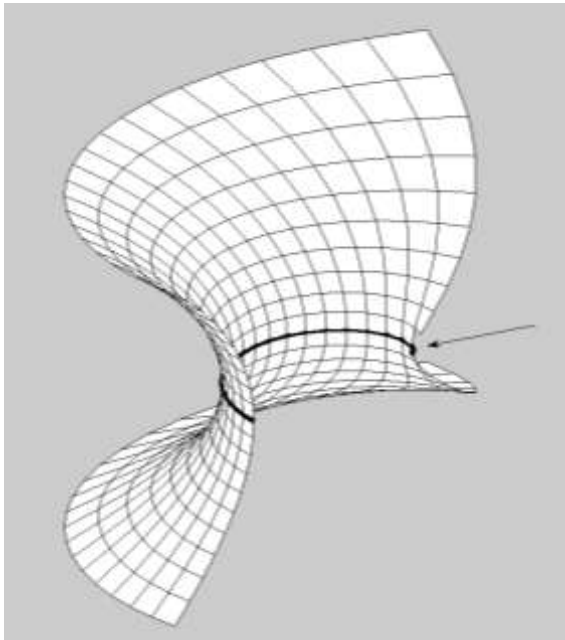
$$Z^*(u, v) = u,$$

(8)

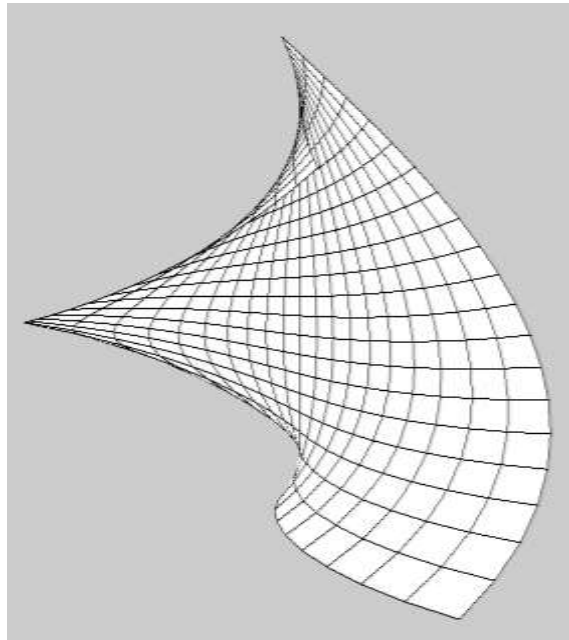
$$\text{де } \alpha = \alpha(u, v) = \frac{1}{2} \cdot \arctg\left(\frac{v}{u}\right); \quad m = m(u, v) = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{u^2 + v^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{4}}.$$

На рис. 1 зображено відсіки мінімальної та приєднаної поверхонь, побудованих за рівняннями (7) і (8) відповідно за $a=2$; $u \in 0; \dots; 20$; $v \in -10; \dots; 10$. На рис. 1,а стрілкою позначена потовщена евольвента кола. Коефіцієнти першої квадратичної форми мінімальної поверхні (7) та приєднаної поверхні (8) дорівнюють:

$$E = G = \operatorname{ch}^2 \left(\sqrt{2} \cdot \left(\frac{u^2 + v^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \sin \left(\frac{1}{2} \arctg \frac{v}{u} \right) \right); \quad F = 0. \quad (9)$$



а



б

Рис. 1. Відсіки мінімальних поверхонь, побудованих за допомогою ізотропної кривої, горизонтальною проекцією якої є евольвента кола:

а) відсік мінімальної поверхні, побудованої за рівняннями (7);

б) відсік приєднаної мінімальної поверхні, побудованої за рівняннями (8)

Коефіцієнти другої квадратичної форми мінімальної поверхні (7), знайдені за відомими формулами диференціальної геометрії [6], дорівнюють:

$$L = -N = \frac{a \cdot \left(\frac{u^2 + v^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left[u^2 - v^2 \cos \left(\frac{3}{2} \operatorname{arctg} \frac{v}{u} \right) + 2uv \sin \left(\frac{3}{2} \operatorname{arctg} \frac{v}{u} \right) \right]}{\sqrt{2} (u^2 + v^2)^{\frac{3}{2}}};$$

$$M = \frac{a \cdot \left(\frac{u^2 + v^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left[u^2 - v^2 \sin \left(\frac{3}{2} \operatorname{arctg} \frac{v}{u} \right) - 2uv \cos \left(\frac{3}{2} \operatorname{arctg} \frac{v}{u} \right) \right]}{\sqrt{2} (u^2 + v^2)^{\frac{3}{2}}}.$$
(10)

Коефіцієнти другої квадратичної форми приєднаної мінімальної поверхні (8), дорівнюють:

$$L^* = -N^* = M; \quad M^* = L.$$

Коефіцієнти першої та другої квадратичних форм побудованих поверхонь (7) та (8), перетворюють вираз середньої кривини H для кожної із вказаних поверхонь до нуля:

$$H = \frac{E \cdot N - 2 \cdot F \cdot M + G \cdot L}{2(E \cdot G - F^2)}.$$

Утворені мінімальні поверхні (7) та (8), маючи рівні відповідні вирази коефіцієнтів першої квадратичної форми, допускають неперервне згинання одна на одну. Рівняння однопараметричної множини асоційованих мінімальних поверхонь мають вигляд [8]:

$$\begin{aligned} X_\varphi(u, v) &= X(u, v) \cdot \cos \varphi + X^*(u, v) \cdot \sin \varphi; \\ Y_\varphi(u, v) &= Y(u, v) \cdot \cos \varphi + Y^*(u, v) \cdot \sin \varphi; \\ Z_\varphi(u, v) &= Z(u, v) \cdot \cos \varphi + Z^*(u, v) \cdot \sin \varphi, \end{aligned}$$
(11)

де $X(u, v), Y(u, v), Z(u, v)$ – параметричні рівняння мінімальної поверхні (7);

$X^*(u, v), Y^*(u, v), Z^*(u, v)$ – параметричні рівняння приєднаної мінімальної поверхні (8);

$$\varphi - \text{параметр згинання поверхонь, } \varphi \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right].$$

За $\varphi = 0$ рівняння (11) задають мінімальну поверхню (7), за $\varphi = \frac{\pi}{2}$ рівняння (11) задають приєднану мінімальну поверхню (8), а за інших значень $\varphi \in \left(0; \frac{\pi}{2} \right)$ рівняння (11) задають асоційовані мінімальні поверхні.

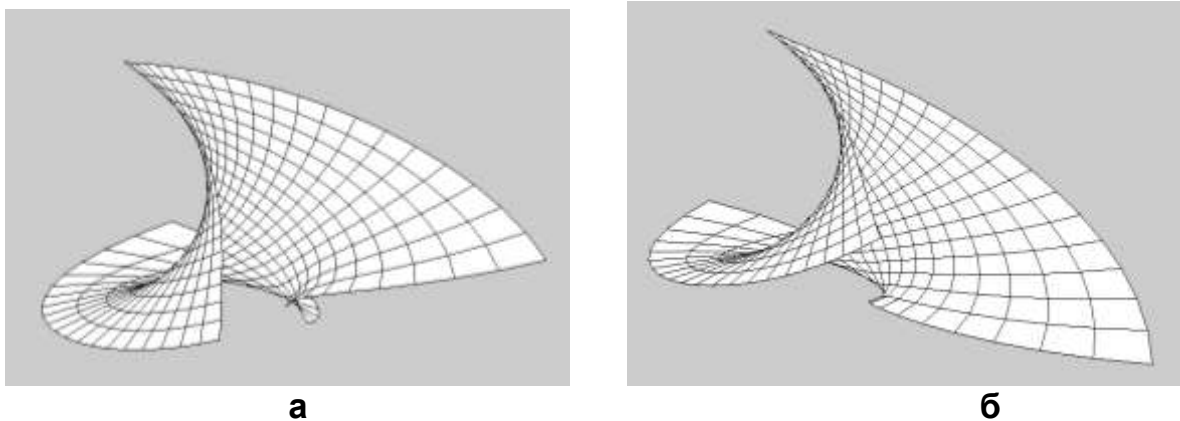


Рис. 2. Відсіки множини асоційованих мінімальних поверхонь, отриманих за рівняннями (11): а) за $\varphi = \frac{\pi}{4}$; б) за $\varphi = \frac{3\pi}{8}$

На рис. 2 зображено відсіки асоційованих мінімальних поверхонь, отриманих за рівняннями (11) для різних значень параметра φ за неперервного згинання мінімальної поверхні (7) до приєднаної мінімальної поверхні (8), побудовані за $a=2$; $u \in 0; \dots; 20$; $v \in -10; \dots; 10$. Усі побудовані асоційовані мінімальні поверхні мають рівні відповідні вирази (9) коефіцієнтів першої квадратичної форми.

Використання плоских кривих, заданих параметричними рівняннями натурального параметра, дозволяє отримати порівняно нескладний аналітичний опис мінімальних поверхонь для подальших досліджень їх диференціальних властивостей.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Для будь-якої плоскої кривої, яку задано параметричними рівняннями натурального параметра, можна знайти аналітичний опис ізотропної лінії нульової довжини. Кожній ізотропній лінії відповідає мінімальна поверхня та приєднана мінімальна поверхня, які допускають неперервне згинання. Перспективи подальших досліджень полягають у дослідженні диференціальних характеристик утворених мінімальних поверхонь та оптимізації інженерних методів проектування поверхонь технічних форм.

Список використаних джерел

1. Михайленко, В. Е. Конструирование форм современных архитектурных конструкций [Текст] / В. Е. Михайленко, С. Н. Ковалёв. – К.: Будівельник, 1978. – 112 с.
2. Математическая энциклопедия [Текст] / [гл. ред. И. М. Виноградов]. – Т. 3. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1982. – С. 683–690.
3. Гацунаев, М. А. О равномерной сходимости кусочно-линейных решений уравнения минимальной поверхности [Текст] / М. А. Гацунаев, А. А. Клячин // Уфимский математич. журнал. – 2014. – Т. 6. – №3. – С. 3–16.
4. Hwang, Jenn-Fang. A uniqueness theorem for the minimal surface equation [Text] // Pacific Journal of Mathematics. 1996. №176(2).– 357–364.
5. Фиников, С. П. Теория поверхностей [Текст] / С. П. Фиников. – М. – Л.: ГТТИ, 1934. – 206 с.

6. Пилипака, С. Ф. Аналітичний опис ізотропних ліній на поверхні псевдосфери та побудова мінімальних поверхонь [Текст] / С. Ф. Пилипака, М. М. Муквич // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – 2016. – №254. – С. 202–210.

7. Пилипака, С. Ф. Конструирование минимальных поверхностей с помощью изотропных кривых, лежащих на поверхности тора [Текст] / С. Ф. Пилипака, Н. Н. Муквич // An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery «MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture»/ Polish Academy of Sciences, University of Engineering and Economics in Rzeszow, University of Life Sciences in Lublin.– Vol. 18, No 3. – Lublin – Rzeszow, 2016. – С. 101 – 110.

8. Пилипака, С. Ф. Утворення ізотропних ліній та мінімальних поверхонь за допомогою плоских кривих, заданих функціями натурального параметра [Електронний ресурс] / С. Ф. Пилипака, М. М. Муквич // Наукові доповіді НУБіП України. – 2016. – №7 (64). Режим доступу : <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/7734>

References

1. Mikhailenko, V. E., Kovalev, S. N. (1978). Konstruirovaniye form sovremennykh arkhitekturnykh konstruksiy [Construction of forms of modern architectural structures]. Kiev: Budivel'nyk, 112.

2. Matematicheskaya entsyklopediya. (1982). [Encyclopedia of mathematics]. Moscow: Sovetskaya entsyklopediya, 683–690.

3. Hatsunaev, M. A., Klyachin, A. A. (2014). O ravnomernoy skhodimosti kusochno-lineynykh resheniy uravneniya minimal'noy poverkhnosti [On uniform convergence of piecewise-linear solutions to minimal surface equation]. Ufimskiy matematychny zhurnal, 6(3), 3–16.

4. Hwang, Jenn-Fang. (1996). A uniqueness theorem for the minimal surface equation. Pacific Journal of Mathematics, 176(2), 357–364.

5. Finikov, S. P. (1934). Teoriya poverkhnostey [Theory of surfaces]. Moskva–Leningrad: HTTI, 206.

6. Pylypaka, S. F., Mukvych, M. M. (2016). Analitychni opys izotropnykh liniy na poverkhnii psevdosfery ta pobudova minimalnykh poverkhon [Analytical description isotropic line on surface pseudosphere and construction minimal surfaces]. Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriya: tekhnika ta enerhetyka APK, 254, 202–210.

7. Pilipaka, S.F. (2016). Konstruirovaniye minimal'nykh poverkhnostey s pomoshh'yu izotropnykh krivykh, lezhashchih na poverkhnosti tora [Construction a minimal surfaces using isotropic curves lying on the surface of a torus]. An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery «MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture»/ Polish Academy of Sciences, University of Engineering and Economics in Rzeszow, University of Life Sciences in Lublin, 18(3), 101 – 110.

8. Pylypaka, S. F., Mukvych, M. M. (2016). Utvorennia izotropnykh liniy ta minimalnykh poverkhon za dopomohoiu ploskykh kryvykh, zadanykh funktsiyamy naturalnoho parametra [Modelling of isotropic lines and minimal surfaces with a help of flat curves, given by natural parameter functions]. Naukovi dopovidi NUBiP Ukrainy, 7 (64). Available at: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/7734>

НЕПРЕРЫВНОЕ ИЗГИБАНИЕ МИНИМАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ОБРАЗОВАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ЭВОЛЬВЕНТЫ ОКРУЖНОСТИ, ЗАДАННОЙ ФУНКЦИЯМИ НАТУРАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА

С. Ф. Пилипака, Н. Н. Муквич

Аннотация. В данной статье получено аналитическое описание изотропных линий и минимальных поверхностей с помощью функций комплексной переменной. Для нахождения уравнений изотропных линий использованы параметрические уравнения эвольвенты окружности, заданной функциями натурального параметра. Аналитическое описание минимальных поверхностей и присоединённых минимальных поверхностей осуществлено в комплексном пространстве с изотропными линиями в качестве линий сети переноса. При изгибании минимальных поверхностей получено однопараметрическое множество ассоциированных минимальных поверхностей. Приведены выражения коэффициентов первой и второй квадратичных форм образованных минимальных поверхностей. Показано, что плоские кривые, заданные функциями натурального параметра, принадлежат к образованным минимальным поверхностям. Показано, что эвольвента окружности, заданная функциями натурального параметра, принадлежит к образованным минимальным поверхностям.

В общем случае для произвольной плоской кривой, заданной параметрическими уравнениями натурального параметра, можно отыскать аналитическое описание изотропной линии нулевой длины. Каждой изотропной линии соответствует минимальная поверхность и присоединённая минимальная поверхность, которые допускают непрерывное изгибание. Использование функций комплексной переменной позволяет получить несложное аналитическое описание минимальных поверхностей и исследовать их конструктивные геометрические параметры.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в определении дифференциальных характеристик образованных минимальных поверхностей для оптимизации инженерных методов проектирования поверхностей технических форм.

Ключевые слова: изотропная линия, минимальная поверхность, присоединённая минимальная поверхность, ассоциированная минимальная поверхность, эвольвенты окружности, квадратичная форма поверхности, изгибание поверхности, функция комплексного переменного

CONTINUOUS BENDING OF A MINIMAL SURFACES FORMED WITH A HELP OF EVOLVENT OF A CIRCLE, GIVEN BY NATURAL PARAMETER FUNCTIONS

S. F. Pylypaka, M. M. Mukvich

Abstract. *This article provides an analytical description of isotropic lines and minimal surfaces with a help of complex variable functions. To find the equation of isotropic lines we used parametric equations of a evolvent of a circle defined by natural parameter functions. Analytical description of minimal surfaces and connected minimal surfaces in complex space made of isotropic lines as lines of a translation net. When bending minimal surfaces one-parameter set of associated minimal surfaces was found. Expression of first and second coefficients of quadratic forms of generated minimal surfaces are given. It is shown that the evolvent of a circle, given by natural parameter functions, belong to formed minimal surfaces.*

It is possible to find an analytical description of isotropic line of zero length for any plane curve defined by parametric equations of natural parameter. Each isotropic line corresponds to the minimum isotropic surface and associated minimal surface that allow continuous bending. Use of function of a complex variable allows to get a simple analytical description of minimal surfaces, investigate their design geometrical parameters. Prospects for future research is to study the differential characteristics of adjoint minimal surfaces and optimization of engineering methods of technical surfaces forms design.

Keywords: *isotropic line, minimal surface, minimal surface, adjoint minimal surface, associated minimal surface, a evolvent of a circle, quadratic form of a surface, bending of a surface, function of a complex variable*

УДК 621.385: 631.234

ОБГРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ СВІТЛОДІОДНОГО ОПРОМІНЕННЯ ТЕПЛИЧНИХ РОСЛИН

Л. С. ЧЕРВІНСЬКИЙ, доктор технічних наук, професор

Т. С. КНИЖКА, кандидат технічних наук, асистент

О. І. РОМАНЕНКО, старший викладач

Я. М. ЛУЦАК, інженер

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: lchervinsky@gmail.com

Анотація. *Оскільки в освітлювальних установках України витрачається приблизно 25 % генерованої електричної енергії, то підвищення енергоефективності оптичних установок є актуальним завданням.*

Метою проведених досліджень є обґрунтування необхідності використання світлодіодних джерел світла в теплиці для опромінення рослин і розробка енергоефективної системи та режимів опромінення.

© Л. С. Червінський, Т. С. Книжка,
О. І. Романенко, Я. М. Луцак, 2017

Abstract. *This article provides an analytical description of isotropic lines and minimal surfaces with a help of complex variable functions. To find the equation of isotropic lines we used parametric equations of a evolvent of a circle defined by natural parameter functions. Analytical description of minimal surfaces and connected minimal surfaces in complex space made of isotropic lines as lines of a translation net. When bending minimal surfaces one-parameter set of associated minimal surfaces was found. Expression of first and second coefficients of quadratic forms of generated minimal surfaces are given. It is shown that the evolvent of a circle, given by natural parameter functions, belong to formed minimal surfaces.*

It is possible to find an analytical description of isotropic line of zero length for any plane curve defined by parametric equations of natural parameter. Each isotropic line corresponds to the minimum isotropic surface and associated minimal surface that allow continuous bending. Use of function of a complex variable allows to get a simple analytical description of minimal surfaces, investigate their design geometrical parameters. Prospects for future research is to study the differential characteristics of adjoint minimal surfaces and optimization of engineering methods of technical surfaces forms design.

Keywords: *isotropic line, minimal surface, minimal surface, adjoint minimal surface, associated minimal surface, a evolvent of a circle, quadratic form of a surface, bending of a surface, function of a complex variable*

УДК 621.385: 631.234

ОБГРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ СВІТЛОДІОДНОГО ОПРОМІНЕННЯ ТЕПЛИЧНИХ РОСЛИН

Л. С. ЧЕРВІНСЬКИЙ, доктор технічних наук, професор

Т. С. КНИЖКА, кандидат технічних наук, асистент

О. І. РОМАНЕНКО, старший викладач

Я. М. ЛУЦАК, інженер

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: lchervinsky@gmail.com

Анотація. *Оскільки в освітлювальних установках України витрачається приблизно 25 % генерованої електричної енергії, то підвищення енергоефективності оптичних установок є актуальним завданням.*

Метою проведених досліджень є обґрунтування необхідності використання світлодіодних джерел світла в теплиці для опромінення рослин і розробка енергоефективної системи та режимів опромінення.

© Л. С. Червінський, Т. С. Книжка,
О. І. Романенко, Я. М. Луцак, 2017

У статті обґрунтовано доцільність використання світлодіодних джерел світла в теплиці для опромінення рослин.

Проаналізовано і порівняно системи світлодіодного опромінення і опромінення натрієвими джерелами оптичного випромінювання для цибулі та салату. Світлодіодне опромінення рослин у теплиці показало додаткове зростання зеленої маси рослин, що надає можливість скоротити період вегетації і підвищує урожайність.

Проаналізовано особливості арматури світлодіодного опромінення: світильник має більшу випромінювальну поверхню, дозволяє забезпечити рівномірний розподіл потоку фотосинтезної енергії і створює більш наближене до максимального ККД фотосинтезної активної радіації за спектром опромінення.

Ключові слова: *теплиця, опромінення рослин, світлодіодні джерела світла, режими опромінення*

Актуальність. На сьогодні в освітлювальних установках України витрачається приблизно 25 % генерованої електричної енергії, тобто близько 25 млрд. кВт·год, близько 10-13 % якої використовується в сільському господарстві. Тому підвищення енергоефективності оптичних установок є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вченими в області електрифікації сільськогосподарського виробництва (Гладина Д. В., Кондратьєва Н. П., Прищеп Л. Г., Леман В. Н. та ін.) доведена ефективність опромінення (різного за характером) для додаткового отримання продукції рослинництва, обґрунтовані і сформульовані вимоги до нормативу опромінення [2-4].

Мета дослідження – обґрунтувати необхідність використання світлодіодних джерел світла в теплиці для опромінення рослин і розробити енергоефективну систему та режими опромінення.

Матеріали і методи дослідження. Дослідженнями встановлено, що економічно доцільно опромінювати розсаду, так як період вегетації у розсади 25-50 днів і опроміненню піддають відразу велику кількість рослин. При цьому продукцію одержують на 20-30 днів раніше; урожайність розсадних культур підвищується на 20-25 % [5, 6].

Результати дослідження та їх обговорення. Встановлено, що інтенсивність світла значно впливає на швидкість фотосинтезу. За низької інтенсивності світла переважають процеси дихання рослин. У коренеплідних (наприклад, редиски) плоди утворюються погано, рослини формують квітконосні стебла. У томатів і огірка квіти опадають, плоди невеликі, смакові якості низькі.

За підвищення інтенсивності світла лінійно збільшується фотосинтез. Інтенсивне світло дозволяє збільшити урожай, отримати великі плоди високої якості, значно знизити терміни вегетації [1, 2].

Для вирощування зеленої маси потужне світло шкідливе, так як ріст листової поверхні сповільнюється, якість листя знижується, воно жовтіє і стає жорсткими.

Дослідники встановили, що рослинам в різні періоди росту необхідні різні рівні інтенсивності світла і спектральний склад випромінювання, відповідно до умов їх екологічної ніші. Для правильного розвитку рослин важливо, щоб вони отримували світло, добре збалансоване за спектром, відповідним їх природному оточенню [4].

Мінімальний рівень інтенсивності світлового потоку для росту рослин складає $2-8 \text{ Вт/м}^2$. Мінімальні середньоденні рівні інтенсивності світлового потоку, за яких рослини можуть нормально розвиватися, цвісти і плодоносити – 20 Вт/м^2 , а за вигонки розсади – $50...60 \text{ Вт/м}^2$. Для формування урожаю необхідна інтенсивність у $100-200 \text{ Вт/м}^2$. За потужності вище 200 Вт/м^2 відбувається насичення фотосинтезу і дані потужності неекономічні. [3].

Виробнича перевірка вище визначених інтенсивностей опромінення досліджуваних рослин під експериментальними світлодіодними опромінювачами проводилась на базі теплиці ТОВ «КрокУкрЗалізБуд» в одній з її секцій за наступною методикою. Дослідну ділянку $10 \times 6,5 \text{ м}$ розділили на дві частини, в яких були засіяні салат (сорт «Айсберг»), цибуля на перо (сорт «Параде»). Рослини вирощували в ґрунтовій культурі за середньої інтенсивності ФАР $20...40 \text{ Фіт/м}^2$ і тривалості світлового дня 16 год. (рис. 1, 2). Інтенсивність світла (опромінення) вимірювалася в Вт/м^2 ФАР (фотосинтезно активна радіація). Одна частина опромінювалась існуючим опромінювачем ЖСП-30-600 з натрієвою лампою ДНАЗ-600, друга частина – світлодіодним світильником, потужністю 150 Вт. Система опромінення забезпечувала додаткову опроміненість 25 Фіт/м^2 . Оцінку ФАР проводили приладом-індикатором Індикатор ФАР системи «OzuV». При цьому світильники-опромінювачі працювали в режимі досвічування: штучне опромінення вмикалося за зменшення інтенсивності природного світла менше 5 Фіт/м^2 . Ґрунт, згідно рекомендацій, мав наступний склад – перегній, дернову землю і пісок в пропорції 2-2-1. Насіння висаджувалось у канавки під посадку салату, глибиною 1-1,5 см і відстанню між ними близько 10-12 см. Вологість у місці вирощування салату та цибулі підтримували на рівні 70-80 %, а температуру – $+16 \pm 18^\circ \text{C}$.



Рис. 1. Ділянка теплиці для досліджень

Вирощування і періодичні дослідження зростання рослин та нарощування листяної маси проводились протягом 33 днів. Результати досліджень щодо вимірювання росту та зеленої маси вирощуваних рослин, після відповідної математичної статистичної обробки, приведено в таблицях нижче.

1. Результати досліджень збільшення маси рослин у виробничих умовах

	Тип опромінювання	14 день	21 день	28 день
Цибуля	Природне освітлення з доопроміненням світлодіодним	15 г	40 г	90 г
	Природне освітлення з натрієвим досвічуванням	10 г	25 г	50 г
Листя салатом	Природне освітлення з доопроміненням світлодіодним	3 г	10 г	45 г
	Природне освітлення з натрієвим досвічуванням	2 г	6 г	38 г

2. Результати досліджень збільшення росту рослин у виробничих умовах

	Тип опромінювання	19 день	26 день	33 день
Цибуля	Природне освітлення з доопроміненням світлодіодним джерелом	100 мм	255 мм	380 мм
	Природне освітлення з натрієвим досвічуванням	80 мм	196 мм	255 мм
Листя салата	Природне освітлення з доопроміненням світлодіодним джерелом	30 мм	70 мм	125 мм
	Природне освітлення з натрієвим досвічуванням	20 мм	55 мм	105 мм



Рис. 2. Зовнішній вигляд вирощуваних рослин у кінці періоду вирощування на дослідній ділянці теплиці

Висновки і перспективи. Аналізуючи отримані результати можна констатувати, що система світлодіодного досвічування дає кращі результати, порівняно із опроміненням натрієвими джерелами оптичного випромінювання для цибулі на 30-45 %, для салату – на 20-35 %.

Особливістю світлодіодного опромінення є те, що світлодіодний світильник має більшу випромінювальну поверхню і дозволяє забезпечити рівномірний розподіл потоку фотосинтезної енергії і створює більш наближене до максимального ККД ФАР за спектром опромінення.

Список використаних джерел

1. Червінський, Л. С. Дослідження фотосинтезної ефективності різних джерел оптичного випромінювання / Л. С. Червінський, Я. М. Луцак // Національний університет біоресурсів і природокористування України, науковий журнал «Енергетика і автоматика». – Київ: НУБіП, 2015. – №4 (26). – С.156–160.
2. Червінський, Л. С. Використання світлодіодів у світлокультурі тепличних рослин / Л. С. Червінський, Л. О. Сторожук, Я. М. Луцак // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – Київ: НУБіП, 2015. – Вип. 209, частина 2: Техніка та енергетика АПК. – С.153–159.
3. Червінський, Л. С. Особливості застосування світлодіодних джерел світла в світлотехнічних установках / Л. С. Червінський, Я. М. Луцак // Науково-технічний журнал «Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК». – Харків: ХНТУСГ, 2015 – №1 (3). – С. 43–45.
4. Червинский, Л. С. Обоснование влияния спектрального состава источников световой энергии на жизнедеятельность растений в сооружениях закрытого грунта / Л. С. Червинский, Я. Н. Луцак // Теоретический и научно-практический журнал Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства «Инновации в сельском хозяйстве». – Москва: – ВИЭСХ. 2016 – Вып. №4 (9) – С. 180–187.
5. Метод визначення просторової фотосинтезної опроміненості / Л. С. Червінський, С. М. Усенко, Т. С. Книжка, Я. М. Луцак // Технічна електродинаміка, Інст. Електродинаміки НАН України, – 2016 – № 5 – С. 88–90.
6. Червінський, Л. С. Вимоги до спектрального складу штучних джерел оптичного випромінювання для вирощування рослин в спорудах закритого ґрунту / Л. С. Червінський, О. І. Романенко // Енергетика і автоматика. – Київ: НУБіП, 2016. – № 3 (29).

References

1. Chervinskyi, L. S., Lutsak, Ya. M. (2015). Doslidzhennia fotosyntezyanoi efektyvnosti riznykh dzherel optychnoho vyprominiuvannia [Study the photosynthesis effectiveness of various sources of optical radiation]. Natsionalnyi universytet bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy, naukovyi zhurnal «Enerhetyka i avtomatyka». Kyiv: NUBiP, 4 (26), 156–160.
2. Chervinskyi, L. S., Storozhuk, L. O., Lutsak, Ya. M. (2015). Vykorystannia svitlodiodiv u svitlokulturi teplychnykh roslin [The use of LEDs in photoculture of greenhouse plants]. Tekhnika ta enerhetyka APK. Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Kyiv: NUBiP, 209 (2), 153–159.

3. Chervinskiy, L. S., Lutsak, Ia. M. (2015). Osoblyvosti zastosuvannya svitlodiodnykh dzherel svitla v svitlotekhnichnykh ustanovkakh [Features of LED light sources in lighting installations] Naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Enerhetyka ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii v APK». Kharkiv: KhNTUSH, 1 (3), 43–45.

4. Chervinskiy, L. S., Lutsak, Ia. M. (2016). Obosnovaniye vliyaniya spektral'nogo sostava istochnikov svetovoy energii na zhiznedeyatel'nost' rasteniy v sooruzheniyakh zakrytogo grunta. [Justification of influence of the spectral composition of light energy sources in the plant life in the greenhouse plants]. Teoreticheskiy i nauchno-prakticheskiy zhurnal Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta elektrifikatsii sel'skogo khozyaystva «Innovatsii v sel'skom khozyaystve». Moskva: VIESKH, 4 (9), 180–187.

5. Chervinskiy, L. S., Usenko, S. M., Knyzhka, T. S., Lutsak, Ia. M. (2016). Metod vyznachennia prostorovoi fotosynteznoi oprominenosti. [The method of determining the spatial photosynthesis exposure]. Tekhnichna elektrodynamika, Inst. Elektrodynamiky NAN Ukrainy, 5, 88–90.

6. Chervinskiy, L. S., Romanenko, O. I. (2016). Vymohy do spektralnoho skladu shtuchnykh dzherel optychnoho vyprominiuvannya dlia vyroshchuvannya roslin v sporudakh zakrytoho hruntu [Requirements for the spectral composition of artificial sources of optical radiation to grow plants in the greenhouses]. Enerhetyka i avtomatyka. Kyiv: NUBiP, 3 (29), 88–95.

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ТЕПЛИЧНЫХ РАСТЕНИЙ

Л. С. Червинский, Т. С. Книжка, А. И. Романенко, Я. Н. Луцак

Аннотация. *Поскольку в осветительных установках Украины расходуется примерно 25% генерируемой электроэнергии, то повышение энергоэффективности оптических установок является актуальной задачей.*

Целью проведенных исследований является обоснование необходимости использования светодиодных источников света в теплице для облучения растений и разработка энергоэффективной системы и режимов облучения.

В статье обоснована целесообразность использования светодиодных источников света в теплице для облучения растений.

Проведен анализ и сравнение системы светодиодного облучения и облучения натриевыми источниками оптического излучения для лука и салата. Светодиодное облучения растений в теплице приводит к дополнительному росту зеленой массы растений, позволяет сократить период вегетации и повышает урожайность.

Проанализированы особенности арматуры светодиодного облучения: светильник имеет большую излучающую поверхность, позволяет обеспечить равномерное распределение потока фотосинтезной энергии и создает более близкий к максимальному КПД фотосинтезно активной радиации по спектру излучения.

Ключевые слова: *теплица, облучение растений, светодиодные источники света, режимы облучения*

RATIONALE FOR ENERGY EFFICIENCY OF LED RADIATION OF GREENHOUSE PLANTS

L. Chervinsky, T. Knizhka, A. Romanenko, J. Lutsak

Annotation. *Lighting systems in Ukraine consumes about 25 % of the generated electricity, the energy efficiency of optical systems is an urgent task.*

The aim of the research is the rationale for the use of LED light sources in the greenhouse for the plants exposure and the development of energy-efficient systems and exposure modes.

The article proves the feasibility of using LED light sources in the greenhouse for the plants exposure.

Analyzed and comparatively LED exposure system and exposure sodium sources of optical radiation to onion and lettuce. LED irradiation plants in the greenhouse showed additional growth of the green mass of plants, reduces the growing season and increases the yield.

The features of LED irradiation fittings: lamp has a large radiating surface, ensures even distribution of the flow of energy and creates closer to maximum efficiency photosynthesis active radiation on the radiation spectrum.

Keywords: *greenhouse, plant radiation, LED light sources, exposure modes*

УДК 621.7.044.7:631.51.01

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НАДВИСОКОЇ ЧАСТОТИ НА РОСТОВІ ПРОЦЕСИ НАСІННЯ КУКУРУДЗИ

А. І. ЧМІЛЬ, доктор технічних наук, професор

К. О. ЛАЗАРЮК, аспірант*

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: kostiantynlazariuk@gmail.com

Анотація. *Підвищення врожайності сільськогосподарських культур – це питання, яке потребує сучасного рішення. Для досягнення даної мети використовуються різні методи, одним з яких є передпосівна обробка насіння електромагнітним полем надвисокої частоти. Дана технологія має цілий ряд переваг, а головною перевагою є значна економія часу, так як процес обробки відбувається досить швидко. Окрім того, дана технологія дозволяє зберегти в насінні всі поживні речовини, вітаміни та мінерали, чого за обробки іншими методами домогтися досить складно. Наведено результати*

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор А. І. Чміль

© А. І. Чміль, К. О. Лазарюк, 2017

RATIONALE FOR ENERGY EFFICIENCY OF LED RADIATION OF GREENHOUSE PLANTS

L. Chervinsky, T. Knizhka, A. Romanenko, J. Lutsak

Annotation. *Lighting systems in Ukraine consumes about 25 % of the generated electricity, the energy efficiency of optical systems is an urgent task.*

The aim of the research is the rationale for the use of LED light sources in the greenhouse for the plants exposure and the development of energy-efficient systems and exposure modes.

The article proves the feasibility of using LED light sources in the greenhouse for the plants exposure.

Analyzed and comparatively LED exposure system and exposure sodium sources of optical radiation to onion and lettuce. LED irradiation plants in the greenhouse showed additional growth of the green mass of plants, reduces the growing season and increases the yield.

The features of LED irradiation fittings: lamp has a large radiating surface, ensures even distribution of the flow of energy and creates closer to maximum efficiency photosynthesis active radiation on the radiation spectrum.

Keywords: *greenhouse, plant radiation, LED light sources, exposure modes*

УДК 621.7.044.7:631.51.01

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НАДВИСОКОЇ ЧАСТОТИ НА РОСТОВІ ПРОЦЕСИ НАСІННЯ КУКУРУДЗИ

А. І. ЧМІЛЬ, доктор технічних наук, професор

К. О. ЛАЗАРЮК, аспірант^{*}

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: kostiantynlazariuk@gmail.com

Анотація. *Підвищення врожайності сільськогосподарських культур – це питання, яке потребує сучасного рішення. Для досягнення даної мети використовуються різні методи, одним з яких є передпосівна обробка насіння електромагнітним полем надвисокої частоти. Дана технологія має цілий ряд переваг, а головною перевагою є значна економія часу, так як процес обробки відбувається досить швидко. Окрім того, дана технологія дозволяє зберегти в насінні всі поживні речовини, вітаміни та мінерали, чого за обробки іншими методами домогтися досить складно. Наведено результати*

^{*} Науковий керівник – доктор технічних наук, професор А. І. Чміль

лабораторних досліджень передпосівної обробки насіння кукурудзи сорту «ЕМІЛІО», яке піддавалось дії енергії електромагнітного поля надвисокої частоти. Досліджувалось кілька варіантів впливу на енергію проростання та лабораторну схожість насіння. Проаналізувавши результати досліджень встановлено, що в подальшому обробку посівного матеріалу кукурудзи для забезпечення якісних показників підвищення енергії проростання та схожості, слід здійснювати з наступними значеннями параметрів енергії електромагнітного поля надвисокої частоти: потужність обробки має бути в межах 1,2-0,8 кВт/кг за експозиції в 45-105 с. Метою подальших досліджень є оптимізація режимів обробки насіння кукурудзи ЕМП НВЧ та розробка електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння кукурудзи в електромагнітному полі.

Ключові слова: електромагнітне поле надвисокої частоти, насіння кукурудзи, НВЧ-установка, передпосівний обробіток

Актуальність. Отримання повноцінного врожаю багато в чому залежить від якості посівного матеріалу, а технологія вирощування включає в себе ряд заходів: післязбиральне зберігання, передпосівна обробка, знезараження, посів. На кожному етапі виробництва і зберігання на насіння можливий негативний вплив екзогенних чинників, що знижують його якість. За незадовільних умов зберігання або вирощування насіння втрачає природну схожість, заражається хворобами, пошкоджується комахами-шкідниками, травмується за механічної обробки.[1]

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Підвищення врожайності сільськогосподарських культур – це питання, яке потребує сучасного рішення. Для досягнення даної мети використовуються різні методи, одним з яких є передпосівна обробка насіння електромагнітним полем надвисокої частоти (ЕМП НВЧ).[2] Дана технологія має цілий ряд переваг, а головною з них є значна економія часу, так як процес обробки відбувається досить швидко. Окрім того, дана технологія дозволяє зберегти в насінні всі поживні речовини, вітаміни та мінерали, що за обробки іншими методами досягається досить складно. Нагрів насіння відбувається в результаті поглинання оброблюваним матеріалом енергії електромагнітних хвиль надвисокої частоти. На відміну від традиційних методів теплової обробки сільськогосподарської продукції, НВЧ енергія, нагріваючи насіння, проникає і рівномірно розповсюджується по всьому об'єму матеріалу.

Мета дослідження – аналіз впливу електромагнітного поля надвисокої частоти на ростові процеси насіння кукурудзи.

Матеріали та методи дослідження. В якості оброблюваного об'єкта було вибрано насіння кукурудзи сорту «ЕМІЛІО», яке піддавалось дії енергії ЕМП НВЧ. Досліджувалось кілька варіантів впливу на енергію проростання та лабораторну схожість насіння, дані яких приставлені в таблиці 1. При цьому контрольна проба не піддавалася впливу ЕМП НВЧ.

1. Режими обробітку насіння кукурудзи ЕМП НВЧ

Параметри ЕМП НВЧ, кВт/кг	Експозиція, с				
1,4	105	90	75	60	45
1,2					
0,8					

Насіння оброблялось на лабораторній установці з частотою магнетрона 2,45 ГГц. Після обробки насіння висівалось в контейнери із зволоженим піском. Досліди проводились в трьохкратному повторенні. Енергія проростання та схожість насіння кукурудзи визначались на 4-ту та 7-му добу відповідно за стандартною методикою [3]. Після завершення пророщування до несхожих насінин віднесли ті, у яких не було зародкових корінців, шильця або вони зогнили.

Результати досліджень та їх обговорення. За середніми значеннями результатів експериментів, що наведені у табл. 2, було побудовано графіки залежності впливу питомої потужності ЕМП НВЧ, кВт/кг і тривалості обробки, с на енергію проростання та схожість насіння кукурудзи (рис. 1-2).

2. Середні значення проведених експериментів

Потужність, кВт/кг/Експозиція, с	Енергія проростання, %	Схожість, %
1,4/105	87,5	90,625
1,4/90	87,5	87,5
1,4/75	78,125	75
1,4/60	90,625	93,75
1,4/45	93,75	93,75
1,2/105	87,5	87,5
1,2/90	87,5	90,625
1,2/75	87,5	90,625
1,2/60	100	96,875
1,2/45	93,75	93,75
0,8/105	96,875	93,75
0,8/90	93,75	90,625
0,8/75	90,625	90,625
0,8/60	93,75	93,75
0,8/45	93,75	90,625
Контроль	90,625	84,375

Провівши аналіз отриманих графіків можна відзначити наступне:

- контрольні проби досліджуваного насіння кукурудзи показали не дуже високі результати енергії проростання та лабораторної схожості, лише 90 % та 84 % відповідно;
- найбільш сприятливі зміни відбулися за потужності обробки в 1,2 кВт/кг та 0,8 кВт/кг і експозиції в 60 і 105 с відповідно. Енергія проростання склала +10 і +7% відносно до контролю, а лабораторна схожість відповідно +13 і +9%;

- за оброки посівного матеріалу кукурудзи ЕМП НВЧ потужністю 1,4-1,2 кВт/кг з експозицією 75-105 с спостерігалось значне погіршення енергії проростання (на 4-13% від контролю);



Рис. 1. Енергія проростання оброблюваного посівного матеріалу кукурудзи ЕМП НВЧ



Рис. 2. Лабораторна схожість оброблюваного посівного матеріалу кукурудзи ЕМП НВЧ

- всі решта режимів обробки насіння кукурудзи ЕМП НВЧ показали незначні зміни значень енергії проростання та лабораторної схожості порівняно з контролем.

Висновки і перспективи. Отримані результати досліджень дозволили встановити, що в подальшому обробку посівного матеріалу кукурудзи для забезпечення якісних показників підвищення енергії проростання та схожості, слід здійснювати з наступними значеннями параметрів ЕМП НВЧ: потужність обробки має бути в межах 1,2-0,8 кВт/кг за експозиції на рівні 45-105 с.

Метою подальших досліджень є оптимізація режимів обробки насіння кукурудзи ЕМП НВЧ та розробка електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння кукурудзи в електромагнітному полі.

Список використаних джерел

1. Режим доступу: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/download/5252/5165>
2. Електротехнології обробки сільськогосподарської продукції: навч. посібник / Г. Б. Іноземцев, О. М. Берека, О. В. Окушко, С. М. Усенко; за ред. Г. Б. Іноземцева. – К.: «ЦП «КОМПРИНТ», 2015. – 306 с.
3. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести: ГОСТ 12038-84. – [Введен 1986-07-01]. – М.: Стандартиформ, 2011. – 64 с.

References

1. Available at: http://journals.nubip.edu.ua/index.php/_Energiya/article/download/5252/5165
2. Inozemtsev, G. B., Bereka, O. N., Okushko, A. V., Usenko S. M. (2015). Elektrotekhnologii obrobky silskohospodarskoi produktsii [Electrotechnology processing of agricultural products]. Kyiv, «ZP «KOMPRINT», 306.
3. Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vskhozhesti: GOST 12038-84 (2011) [Seeds of agricultural crops. Methods for determining the germination GOST 12038-84]. [Vveden 1986-07-01]. Moscow: Standartinform, 64.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НА РОСТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ СЕМЯН КУКУРУЗЫ

А. И. Чмиль, К. А. Лазарюк

Аннотация. *Повышение урожайности сельскохозяйственных культур – это вопрос, который требует современного решения. Для достижения данной цели используются различные методы, одним из которых является предпосевная обработка семян электромагнитным полем сверхвысокой частоты. Данная технология имеет целый ряд преимуществ, а главным преимуществом является значительная экономия времени, так как процесс обработки происходит достаточно быстро. Кроме того, данная технология позволяет сохранить в семенах все питательные вещества, витамины и минералы, при обработке другими методами добиться этого довольно сложно.*

Приведены результаты лабораторных исследований предпосевной обработки семян кукурузы сорта «Эмилия», которое обраба-

тывалось энергией электромагнитного поля сверхвысокой частоты. Исследовалось несколько вариантов воздействия на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян. Проанализировав результаты исследований, установлено, что в дальнейшем обработку посевного материала кукурузы для обеспечения качественных показателей повышения энергии прорастания и всхожести, следует осуществлять со следующими значениями параметров энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты: мощность обработки должно быть в пределах 1,2-0,8 кВт / кг при экспозиции в 45-105 с. Целью дальнейших исследований является оптимизация режимов обработки семян кукурузы ЭМП СВЧ и разработка электротехнологического комплекса для предпосевной обработки семян кукурузы в электромагнитном поле.

Ключевые слова: электромагнитное поле сверхвысокой частоты, семена кукурузы, СВЧ-установка, предпосевная обработка

EXPOSURE TO ELECTROMAGNETIC FIELD OF ULTRAHIGH FREQUENCY ON GROWTH OF MAIZE SEEDS PROCESSES

A. I. Chmil, K. O. Lazariuk

Abstract. Increased productivity of agricultural cultural issue that requires modern solutions. To achieve this goal using different methods, one of which is seed preplant treatment of the electromagnetic field of ultrahigh frequency. This technology has many advantages, but the main advantage is significant timesavings since the processing is fast enough. In addition, this technology can save the seeds all the nutrients, vitamins and minerals that the processing of other methods is difficult to achieve. The results of laboratory tests pre-treatment of corn seed varieties "Emily", which is treated by the energy of the electromagnetic field of ultrahigh frequency. Investigated several options for effects on vigor and seed germination laboratory. After analyzing the results of studies found that the further processing of seed corn for quality indicators improve vigor and germination should perform the following values of the parameters of electromagnetic field of ultrahigh frequency, capacity cultivation should be within 1,2-0,8 kW / kg at exposure in 45-105 sec. The aim of further research is the optimization of processing corn seed EMF microwave and development of electro-technological complex for pre-treatment of corn seed in the electromagnetic field.

Keywords: ultra high frequency electromagnetic field, seed corn, microwave installation, pre-cultivation

ОБҐРУНТУВАННЯ ПОБУДОВИ РЕЗЕРВНИХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ЗАХИСТІВ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

В. Я. БУНЬКО, кандидат технічних наук, доцент
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»
E-mail: VBunko@gmail.com

Анотація. Запропонований принцип побудови резервних централізованих захистів від коротких замикань на землю ліній електропередач 330-750 кВ кільцевих схем відкритого розподільного пристрою, на відміну від відомих, заснований на контролі відносин струмів фаз на стороні нижчої напруги підвищувального трансформатора блоку електростанції. Розроблено алгоритми функціонування, методика вибору уставок, оцінка чутливості, що враховує струми в непошкоджених фазах і модель захисту.

За рахунок контролю сум струмів непошкоджених приєднань і величин струмів в пошкоджених, запропонований метод побудови централізованих захистів від міжфазних замикань, заснований на використанні першого закону Кірхгофа.

Розроблені алгоритми резервних централізованих захистів згаданих приєднань від міжфазних замикань на порівнянні знаку потужності на них. Ці алгоритми відрізняються від відомих із врахуванням значно більшої кількості режимів роботи устаткування. Серед традиційних централізованих найбільший інтерес викликає диференційний струмовий захист шин, оскільки він заснований на аналізі тільки струмів приєднань і застосуванні першого закону Кірхгофа без використання інформації про напрямок потужності.

Проведено оцінку чутливості традиційних резервних захистів від міжфазних замикань (максимального струмового та дистанційного захистів) і від однофазних замикань на землю (нульової послідовності).

Ключові слова: *трансформатор, лінія електропередач, коротке замикання, струм, напруга, відкритий розподільний пристрій*

Актуальність. За останні десятиліття в декількох країнах відбулися великі техногенні аварії, одніє. з причин деяких виявилася недостатня надійність релейного захисту електроустаткування відкритих розподільних пристроїв (ВРП), напругою 330-750 кВ, особливо ліній електропередач (ЛЕП). Для її забезпечення в цей час застосовується просте дублювання, але воно, збільшуючи надійність спрацьовування, зменшує надійність неспрацьовування. Відомо, що за мікропроцесорного виконання захистів у багатьох випадках краще використати мажорнування, коли число захистів потроєється, а сигнал на вимикання подається, якщо

спрацювали будь-яких два інших. За таких обставин відповідно до положень теорії надійності найбільш доцільно використовувати пристрої з різними принципами дії. Однак для згаданих ЛЕП повноцінне мажорювання захистів ускладнюється через недостатню кількість апробованих резервних захистів, оскільки від міжфазних і однофазних замикань на землю використовується відповідно тільки дистанційні та нульові послідовності.

У зв'язку з викладеним, розробка нових резервних захистів актуальна. Вона може йти в напрямі створення як автономних, так і централізованих захистів, де об'єктом дослідження являються резервні захисти електроенергетичних систем від коротких замикань.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основні положення даного питання обговорювалися на міжнародній науково-технічній конференції «Радіоелектроніка, електротехніка й енергетика» (м. Москва), на міжнародній науково-технічній конференції «Енерго-ресурсозберігаючі технології – основа індустріально-інноваційного розвитку» (Казахстан, м. Павлодар).

Об'єктом дослідження є резервні захисти електроенергетичних систем від коротких замикань. Предмет дослідження – резервні централізовані захисти ЛЕП та іншого основного устаткування відкритих розподільних пристроїв, напругою 330-750 кВ.

Мета дослідження – розробка алгоритмів функціонування і моделей резервних централізованих захистів від коротких замикань для ліній, напругою 330-750 кВ.

Досягнення поставленої мети пов'язане з вирішенням наступних завдань:

- розробка алгоритму функціонування резервного централізованого захисту ліній від коротких замикань на землю, що відрізняється за принципом дії від традиційних і не поступається їм за чутливістю;
- розробка схем контролю справності реле централізованих спрямованих захистів.

Матеріали і методи дослідження. Для вирішення поставленого завдання використалися фундаментальні положення теоретичних основ електротехніки, релейного захисту, теорії надійності, електричних машин, алгебри логіки та теорії релейних пристроїв. Проводилося математичне моделювання, всі обчислення виконані в середовищі MS Excel, Mathematica 5,0.

Результати дослідження та їх обговорення. За розробки алгоритмів резервних спрямованих захистів приєднань кільцевих схем представлені алгоритми двох централізованих резервних спрямованих захистів приєднань головних схем відкритих розподільних пристроїв напругою 330-750кВ. Алгоритм [4] першої враховує можливість помилкового спрацювання в неповнофазному режимі роботи кожного із приєднань, у випадку замикань на землю на них, КЗ із боку нижчої напруги підвищувальних трансформаторів на електростанції і розподілі схем ВРП на декілька частин [1,4]. Друга [4] враховує перераховані

режими роботи ВРП та заснована на порівнянні знаку потужності на всіх приєднаннях. Захист спрацьовує за напрямку потужності (НП) на лінії. Для її визначення звичайно використовується орган напрямку потужності (ОНП), що контролює струм у фазі лінії і напруга між двома іншими. У розглянутій статті в схемах чотирикутника [4], шестикутника [1,4], 3/2 [1,4], 4/3 кожна фаза приєднання вимикається двома вимикачами. Тому враховувалась можливість вимкненого стану одного з них. Приклад під'єднання вимірювальних пристроїв наведений для схеми чотирикутника (рис.1). Згаданий контроль здійснюється на лініях, як загальноприйнятий, за допомогою конденсаторів зв'язку (на схемі не показані) і трансформаторів струму. Як показав аналіз, умови її спрацьовування за НП, наприклад, для лінії W2, використовуючи алгебру логіки, можна записати так:

$$M_{W2} = M_3^J \cdot M_4^J + M_3^J \cdot a'_4 + M_4^J \cdot a'_3, \quad (1)$$

де M_{W2} - сигнал про НП від блоків G1-тр1, G2-тр2 до лінії, що приймає значення логічної одиниці «1» і «0» за зворотного напрямку або її відсутності;

M_3^J , M_4^J – сигнали від KW1, KW2, що приймають значення «1» за НП на лінії;

a'_3 і a'_4 - сигнали від реле фіксації положення «вимкнено» Q3 і Q4, що приймають значення «1», коли відповідний вимикач вимкнений і «0», коли ввімкнений.

Аналогічним чином будуються вирази для визначення НП в інших приєднаннях.

Розглянуто транзит електроенергії від системи GS2 (рис. 1) через схему чотирикутника в навантаження. За однофазного КЗ на лінії W2 (точка K1) активна потужність в пошкодженій фазі А спрямована від енергоблоків G1-тр1, G2-тр2 до K1, а струм перевищує значення $I_{H.MKC}$ (струм максимального навантаження). У фазах В і С лінії W1 при цьому КЗ потужність може мати напрямок до навантаження, а струм у них перевищити $I_{H.MKC}$. Це може призвести до вимикання лінії W1, що заборонено відповідною побудовою алгоритму дії захисту. У разі заземлення нейтралі трансформатора навантаження НП у фазах лінії W1 залежить від коефіцієнта розподілу струму нульової послідовності, довжин ліній W1 і W2, віддаленості точки КЗ від схеми, потужності енергоблоків G1-тр1, G2-тр2. При цьому струм може бути як меншим, так і більшим $I_{H.MKC}$, що може призвести до вимикання фаз W1.

Із проведеного аналізу випливає, що НП за однофазних КЗ на лінії та за двофазних КЗ на інших приєднаннях можуть збігатися. Для запобігання помилкової роботи за однофазних КЗ введено блокування. Так, за КЗ на лінії W2, в алгоритм вводиться блокуючий сигнал B_{W2}^0 у напрямку потужності і струмів нульової послідовності, що приймає значення «1» за КЗ на землю на інших приєднаннях ВРП:

$$B_{W2}^0 = T_{W1}^0 \cdot M_{W1}^0 + T_{Tp1}^0 \cdot M_{Tp1}^0 + T_{Tp2}^0 \cdot M_{Tp2}^0, \quad (2)$$

де M_{W1}^0 , M_{Tp2}^0 , M_{Tp1}^0 (T_{W1}^0 , T_{Tp2}^0 , T_{Tp1}^0) - відповідно сигнали від ОНП (пускових органів) нульової послідовності приєднань W1, Tp2, Tp1, що приймають значення «1» за їх спрацьовування.

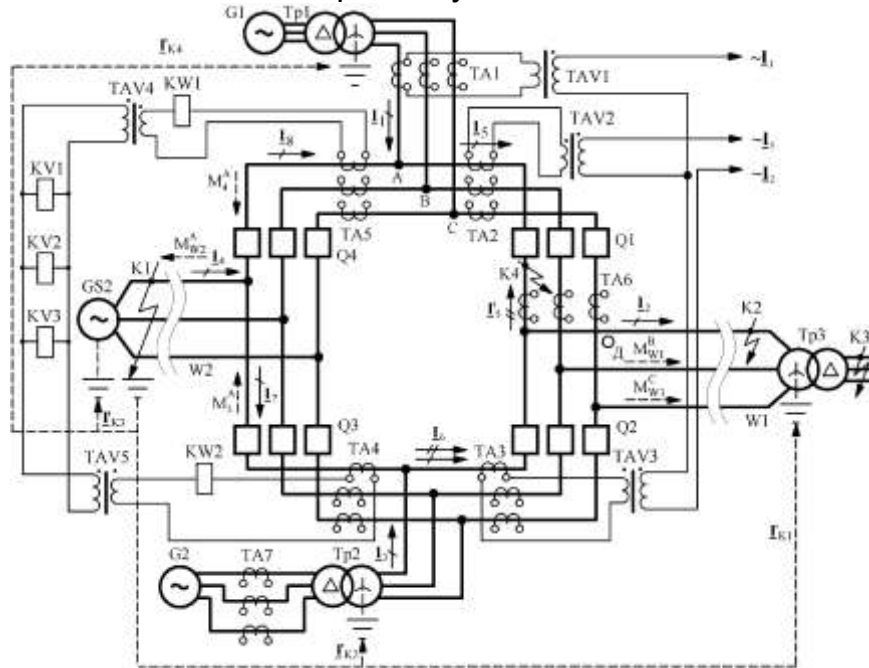


Рис.1. Підключення вимірювальних пристроїв

Відомо, що K3 за трансформаторами з боку трикутника супроводжуються зміною НП із боку зірки [7,8,10]. Для запобігання хибного спрацьовування ОНП введені сигнали b_1^Δ , b_2^Δ , що приймають значення «0» («1») за наявності (відсутності) K3 за Tp1, Tp2. Щоб не відлаштовуватись від струмів за коливання і від струмів в непошкоджених фазах, що виникають за K3 на землю на інших приєднаннях, запуск захисту здійснюється за допомогою блокування від коливань, яке використовується в традиційних дистанційних захистах. Сигнали b_1 , b_2 приймають значення «1» («0») за відсутності (наявності) коливань.

Через те, що ОНП не відрізняє K3 на лінії W2 від режиму передачі потужності її споживачам, передбачені пускові органи (ПО) [10]. Струм I_{C31} спрацьовування ПО для кожної лінії (за аналогією із пристроями резервування відмови вимикачів) повинен бути відлаштований від струму $I_{H.MKC}$. Для лінії W2:

$$I_{C31}^{W2} = 1,4 \cdot I_{H.MKC}^{W2}. \quad (3)$$

За I_{C31} не виключено, що захист спрацює хибно в режимі роботи двох фаз після неуспішного однофазного автоматичного повторного вмикання. Щоб цього не трапилося, уставка перелаштовується з I_{C31} на:

$$I_{C32}^{W2} = 1,2 \cdot I_{ДФ}^{W2}, \quad (4)$$

де, 1,2 – коефіцієнт, що враховує похибку трансформаторів струму, розрахунку та реалізації;

$I_{ДФ}$ - струм (найбільший з можливих) у кожній із двох фаз за вимкненої третієї [2,9].

$I_{ДФ}$ залежить від опорів приєднань, режиму заземлення нейтралей, конфігурації мережі. У зв'язку із цим, в деяких випадках захист не буде мати достатньої чутливості за роботи двох фаз. Тому, слід зауважити, що таким недоліком можна знехтувати, якщо враховувати, що режим триває не більше трьох годин.

Опускаючи дане формулювання, умова спрацьовування на вимикання лінії W2 записується так:

$$\begin{aligned} Y_{W2}^A &= M_{W2}^A \cdot (\overline{x_{y2}} \cdot T_{1,W2}^A + x_{y2} \cdot T_{2,W2}^A) \cdot D_2^\uparrow \cdot \overline{B_{W2}^0} \cdot (b_1 + b_2) \cdot \overline{b_1^\Delta} \cdot \overline{b_2^\Delta}, \\ x_{y2} &= \overline{T_{3,W1}^A} \cdot T_{3,W1}^B \cdot T_{3,W1}^C + \overline{T_{3,W1}^A} \cdot \overline{T_{3,W1}^B} \cdot T_{3,W1}^C + T_{3,W1}^A \cdot \overline{T_{3,W1}^B} \cdot \overline{T_{3,W1}^C} + \\ &+ \overline{T_{3,Tr2}^A} \cdot T_{3,Tr2}^B \cdot T_{3,Tr2}^C + \dots + \overline{T_{3,W2}^A} \cdot \overline{T_{3,W2}^B} \cdot T_{3,W2}^C + \dots + \overline{T_{3,Tr1}^A} \cdot \overline{T_{3,Tr1}^B} \cdot \overline{T_{3,Tr1}^C}, \end{aligned} \quad (5)$$

де Y_{W2}^A - сигнал, що приймає значення «1» за КЗ у фазі А лінії W2;

$D_2^\uparrow$ - оператор затримки появи сигналу на час $t_2 = t_{л.} + \Delta t$ ($t_{л.}$ - час роботи дистанційного захисту лінії W2);

$T_{1,W2}^A, T_{2,W2}^A$ - сигнали від першого, другого ПО;

x_{y2} - сигнал, на зміну струму спрацьовування захисту з I_{C31} на I_{C32} ;

$T_{3,W1}^A, T_{3,W1}^B, T_{3,W1}^C, T_{3,Tr2}^A, \dots, T_{3,W2}^A, T_{3,Tr1}^A, T_{3,Tr1}^B, T_{3,Tr1}^C$ - сигнали від КВЗ

всіх приєднань про те, що струм в їхніх фазах А, В, С більший струмів холостого ходу $I_{C33} \geq 1,3 \cdot I_{XX}$.

Представлені логічні формули виражають умови визначення пошкодженої фази і подачі сигналів на котушки вимикання її вимикачів, дана оцінка чутливості захисту, що може виявляти мінімальний струм КЗ $I_{КЗ.МИН} = 1,7 \cdot I_{Н.МКС}$, схема пристрою захисту приєднань чотирикутника і опис її роботи, а також для шестикутника структурна схема алгоритму захисту в частині її дії на вимикання W1 (рис. 2).

Структури алгоритмів захистів схем 3/2 і 4/3 відрізняються тим, що в них резервується захист збірних шин. Напрямок потужності у всіх режимах розглянуто для різних положень вимикачів. В умові подачі сигналів на вимикання шин ввімкнено блокування, яке запобігає хибному спрацьовуванню захисту за зовнішніх КЗ [3,10]. Представлена структурна схема алгоритму, що виражає умови вимкнення КЗ на шинах. За побудови алгоритму для схеми 4/3 враховані різні варіанти її розпаду, у тому числі вимикання секційних вимикачів [6].

З огляду на велику кількість вимірювальних органів, розроблений алгоритм перевірки справності деяких реле розглянутого захисту та обривів з'єднувальних проводів [5]. Використовується, наприклад, наявність (відсутність) сигналу від реле положення «ввімкнено» і відсутність (наявність) сигналу від реле положення «вимкнено», які

свідчать про їхню справність. За обривів з'єднувальних проводів або несправності одного з реле цей стан порушується. Умова подачі сигналу C_{Q1} про несправності реле, що фіксують стан вимикача Q1, має вигляд:

$$C_{Q1} = a_1 \cdot a'_1 + \overline{a_1} \cdot \overline{a'_1}, \quad (6)$$

де $a_1(a'_1)$ - сигнал від реле положення «ввімкнено» («вимкнено»).

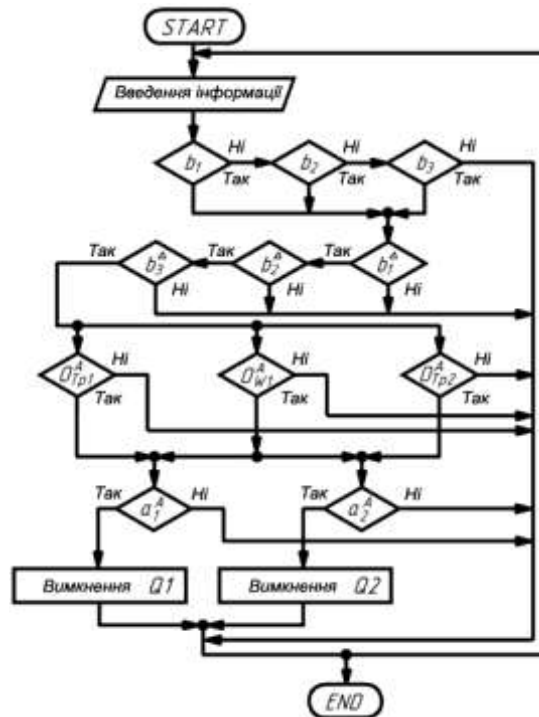


Рис. 2. Структурна схема алгоритму ТНЗ для лінії W1.

Висновки і перспективи. У зв'язку з цим можна зробити висновок, що дані алгоритми, завдяки застосуванню алгебри логіки, можуть бути реалізовані на мікропроцесорних терміналах і логічних елементах будь-якої природи. Вони дозволяють створити резервні захисти ВРП напругою 330-750 кВ від міжфазних замикань, придатні для використання за мажорювання. Адаптація до неповнофазних режимів і змін головних схем, як і алгоритми контролю справності, підвищують надійність неспрацьовування цих захистів, що особливо важливо за їх мікропроцесорного виконання. Захист, заснований на використанні першого закону Кірхгофа, на відміну від застосовуваних, не реагує на ушкодження в колах напруги, що підвищує надійність всієї системи релейного захисту за мажорювання. Централізований захист від коротких замикань на землю, що зіставляє струми у фазах підвищувальних трансформаторів, здатний виявляти струми $(0,3 \div 0,4) \cdot I_{H.MKC}$, де $I_{H.MKC}$ - максимальний струм навантаження на ЛЕП [9]. Цей захист вирішує завдання створення захисту, що відрізняється за принципом дії від традиційного захисту нульової послідовності, і, в більшості випадків, не поступається йому за чутливістю, а також дає можливість вирішити завдання повноцінного мажорювання резервних захистів від замикань на землю.

Розроблені алгоритми та схеми для контролю справності основних реле запропонованих захистів і реле положення вимикачів, можуть бути використані і для підвищення надійності традиційних захистів.

Список використаних джерел

1. Шахаев, К. Т. Резервная токовая направленная защита линий ОРУ 330-750кВ / К. Т. Шахаев, М. Я. Клецель, К. И. Никитин, А. С. Стинский // Научные проблемы транспорта. – 2009. - №2. - С. 355-358.
2. Бунько, В. Я. Розробка алгоритму для дослідження методів підвищення надійності пристроїв релейного захисту [Текст] / В. Я. Бунько // Актуальні проблеми в сферах науки та шляхи їх вирішення: матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції (Україна, м. Харків, 18-19 березня 2016 року). – С. 20-25.
3. Бунько, В. Я. Аналіз методів та засобів підвищення надійності елементів релейного захисту [Текст] / В. Я. Бунько // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – №3/1(23) – С. 26-30.
4. Шахаев, К. Т. Построение резервных защит линий электропередач с использованием первого закона Кирхгофа / К. Т. Шахаев, М. Я. Клецель, К. И. Никитин, А. С. Стинский // Научные проблемы транспорта. – 2010. - №1. - С. 309-312.
5. Кузнецов, В. Г. Підвищення надійності та ефективності магістральних електричних мереж [Текст] / В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2009. – Вип. 23. – С. 110–117.
6. Некрасов, А. М. Дальние электропередачи 750 кВ. Воздушные линии [Текст] / А. М. Некрасов, С. С. Рокотян. – М.: Энергия, 1974. – 356 с.
7. Сулейманов, В. М. Электрические сети и системы [Текст] / В. М. Сулейманов, Т.Л. Кацадзе. – Киев.: НТУУ «КПИ». – 2007. – 274 с.
8. Веников, В. А. Расчёт режимов дальних электрических передач переменного тока [Текст] / В. А. Веников, И. П. Сиуда. – М.: Высшая школа. – 1966. – 189с.
9. Бунько, В. Я. Обґрунтування розробки резервних централізованих захистів ліній електропередач напругою 330-750 кВ. // Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці: зб. наук. праць IV Наукова конференція. (...) – Харків, Х.: Технологічний Центр, 2016. – С. 67-68.
10. Шахаев, К. Т. Разработка резервных централизованных защит линий напряжением 330-750 кВ [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / К. Т. Шахаев. - Омский государственный технический университет. – Омск, 2011. – 23 с.

References

1. Shakhayev, K. T., Kletsel, M. Ia., Nykytyn, K. Y., Stynskyi, A. S. (2009). Rezervnaia tokovaia napravlennaia zashchyta lyny ORU 330-750kV [Back-up current directional protection of lines of outdoor switchgear 330-750kV]. Nauchnye problemy transporta, 355-358.
2. Bunko, V. Ia. (2016). Rozrobka alhorytmu dlia doslidzhennia metodiv pidvyshchennia nadiinosti prystroiv releinoho zakhystu [Developing an algorithm to study methods of improving the reliability of relay protection]. Materialy IV

mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Aktualni problemy v sferakh nauky ta shliakhy yikh vyrishennia», 20-25.

3. Bunko, V. Ia. (2015). Analiz metodiv ta zasobiv pidvyshchennia nadiinosti elementiv releinoho zakhystu [Analysis methods and means to improve the reliability of relay protection]. Tekhnolohichniy audyt ta rezervy vyrobnytstva, 26-30.

4. Shakhaev, K. T., Kletsel, M. Ia., Nyktytn, K. Y., Stynskiy, A. S. (2010). Postroenye rezervnykh zashchyt lyny elektroperedach s yspolzovanyem pervogo zakona Kyrkhghofa [Building backup power line protections using the first Kirchhoff law]. Nauchnye problemy transporta, 309-312.

5. Kuznetsov, V. H., Tuhai lu. I. (2009). Pidvyshchennia nadiinosti ta efektyvnosti mahistralnykh elektrychnykh merezh [Improving the reliability and efficiency of the electricity grid]. Pr. In-tu elektrodynamiky NAN Ukrainy: Zb. nauk. pr. – Kyiv.: IED NAN Ukrainy, 110–117.

6. Nekrasov, A. M., Rokotian, S. S. (1974). Dalnye elektroperedachy 750 kV. Vozdushnye lyny. [Long power of 750 kV. Overhead lines]. Moscow: Enerhyia, 356.

7. Suleimanov, V. M., Katsadze, T.L. (2007). Elektrycheskye sety y systemy. [Electrical networks and systems]. Kyev, NTUU «KPY», 274.

8. Venykov, V. A., Syuda, Y. P. (1966). Raschët rezhymov dalnykh elektrycheskykh peredach peremennoho toka. [Calculation modes Ordering of long-distance transmission of alternating current]. Moscow: Vysshaya shkola, 189.

9. Bunko, V. Ia. (2016). Obgruntuvannia rozrobky rezervnykh tsentralizovanykh zakhystiv linii elektroperedach napruhoiu 330-750 kV [Justification develop centralized backup power protection voltage of 330-750 kV]. IV Naukova konferentsiia «Fundamentalni ta prykladni doslidzhennia u suchasni nautsi». Zbirka naukovykh prats. – Kharkiv, Tekhnolohichniy Tsentr, 67-68.

10. Shakhaev, K. T. (2011). Razrabotka rezervnykh tsentralizovannykh zashchyt lyny napriazhenyem 330-750 kV [Contingency centralized protection line voltage 330-750kV]. Omsk State Technical University. – Omsk., – 23 s.

ОБОСНОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ РЕЗЕРВНЫХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В. Я. Бунько

Аннотация. Предложенный принцип построения резервных централизованных защит от коротких замыканий на землю линий электропередач 330-750 кВ кольцевых схем открытого распределительного устройства, в отличие от известных, основан на контроле отношений токов фаз на стороне низшего напряжения повышающего трансформатора блока электростанции. Разработаны алгоритмы функционирования, методика выбора уставок, оценка чувствительности, учитывающие токи в неповрежденных фазах и модель защиты.

За счет контроля сумм токов неповрежденных присоединений и величин токов в поврежденных, предложенный метод построения централизованных защит от междофазных замыканий, основан на использовании первого закона Кирхгофа.

Разработаны алгоритмы резервных централизованных защит упомянутых присоединений от межфазных замыканий на сравнении знака мощности на них. Эти алгоритмы отличаются от известных с учетом значительно большего количества режимов работы оборудования. Среди традиционных централизованных наибольший интерес вызывает дифференциальная токовая защита шин, так как она основана на анализе только токов присоединений и применении первого закона Кирхгофа без использования информации о направлении мощности.

Проведена оценка чувствительности традиционных резервных защит от междофазных замыканий (максимальной токовой и дистанционной защит) и от однофазных замыканий на землю (нулевой последовательности).

Ключевые слова: *трансформатор, линия электропередач, короткое замыкание, ток, напряжение, открытое распределительное устройство*

BACKGROUND OF CONSTRUCTION OF BACKUP CENTRALIZED POWER PROTECTION HIGH VOLTAGE

V. Ia. Bunko

Abstract. *The proposed principle of the centralized backup protection from short circuits to ground transmission lines 330-750 kV ring circuits outdoor switchgear, in contrast to the known, based on monitoring phase currents relations on the side of low voltage step-up transformer power supply. Developed algorithms of functioning, methods of selecting the settings, evaluation of sensitivity, considering the currents in the healthy phases and security model.*

By controlling the amounts of currents connections intact and current values in injured, the proposed method of construction of the centralized protection against phase faults, based on the use of the first law of Kirchhoff.

The developed algorithms centralized backup protection from the mentioned connections interphase fault comparison power sign on them. These differ from the known algorithms taking into account the significantly larger number of operating modes of the equipment. Among the most traditional centralized interest causes a differential current busbar protection, since it is based on the analysis of only the current connections and the application of the first law of Kirchhoff without the use of sending power information.

Evaluation of the sensitivity of traditional backup protection from phase faults (overcurrent and distance protection) and on the single-phase ground fault (zero sequence).

Keywords: *transformer, power line, a short circuit current, voltage, outdoor switchgear*

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

В. Г. ПОДОБАЙЛО, кандидат технічних наук, доцент

М. В. ПОТАПЕНКО, старший викладач

Н. П. СЕМЕНОВА, старший викладач

В. Л. ШАРШОНЬ, асистент

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

E-mail: m.potapenko@i.ua

Анотація. Для підвищення енерго-економічних показників роботи біогазових установок пропонується для теплопостачання метантенків біогаз замінити електротермічними акумулюючими установками. Найвищий к.к.д. електродних водонагрівачів забезпечується за номінальних режимів роботи та відповідного питомого опору води. Запропоновано методику визначення питомого опору води електродних водонагрівачів біогазових установок на основі показів електровимірювальних приладів, які входять в комплект електротермічних установок. Це дозволить підтримувати номінальні параметри роботи електродних водонагрівачів протягом всього періоду експлуатації.

Ключові слова: *біогазові установки, електротермічне обладнання, електродні водонагрівачі*

Актуальність. В біогазових установках органічні речовини розкладаються метановими бактеріями за сприятливих для їх життєдіяльності умов: відсутності вільного кисню, відповідної температури, високої вологості, достатньої кількості азоту та нейтрального середовища. Необхідна для життєдіяльності бактерій температура продуктів ферментації в метантенку в кліматичних умовах України може підтримуватись лише за використання додаткових енергетичних затрат. Так, в сучасних біогазових установках, для підтримання температурного режиму в метантенках, особливо в зимовий період, затрачається майже 70 % виробленого біогазу [1]. Тому питання підвищення енергоефективності роботи біогазових установок є досить актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В системі постачання теплової енергії біогазових установок біогаз доцільно замінити електричною енергією із застосуванням термоелектричного обладнання і теплоакumuлюючих установок. Це дозволить підвищити енергоефективність біогазових установок на 15% [2]. Теплоакumuлюючі електронагрівні установки вмикають в електромережу в години провалів добових графіків електронавантажень підстанцій. При цьому вартість електроенергії в 4 рази дешевша, ніж вартість денної електроенергії і в 7

разів дешевша за вартість пікової енергії із 7 по 10 годину ранку та з 18 до 21 години вечора.

У якості перетворювачів електричної енергії в теплову в біогазових установках доцільно застосовувати прості за будовою і надійні в експлуатації електродні водонагрівачі типу ЕПЗ і КЭВ.

Мета дослідження – розробка методики і способів підтримання номінальних режимів роботи електроводонагрівачів протягом всього періоду експлуатації.

Матеріали і методи дослідження. В електродних водонагрівачах теплова енергія утворюється в результаті проходження струму через воду, тому їх потужність P і температуру нагрівання води θ визначають в залежності від питомого електроопору води ρ . Номінальному значенню потужності водонагрівача P_n буде відповідати певне значення питомого опору ρ , яке за проектування водонагрівачів для визначеного району вибирають на основі даних про природні води. Але навіть у близько розташованих джерелах водопостачання значення ρ можуть значно відрізнятись, а у поверхневих вод значення змінюються за сезонами.

Крім того, в початковий період роботи електродних водонагрівачів дуже змінюються фізико-хімічні показники води. Величина ρ збільшується, тому що зменшується вміст солі у воді внаслідок термічного розкладу та випадання в осад солей жорсткості. В замкнутому робочому контурі водонагрівача, в якому втрати теплоносія і додавання сирової води незначні, жорсткість і питомий опір води стабілізуються і в подальшому залишаються постійними [3]. Так, для сирової води з жорсткістю $\gamma = 2,6$ мг.екв./кг через 250 годин роботи нагрівача жорсткість встановлювалась на рівні 0,22 мг.екв./кг. Приблизно в середині початкового періоду через 125 годин питомий опір води збільшився з 2000 до 4300 Ом·см., тоді як водонагрівачі розраховуються на $\rho_n = 3000$ Ом·см.

Тому, для забезпечення номінальних параметрів роботи електродних водонагрівачів під час експлуатації необхідно приводити питомий опір води до номінального значення.

Результати дослідження та їх обговорення. Точне значення питомого опору води можна визначити в спеціальних лабораторіях. У виробничих умовах виникає потреба спрощеного методу визначення ρ на основі показів контрольно – вимірювальних приладів, які входять в комплект поставки електродних водонагрівачів.

Під час роботи водонагрівачів контролюються такі параметри: фазні напруга U_ϕ і струм I_ϕ та температура на вході $\theta_{вх}$ і на виході $\theta_{вих}$.

Фазний струм є функцією двох незалежних змінних: питомого опору води ρ_{20} за температури 20°C та середньої температури $\theta_{сеп}$.

При цьому зміну фазного струму можна записати у вигляді:

$$I_\phi = I_n \cdot k_1 \cdot k_2, \quad (1)$$

де I_n - номінальний струм водонагрівача, А;

k_1, k_2 - поправочні коефіцієнти, які враховують вплив на I_ϕ величин $\theta_{сеп}$ і ρ .

Добуток коефіцієнтів $k_1 \cdot k_2$ у формулі (1) є відношення $\frac{I_\phi}{I_n}$ відповідно за номінальних значень $\rho_{н20}$, коли $k_2 = 1$ та $\theta_{сеп}$, коли $k_1 = 1$.

Значення питомого опору за середньої температури $\rho_{\theta_{сеп}}$ визначають за формулою [4]:

$$\rho_{\theta_{сеп}} = \frac{40\rho_{н20}}{20 + \theta_{сеп}}. \quad (2)$$

Тоді

$$k_1 = \frac{I_\phi}{I_n} = \frac{\rho_{\theta_{н.сеп}}}{\rho_{\theta_{сеп}}} = \frac{\rho_{\theta_{н.сеп}}(20 + \theta_{сеп})}{40\rho_{н20}}. \quad (3)$$

Для водонагрівачів ЕПЗ і КЭВ $\rho_{\theta_{н.сеп}}$ і $\rho_{н20}$ є постійними, тому можна визначити значення коефіцієнту k_1 як функцію $\theta_{сеп}$.

$$k_1 = 0,00975 \cdot (20 + \theta_{сеп}), \quad (4)$$

де 0,00975 – постійний коефіцієнт для водонагрівачів ЕПЗ та КЭВ.

Таким чином коефіцієнт k_1 є лінійною функцією середньої температури води у водонагрівачі (рис. 1.).

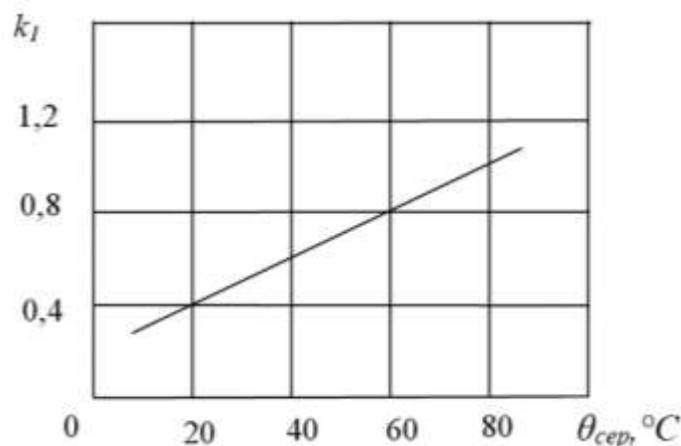


Рис. 1. Залежність поправочного коефіцієнта k_1 від середньої температури води у водонагрівачі

Аналогічно можемо записати рівняння для коефіцієнта k_2 .

$$k_2 = \frac{I_\phi}{I_n} = \frac{\rho_{н20}}{\rho_{20}} = \frac{3000}{\rho_{20}}. \quad (5)$$

Розрахункова залежність $k_2 = f(\rho_{20})$ показана на рис. 2.

Практичний метод визначення питомого опору води ρ для електродних водонагрівачів є наступним. За фактичним $\theta_{сеп}$ та графіком (рис. 1) визначаємо значення коефіцієнта k_1 . Потім за показами амперметра I_ϕ та відомим I_n водонагрівача за формулою (1) визначаємо

значення k_2 . Тоді за допомогою графіка (рис. 2) можна визначити величину питомого опору води ρ .

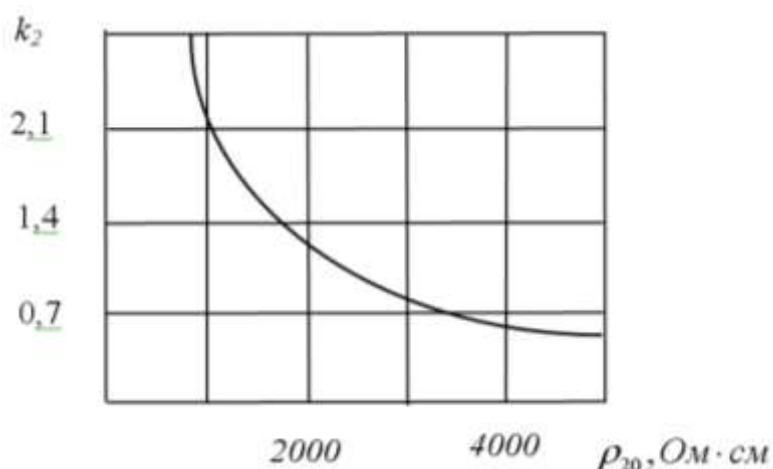


Рис. 2. Залежність поправочного коефіцієнта k_2 від питомого опору води ρ_{20} за 20 °C

Експериментальна перевірка наведеного методу (кондуктометр ММЗЧ – 04) показала, що похибка вимірювань не перевищувала $\pm 15\%$.

Слід відмітити, що із збільшенням забруднення електродів водонагрівачів, похибка вимірювання ρ збільшується.

В процесі експлуатації водонагрівачів необхідно знати усталене в кінці початкового періоду роботи після часткового осадження накипоутворювачів значення питомого опору води $\rho_{\text{уст.20}}$ за $\theta = 20^\circ\text{C}$. За ним можна встановити відповідність води джерела водопостачання водонагрівачу.

Так, якщо його величина вища за номінальне значення, то необхідно у воду додати хімічні реагенти, а коли нижча – дистильованої води або конденсат.

Для цього доцільно використовувати залежність між питомим опором води і концентрацією розчинених в ній електролітів [5]:

$$\rho_{20} = \frac{11,2 \cdot 10^3}{E/2} = \frac{11,2 \cdot 10^3}{\sum K} = \frac{11,2 \cdot 10^3}{\sum A}, \quad (6)$$

де E , $\sum K$, $\sum A$ – відповідно сумарні концентрації в природній воді основних іонів Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- ; катіонів Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ ; аніонів HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , мг.екв./кг.

Сумарна концентрація катіонів Ca^{2+} і Mg^{2+} являє собою загальну жорсткість води γ_3 [5]:

$$\rho_{20} = \frac{11,2 \cdot 10^3}{\Delta\gamma_3 + \sum K - \Delta\gamma_{3, \text{уст.}}}, \quad (7)$$

де $\Delta\gamma_3 = \gamma_3 - \gamma_{3, \text{уст.}}$ – зміна жорсткості води в кінці початкового періоду роботи.

Після перетворення отримаємо:

$$\frac{1}{\rho_{20}} = \frac{\Delta\gamma_3}{11,2 \cdot 10^3} + \frac{\sum K - \Delta\gamma_3}{11,2 \cdot 10^3}. \quad (8)$$

Друга складова виразу (8) являє собою значення $\frac{1}{\rho_{\text{уст.20}}}$.

Тоді з виразу (8) з поправочним коефіцієнтом 0,9 отримаємо:

$$\rho_{\text{уст.20}} = \frac{0,9}{\frac{1}{\rho_{20}} - \frac{\Delta\gamma_3}{11,2 \cdot 10^3}}. \quad (9)$$

Значення ρ_{20} і γ_3 визначають проведенням аналізу проби сирій води, а $\gamma_{3,\text{уст.}}$ беруть на основі досвіду роботи водонагрівачів.

За $\gamma_3 = 1,5 \div 7$ мг.екв./кг похибка розрахунків $\rho_{\text{уст.20}}$ за формулою (9) не більше $\pm 5\%$.

Щоб отримати $\rho_{\text{н20}}$ працюючого водонагрівача, за відомого $\rho_{\text{уст.20}}$, потрібно визначити кількість хімічних реагентів або води з високим ρ .

Величину питомого опору води ρ можна зменшити, якщо у воду додати солі (г):

$$\chi = S_H - S_{\text{уст}} \cdot Q, \quad (10)$$

де χ – кількість грам солі, що додається у воду;

S_H , $S_{\text{уст}}$ – вміст солі у воді, що відповідає номінальному та усталеному в кінці початкового періоду роботи значенням ρ , $\frac{\text{г}}{\text{м}^3}$;

Q – об'єм води замкнутої системи, в якій працює водонагрівач, м^3 .

Оскільки величини:

$$S_H = \frac{K}{\rho_{\text{н20}}}, \quad S_{\text{уст}} = \frac{K}{\rho_{\text{уст.20}}}, \quad (11)$$

де k – постійний коефіцієнт, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{см} \cdot \text{г}}{\text{м}^3}$,

то

$$\chi = \frac{K}{\rho_{\text{н20}}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{н20}}}{\rho_{\text{уст.20}}} \right). \quad (12)$$

Щоб на електродах зменшити корозію і накипоутворення для підсолювання води у водонагрівачах доцільно застосовувати кальциновану соду Na_2CO_3 , в якій $K = 5,39 \cdot 10^5 \frac{\text{Ом} \cdot \text{см} \cdot \text{г}}{\text{м}^3}$ [6].

Тоді для електродних водонагрівачів ЕПЗ і КЭВ:

$$\chi = 180 \cdot \left(1 - \frac{3000}{\rho_{\text{уст.20}}} \right) \cdot Q. \quad (13)$$

Коли необхідно збільшити ρ , потрібно додати в систему воду з високим питомим опором, об'єм, якої в літрах визначимо:

$$Y = \frac{1000 \chi_1}{S_{\text{усм}}}, \quad (14)$$

де χ_1 - надлишок солей у воді, г.

Після заміни χ_1 його виразом (10) із від'ємним знаком та з врахуванням співвідношення (11) отримаємо:

$$Y = 1000 \left(1 - \frac{\rho_{\text{усм.20}}}{3000} \right) \cdot Q. \quad (15)$$

За підсолювання води кальциновану соду доцільно вводити у вигляді концентрованого водного розчину. За опріснення частини води рівну її кількості, яка буде додаватись, потрібно забрати із системи.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Запропоновано метод визначення питомого опору води на основі показів вимірювальних приладів електродних водонагрівачів, які працюють за замкнутою системою теплопостачання. Регулювання питомого опору води таких систем дозволить забезпечити роботу водонагрівачів в режимах близьких до номінального.

Список використаних джерел

1. Корчемний, М. О. Энергозбереження в агропромисловому комплексі / М. О. Корчемний, В. С. Федорейко, В. П. Щербань – Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. – 974 с.
2. Павліський, В. М. Удосконалення системи експлуатації електротермічного обладнання біогазових установок / В. М. Павліський, В. Г. Подобайло, М. В. Потапенко // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – Т.13. – №3. – С. 144 – 148.
3. Казимир, А. П. Эксплуатация электротермических установок в сельскохозяйственном производстве / А. П. Казимир, И. Е. Кerpельова – М.: Россельхозиздат, 1984 – 208 с.
4. Электротехнология. / А. М. Басов, В. Г. Быков, А. В. Лаптев, В. Б. Файн – М.: Агропромиздат, 1985 – 256 с.
5. Матко, П. М. Электротеплоснабжение / П. М. Матко, К. Е. Баскин – М.: Энергия, 1971 – 274 с.

References

1. Korchemnyi, M. O., Fedoreiko, V. S., Shcherban V. P. (2001). Enerhozberezhennia v ahropromyslovomu kompleksi. [Energy conservation in agriculture]. Ternopil, Pidruchnyky i posibnyky, 984.
2. Pavliskyi, V. M. Podobailo, V. H., Potapenko, M. V. (2008). Udoskonalennia systemy ekspluatatsii elektrotermichnoho obladnannia biohazovykh ustanovok [Improving the operation of biogas plants electrothermal equipment]. Visnyk Ternopil'skoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu, 13 (3), 144 – 148.
3. Kazimir, A. P., Kerpel'ova, I. E. (1984). Ekspluatatsiya elektrotermicheskikh ustanovok v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Operation of electrothermal installations in agricultural production]. Moscow, Rossel'khozizdat, 208.
4. Basov, A.M., Bykov, V. G., Laptev, A. V., Fayn, V. B. (1985). Elektrotekhnologiya [Electrotechnology]. Moscow, Agropromizdat, 256.

5. Matko, P. M., Baskin, K. E. (1971). Elektroteplosnabzheniye [Electric heat supply]. Moskow, Energiya, 274.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

В. И. Подобайло, Н. В. Потапенко, Н. П. Семенова, В. Л. Шаршонь

Аннотация. Для повышения энерго-экономических показателей работы биогазовых установок предлагается для теплоснабжения метантенков биогаз заменить электротермическими аккумулирующими установками. Высокий КПД электродных водонагревателей обеспечивается при номинальных режимах работы и соответствующем удельном сопротивлении воды. Предложена методика определения удельного сопротивления воды электродных водонагревателей биогазовых установок на основе показаний электроизмерительных приборов, входящих в комплект электротермических установок. Это позволит поддерживать номинальные параметры работы электродных водонагревателей в течение всего периода эксплуатации.

Ключевые слова: биогазовые установки, электротермическое оборудование, электродные водонагреватели

WAYS TO IMPROVE ENERGY AND ECONOMIC PERFORMANCE OF BIOGAS PLANTS

V. G. Podobaylo, M. V. Potapenko, N. P. Semenova, V. L. Sharshon

Abstract. To improve energy and economic performance of biogas plants is proposed for heating of the digesters biogas to replace electrothermal accumulating plants. High efficiency electrode heaters are provided at nominal operating modes and the corresponding resistivity of the water. The methods of determining of specific resistivity of water of electrode water – heaters of biogas settings at the base of indexes of electromeasuring devices that are included into the set of electrothermal settings are suggested. It will allow to support the nominal parameters of the work of electrode water – heaters during all period of exploitation.

Keywords: biogas plant, of electrothermal equipment, electrode water – heaters

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ НАСИПУ ЗЕРНА ЯК ОБ'ЄКТА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В. О. ГРИЩЕНКО, кандидат технічних наук,

О. Д. КУРГАНСЬКИЙ, аспірант*

*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

Б. І. КОТОВ, доктор технічних наук, професор
Вінницький національний аграрний університет

E-mail: bepeck2001@rambler.ru

Анотація. В статті дано аналіз останніх досліджень щодо застосування технології охолодження зернового матеріалу безпосередньо в сховищах шляхом вентилявання насипу холодним повітрям. Для визначення динамічних характеристик об'єкта моделювання використано аналітично-розрахунковий метод, сутність якого полягає в наступному: на основі апріорної інформації про фізичну картину явищ, що відбуваються за взаємодії шару зерна із джерелом тепловиділень (біохімічного характеру) з охолоджуючим повітрям складаються рівняння теплового балансу в диференціальній формі з частинними похідними, які визначають градієнти параметрів повітря за висотою. Процеси тепло- і масообміну за охолодження зернових матеріалів шляхом відведення теплоти від матеріалу конвективним способом за фільтрації повітря описано типовими рівняннями теплового і матеріального балансу у вигляді замкненої системи.

Отримано математичну модель динамічних режимів охолодження вологого зерна в нерухомому шарі за активного вентилявання, яку можна розв'язати в середовищах MathCAD (MATLAB) за незмінних витрат повітря. Шляхом лінеаризації нелінійних рівнянь і застосовуючи до них перетворення Лапласа за нульових початкових умов, отримано систему диференціальних рівнянь в операторній формі. Отримано структурну схему лінійної математичної моделі, яка може бути використана для синтезу і аналізу САК процесом охолодження зерна в сховищі.

Ключові слова: *математична модель, передатна функція, насип зерна, охолоджене повітря*

Актуальність. Післязбиральна обробка зерна є обов'язковою умовою збереження зібраного врожаю в сховищах і є енергоємним процесом, який потребує вдосконалення та пошуку перспективних напрямів сушіння зерна.

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Б. І. Котов

© В. О. Грищенко, О. Д. Курганський, Б. І. Котов, 2017

Нині актуальною є проблема підвищення стійкості до зберігання свіжозібраного урожаю зернових культур за місцем їх виробництва.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні дослідження [1, 2] виявили перспективним застосування технології охолодження зернового матеріалу безпосередньо в сховищах шляхом вентилявання насипу холодним повітрям. При цьому застосовують машинне (паро-компресорні холодильні установки) охолодження повітря [3]. Зважаючи на значні об'єми зерна, що зберігаються в господарствах і відповідні потужності холодильних установок оптимальні режими періодичного охолодження [1] можна реалізувати тільки засобами автоматичного керування. Для синтезу САК температурними режимами охолодження необхідно мати динамічні характеристики об'єкту, бажано у вигляді передавальних функцій [4] за відповідними каналами, оскільки вентиляється насип зернового матеріалу досить високого шару, виникає необхідність врахування розподіленості параметрів об'єкту за координатою за напрямком руху фільтрованого повітря.

Існуючі математичні моделі описують [5] динаміку теплових процесів складними трансцендентними функціями, використання яких ускладнює синтез САК і її подальший аналіз.

Мета досліджень – визначення динамічних характеристик процесу вентилявання насипу зерна в сховищах на основі лінеаризованих рівнянь теплових процесів і відповідних передатних функцій.

Матеріали і методи дослідження. Для визначення динамічних характеристик об'єкта моделювання використано аналітично-розрахунковий метод, сутність якого полягає в наступному: на основі апріорної інформації про фізичну картину явищ, що відбуваються за взаємодії шару зерна із джерелом тепловиділень (біохімічного характеру) з охолоджуючим повітрям складаються рівняння теплового балансу в диференціальній формі з частинними похідними, які визначають градієнти параметрів повітря за висотою. Розв'язком системи рівнянь для сталого режиму визначається розподіл шуканих параметрів за висотою насипу і значення градієнтів у функції координат [6]. При цьому рівняння з частинними похідними замінюють звичайними диференціальними рівняннями, лінеаризація яких здійснюється звичайними методами [6].

Результати дослідження та їх обговорення. Процеси тепло- і масообміну за охолодження зернових матеріалів шляхом відведення теплоти від матеріалу конвективним способом за фільтрації повітря можна описати типовими рівняннями теплового і матеріального балансу у вигляді замкненої системи [7]:

$$m_z q_z + m_v c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_v c_p H \frac{\partial t}{\partial x} = m_z c_z \frac{\partial \theta_z}{\partial \tau} + r_0 m_0 \frac{\partial U}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$-m_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} = m_v \frac{\partial d}{\partial \tau} + G_v H \frac{\partial d}{\partial x}, \quad (2)$$

$$m_v c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_v c_p H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha f (\theta - t), \quad (3)$$

$$-\frac{\partial U}{\partial \tau} = k(U - b d), \quad (4)$$

де t, d – температура та вологовміст повітря;

θ, U – температура і вологовміст матеріалу;

m_v, m_z, m_0 – маса повітря, зерна і абсолютно сухого матеріалу в об'ємі шару;

c_p, c_z – питома теплоємність повітря і зерна;

G_v – витрати повітря;

H, f – висота насипу і поверхня зерна;

α, r_0 – коефіцієнт теплообміну і питома теплота пароутворення;

k – коефіцієнт сушіння.

З використанням (3) для сталого режиму отримаємо

$$t = \theta_m + (1 - \theta_m) e^{-\frac{x}{T_x}}, \quad (5)$$

де $T_x = G_v c_p H / \alpha f$.

Порівнюючи рівняння (2) і (4) з використанням рівняння матеріального балансу

$$m_0(U_0 - U) = m_v(d - d_0) \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

після диференціювання за умов: $x = 0, d = d_1$, матимемо:

$$d = D - (D - d_1) e^{-\frac{x}{T_{xd}}}, \quad (7)$$

де $D = \frac{D_1}{D_2 + b}; T_{xd} = \frac{G_v H}{m_0 k (D_2 + b)}; D_1 = U_0 - \frac{m_v}{m_0} d_0; D_2 = \frac{m_0}{m_z}$.

Диференціюючи рівняння (5) і (7) і підставляючи отримані значення в рівняння (1) – (3) та використовуючи заміну: $\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{r_0}{c} Rb \frac{dU}{d\tau}$ (де Rb – критерій Ребіндера) після перетворень отримаємо систему рівнянь у звичайних похідних:

$$T_1 \frac{dt}{d\tau} + t = k_0 x + m_1 G_v + \theta_m k x + m_1 G_v, \quad (8)$$

$$T_2 \frac{dd}{d\tau} + d = D - (D - d_1) - k_0 n_1 x - k_0 m_1 x G_v, \quad (9)$$

$$T_3 \frac{d\theta}{d\tau} + \theta = t + \frac{m_0 q}{\alpha f} U_0 + d + \frac{m_0 (k_0 k + q)}{\alpha f} U - \frac{r_0 m_0 k b}{\alpha f} d, \quad (10)$$

$$T_4 \frac{dU}{d\tau} + U = t + \frac{\alpha f}{m_0 (k_0 k + q)} t - \frac{\alpha f}{m_0 (k_0 k + q)} \theta + \frac{r_0 k b}{r_0 k + q} d + \frac{q U_0}{r_0 k + q}, \quad (11)$$

де $T_1 = \frac{m_v c_p}{\alpha f}; k_0 = \frac{m_0 k (D_2 + b)}{H}; T_2 = ; T_3 = \frac{m_0 + c_z}{\alpha f}; T_4 = \frac{r_0 Rb}{r_0 k + q};$

m_1, n_1 – коефіцієнти лінеаризації.

Таким чином система рівнянь (8) – (11) являє собою математичну модель динамічних режимів охолодження вологого зерна в нерухомому шарі за активного вентилявання, яку можна розв'язати в середовищах MathCAD (MATLAB) за незмінних витрат повітря.

Лінеаризуючи нелінійні рівняння (8) – (11) шляхом змінних параметрів процесу у вигляді суми сталого значення параметра і його приросту: $X = X_0 + \Delta X$ за звичайною методикою [4, 5] і застосовуючи до них перетворення Лапласа за нульових початкових умов, отримуємо систему диференціальних рівнянь в операторній формі:

$$T_1 p + 1 \bar{\Delta t} \bar{p} = k_1 \Delta t_1 \bar{p} + k_2 \Delta G_v \bar{p} + k_3 \Delta \theta_m \bar{p}, \quad (12)$$

$$T_2 p + 1 \bar{\Delta d} \bar{p} = k_4 \Delta G_v \bar{p} + k_5 \Delta d_1 \bar{p}, \quad (13)$$

$$T_3 p + 1 \bar{\Delta \theta} \bar{p} = k_6 \Delta t \bar{p} + k_7 \Delta U_1 \bar{p} + k_8 \Delta U \bar{p} + k_9 \Delta d \bar{p} + k_{10} \Delta q \bar{p}, \quad (14)$$

$$T_4 p + 1 \bar{\Delta U} \bar{p} = k_{11} \Delta t \bar{p} + k_{12} \Delta \theta \bar{p} + k_{13} \Delta d \bar{p} + k_{14} \Delta U_1 \bar{p} + k_{15} \Delta q \bar{p}, \quad (15)$$

де $k_1 = 1 + m_1 G_v - n_1 \bar{k}_0 X$; $k_2 = n_1 t_1 - m_1 \theta_m \bar{k}_0 X$; $k_3 = n_1 - G_v m_1 \bar{k}_0 X$; $k_4 = D m_1 + k_0 m_1 d_1 \bar{k}_0 X$; $k_5 = 1 - n_1 - m_1 G_v \bar{k}_0 X$; $k_6 = 1$; $k_7 = \frac{m_0 q}{\alpha f}$; $k_8 = \frac{m_0}{\alpha f} (k - q)$; $k_9 = -\frac{r_0 m_0 k b}{\alpha f}$; $k_{10} = \frac{m_0 (U_1 - U)}{\alpha f}$; $k_{11} = \frac{\alpha f}{m_0 (k_0 + q)}$; $k_{12} = k_{11}$; $k_{13} = \frac{r_0 k b}{r_0 k + q}$; $k_{14} = \frac{q}{r_0 k + q}$; $k_{15} = \frac{U_{10}}{r_0 k + q}$.

З рівнянь (12) – (15) визначимо передавальні функції окремих ланок за каналами регулювання ($\Delta G \rightarrow \Delta U$, $\Delta t \rightarrow \Delta U$) і збурення $\Delta t_1 \rightarrow \Delta U$, $\Delta d_1 \rightarrow \Delta U$:

$$W_1 \bar{p} = \frac{\Delta t \bar{p}}{\Delta t_1 \bar{p}} = \frac{k_1}{T_1 p + 1}; W_2 \bar{p} = \frac{\Delta t \bar{p}}{\Delta G_v \bar{p}} = \frac{k_2}{T_1 p + 1}; W_3 \bar{p} = \frac{\Delta t \bar{p}}{\Delta \theta_m \bar{p}} = \frac{k_3}{T_1 p + 1};$$

$$W_4 \bar{p} = \frac{\Delta d \bar{p}}{\Delta G_v \bar{p}} = \frac{k_4}{T_2 p + 1}; W_5 \bar{p} = \frac{\Delta d \bar{p}}{\Delta d_1 \bar{p}} = \frac{k_5}{T_2 p + 1}; W_6 \bar{p} = \frac{\Delta \theta \bar{p}}{\Delta t \bar{p}} = \frac{k_6}{T_3 p + 1};$$

$$W_7 \bar{p} = \frac{\Delta \theta \bar{p}}{\Delta U_1 \bar{p}} = \frac{k_7}{T_3 p + 1}; W_8 \bar{p} = \frac{\Delta \theta \bar{p}}{\Delta U \bar{p}} = \frac{k_8}{T_3 p + 1}; W_9 \bar{p} = \frac{\Delta \theta \bar{p}}{\Delta d \bar{p}} = \frac{k_9}{T_3 p + 1};$$

$$W_{10} \bar{p} = \frac{\Delta \theta \bar{p}}{\Delta q \bar{p}} = \frac{k_{10}}{T_3 p + 1}; W_{11} \bar{p} = \frac{\Delta U \bar{p}}{\Delta d \bar{p}} = \frac{k_{11}}{T_4 p + 1};$$

$$W_{12} \bar{p} = \frac{\Delta t \bar{p}}{\Delta \theta \bar{p}} = \frac{k_{12}}{T_4 p + 1};$$

$$W_{13} \bar{p} = \frac{\Delta U \bar{p}}{\Delta d \bar{p}} = \frac{k_{13}}{T_4 p + 1}; W_{14} \bar{p} = \frac{\Delta U \bar{p}}{\Delta U_1 \bar{p}} = \frac{k_{14}}{T_4 p + 1};$$

$$W_{15} \bar{p} = \frac{\Delta U \bar{p}}{\Delta q \bar{p}} = \frac{k_{15}}{T_4 p + 1}.$$

Використовуючи систему рівнянь (12) – (15) і отримані передатні функції складемо структурну схему лінійної математичної моделі динаміки теплообмінних і масо-обмінних процесів за сушіння зерна в нерухомому шарі активним вентиляванням атмосферним або підігрітим повітрям (рис.1).

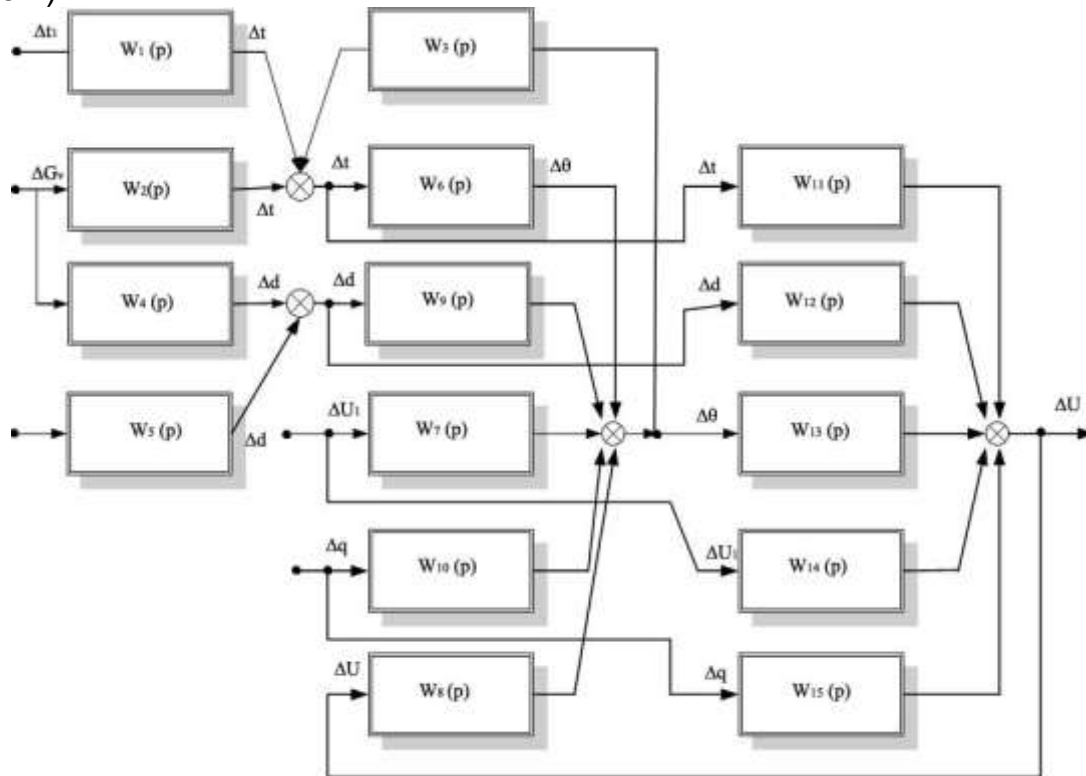


Рис. 1. Структурна схема лінійної математичної моделі процесу сушіння зерна активним вентиляванням

Висновки і перспективи. Моделювання процесу охолодження зерна дозволяє за наближеними формулами відтворити процес зміни температури і вологості зерна в часі і за висотою шару.

Отримана структурна схема лінійної математичної моделі може бути використана для синтезу і аналізу САК процесом охолодження зерна в сховищі.

Список використаних джерел

1. Станкевич, Г. Н. Консервация зерновой массы с использованием искусственно охлажденного воздуха / Г. Н. Станкевич, Б. Н. Петруня, И. И. Бичинюк, Ю. В. Лищенко // Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. – 2001. – 21. – С. 39–41.
2. Петруня, Б. Н. Перспективы использования холодильных систем для хранения зерна / Б. Н. Петруня, А. С. Титлов, С. Н. Кудашев // Хранение и переработка зерна. – 2002. – 12. – С. 33–34.
3. Грищенко, В. О. Математичне моделювання і розрахунок динамічних режимів повітроохолоджувача для охолодження зерна за зберігання / В. О. Грищенко, Б. І. Котов // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2016. – Вип. 252. – С. 108–114.

4. Грищенко, В. О. Автоматизація керування системою створення мікроклімату в камері плодовоовочесховищ / В. О. Грищенко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. – 2014. – Вип. 194(2). – С. 206–210.

5. Мартыненко, И. И. Автоматическое управление температурно-влажностными режимами сельскохозяйственных объектов [Текст] / И. И. Мартыненко, Н. Л. Гирнык. – М.: Колос, 1984 – 152 с.

6. Котов, Б. І. Врахування розподіленості параметрів при моделюванні динамічних сушарок сільськогосподарських матеріалів / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, В. О. Швидя // Сільськогосподарські машини. – 2016. – Вип. 34. – С. 74–80.

7. Котов, Б. І. Аналітичне дослідження тепломасопереносу в товстому шарі матеріалу при двостадійному процесі сушіння зерна / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2011. – Вип. 166(4). – С. 138–147.

References

1. Stankevich, G. N., Petrunja, B. N., Bichinjuk, I. I., Lishhenko, Ju. V. (2001). Konservacija zernovoj massy s ispol'zovaniem iskusstvenno ohlazhdennogo vozduha [Conservation of grain mass using artificially cooled air]. Scientific works of the Odessa State Academy of Food Technology, 21, 39–41.

2. Petrunja, B. N., Titlov, A. S., Kudashev, S. N. (2002). Perspektivy ispol'zovanija holodil'nyh sistem dlja hranenija zerna [Prospects for using refrigeration systems for grain storage]. Grain storage and processing, 12, 33–34.

3. Hryshchenko, V. O., Kotov, B. I. (2016) Matematychnе modeljuvannia i rozrakhunok dynamichnykh rezhymiv povitrookholodzhuvacha dlja okholodzhennia zerna za zberihannia [Mathematical modeling and calculation of dynamic modes of an air cooler for cooling grain storage]. Scientific Journal NUBiP Ukraine. Series: Engineering and Energy AIC, 252, 108–114.

4. Hryshchenko, V. O. (2014) Avtomatyzatsiia keruvannia systemoiu stvorennia mikroklimatu v kameri plodoovocheskhoveryshch [Automation control system create the microclimate in the storage chamber fruit and vegetables]. Scientific Journal NUBiP Ukraine. Series: Engineering and Energy AIC, 194(2), 206–210.

5. Martynenko, I. I., Girnyk, N. L., (1984). Avtomaticheskoe upravlenie temperaturno-vlazhnostnymi rezhimami sel'skohozjajstvennykh obektov [Automatic control of temperature-humidity modes of agricultural facilities]. Moscow: Kolos, 152.

6. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., Shvydia V. O. (2016) Vrakhuвання розподіленості параметрів при моделюванні динамічних сушарок сільськогосподарських матеріалів [Considering the distributed account settings at modeling dryers dynamic agricultural materials]. Agricultural machinery, 34, 74–80.

7. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A. (2011) Analitychne doslidzhennia teplomasoperenosu v товстому шарі матеріалу при двостадійному процесі сушіння зерна [Analytical study of heat and mass transfer in a thick layer of material at a two-stage process of drying grain]. Scientific Journal NUBiP Ukraine, 166(4), 138–147.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ НАСЫПИ ЗЕРНА КАК ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В. А. Грищенко, А. Д. Курганский, Б. И. Котов

Аннотация. В статье дан анализ последних исследований по применению технологии охлаждения зернового материала непосредственно в хранилищах путем вентилирования насыпи холодным воздухом. Для определения динамических характеристик объекта моделирования использованы аналитически-расчетный метод, сущность которого заключается в следующем: на основе априорной информации о физической картине явлений, происходящих при взаимодействии слоя зерна с источником тепловыделений (биохимического характера) с охлаждающим воздухом, составляются уравнения теплового баланса в дифференциальной форме в частных производных, которые определяют градиенты параметров воздуха по высоте. Тепло- и массообменные процессы при охлаждении зерновых материалов путем отвода теплоты от материала конвективным способом при фильтрации воздуха описаны типичными уравнениями теплового и материального баланса в виде замкнутой системы.

Получена математическая модель динамических режимов охлаждения влажного зерна в неподвижном слое при активной вентиляции, которую можно решить в средах MathCAD (MATLAB) при неизменных расходах воздуха. Путем линеаризации нелинейных уравнений и применяя к ним преобразования Лапласа при нулевых начальных условиях, получена система дифференциальных уравнений в операторной форме. Получена структурная схема линейной математической модели, которая может быть использована для синтеза и анализа САУ процессом охлаждения зерна в хранилище.

Ключевые слова: математическая модель, передаточная функция, насыпь зерна, охлажденный воздух

MATHEMATICAL MODELING OF THE COOLING PROCESS OF THE GRAIN PULP, AS OBJECTS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

V. O. Hryshchenko, A. D. Kurgan, B. I. Kotov

Annotation. The article analyzes the latest research on the application of the technology of cooling grain material directly in storage facilities by venting the mound with cold air. To determine the dynamic characteristics of the modeling object, the analytical-calculation method is used, the essence of which is as follows: on the basis of a priori information on the physical picture of the phenomena occurring when the grain layer interacts with the source of heat (biochemical) with cooling air, the heat balance equations in differential form in private Derivatives, which determine the gradients of air parameters in height. Heat and mass transfer processes during the cooling of grain materials by the removal of heat from the material by convective method during air filtration are described by typical equations of thermal and material balance in the form of a closed system.

A mathematical model of dynamic regimes for cooling moist grain in a fixed bed with active ventilation, which can be solved in MathCAD (MATLAB) environments with constant air flow, is obtained. By linearizing non-linear equations and applying Laplace transformations to them under zero initial conditions, we obtain a system of differential equations in operator form. A block diagram of a linear mathematical model is obtained that can be used to synthesize and analyze the automatic control system by the process of cooling the grain in a storage facility.

Keywords: *mathematical model, transfer function, grain embankment, cooled air*

УДК 621.316.929(088.8)

ЕКВІВАЛЕНТНА СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ОСНОВІ АНАЛОГА ЛЯМБДА-ДІОДА

І. О. ПОПОВА, кандидат технічних наук, доцент
С. Ф. КУРАШКІН, кандидат технічних наук, доцент
Таврійський державний агротехнічний університет
E-mail: irinapopova54@mail.ru

Анотація. *Робота присвячена розробці схеми заміщення аналога лямбда-діода на комплементарних польових транзисторах в якості первинного перетворювача та її дослідження з метою отримання рівняння залежності струму стоку від напруги на затискачах аналога лямбда-діода в залежності від параметрів схеми заміщення. Була складена повна еквівалентна схема заміщення аналогу лямбда-діода і проаналізовано її параметри з огляду на типові параметри застосованих кремнієвих польових транзисторів, що дало змогу спростити схему. Подальші дослідження дозволили отримати рівняння вольт-амперної характеристики лямбда-діода.*

Практичний інтерес має використання аналога лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача будь-якої фізичної величини, для чого аналог лямбда-діода був застосований у мостовій схемі вимірювача температури. У одній з діагоналей мостового вимірювача використовуються нелінійні елементи, опір яких залежить від температури.

Отримано рівняння вольт-амперної характеристики з урахуванням параметрів мостового вимірювача, що дає змогу стверджувати про можливість використання аналогу лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача. Область застосування аналога лямбда-діода широка.

A mathematical model of dynamic regimes for cooling moist grain in a fixed bed with active ventilation, which can be solved in MathCAD (MATLAB) environments with constant air flow, is obtained. By linearizing non-linear equations and applying Laplace transformations to them under zero initial conditions, we obtain a system of differential equations in operator form. A block diagram of a linear mathematical model is obtained that can be used to synthesize and analyze the automatic control system by the process of cooling the grain in a storage facility.

Keywords: *mathematical model, transfer function, grain embankment, cooled air*

УДК 621.316.929(088.8)

ЕКВІВАЛЕНТНА СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ОСНОВІ АНАЛОГА ЛЯМБДА-ДІОДА

І. О. ПОПОВА, кандидат технічних наук, доцент

С. Ф. КУРАШКІН, кандидат технічних наук, доцент

Таврійський державний агротехнічний університет

E-mail: irinapopova54@mail.ru

Анотація. *Робота присвячена розробці схеми заміщення аналога лямбда-діода на комплементарних польових транзисторах в якості первинного перетворювача та її дослідження з метою отримання рівняння залежності струму стоку від напруги на затискачах аналога лямбда-діода в залежності від параметрів схеми заміщення. Була складена повна еквівалентна схема заміщення аналогу лямбда-діода і проаналізовано її параметри з огляду на типові параметри застосованих кремнієвих польових транзисторів, що дало змогу спростити схему. Подальші дослідження дозволили отримати рівняння вольт-амперної характеристики лямбда-діода.*

Практичний інтерес має використання аналога лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача будь-якої фізичної величини, для чого аналог лямбда-діода був застосований у мостовій схемі вимірювача температури. У одній з діагоналей мостового вимірювача використовуються нелінійні елементи, опір яких залежить від температури.

Отримано рівняння вольт-амперної характеристики з урахуванням параметрів мостового вимірювача, що дає змогу стверджувати про можливість використання аналогу лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача. Область застосування аналога лямбда-діода широка.

Авторами отримані патенти, в яких використовуються аналог лямбда-діода: пристрої для контролю температури, відхилення напруги в електричній мережі, несиметрії напруги.

Ключові слова: *комплементарна пара, польові транзистори, первинний перетворювач, аналог лямбда-діода*

Актуальність. Лямбда-діод представляє собою напівпровідниковий пристрій, що складається з пари польових транзисторів з керованими p - n переходами, які включені за визначеною схемою і виконані на одному кристалі. Лямбда-діод має чотири різновиди та має характеристику перемикача, що дає змогу його широкого застосування. До недоліків лямбда-діода слід віднести неможливість регулювати або збільшувати ширину його природньої вольт-амперної характеристики.

Аналіз останніх досліджень. В ТДАТУ розроблено аналог лямбда-діода (рис.1), що складається з двох польових транзисторів, які являють собою комплементарну пару польових транзисторів з керуючими p - n переходами (англ. *complementation* – доповнення).

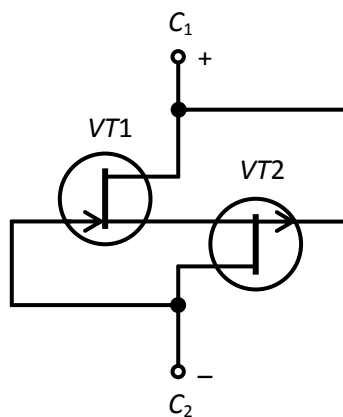


Рис. 1. Принципова схема аналогу лямбда-діода

Під комплементарною парою транзисторів мають на увазі такі транзистори, що схожі за абсолютними значеннями параметрів, але мають різні типи провідностей. Вони включені за визначеною схемою, один з польових транзисторів має канал p -типу, а інший – канал n -типу, витоки яких об'єднані [1].

Мета дослідження – дослідити еквівалентну схему заміщення аналога лямбда-діода з метою визначення можливості застосування його в якості вимірювального перетворювача.

Матеріали і методи дослідження. Для обґрунтування використання аналога лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача розглянемо повну еквівалентну схему заміщення аналога лямбда-діода, яка приведена на рис. 2.

Канал кожного польового транзистора і p - n перехід подані у вигляді RC ланок із зосередженими параметрами. Канали подані диференціальними опорами r_{c1} і r_{c2} і між-електродними ємностями C_{ci1} і

C_{ci2} , величина яких визначається геометрією і матеріалом польових транзисторів. Затвори аналога лямбда-діода подані опорами r_{31} і r_{32} .

Через опори каналів відбувається зарядка ємностей затворів. При цьому різні ділянки ємностей заряджаються через різні опори каналів у залежності від відстані даної ділянки від витоків. Прийнемо, що ємності затворів заряджаються через усереднені опори каналів $R_{\kappa 1}$ і $R_{\kappa 2}$, що і обумовлюють кінцеву усталену часу τ_3 лямбда-діода.

Значення параметрів кремнієвих польових транзисторів [2] за напруги $U_{ci} = 10$ В і $U_{3i} = 0$ є такі: $C_3 = 3...10$ пФ; $C_{3i} = 0,5$ пФ; $C_{c3} = 0,5$ пФ; $C_{ci} = 0,3...1$ пФ; $r_3 = 10^{10}$ Ом; $r_c = 0,1...1$ МОм; $R_{\kappa 1} \approx 200$ Ом; $R_{\kappa 2} = 75...200$ Ом.

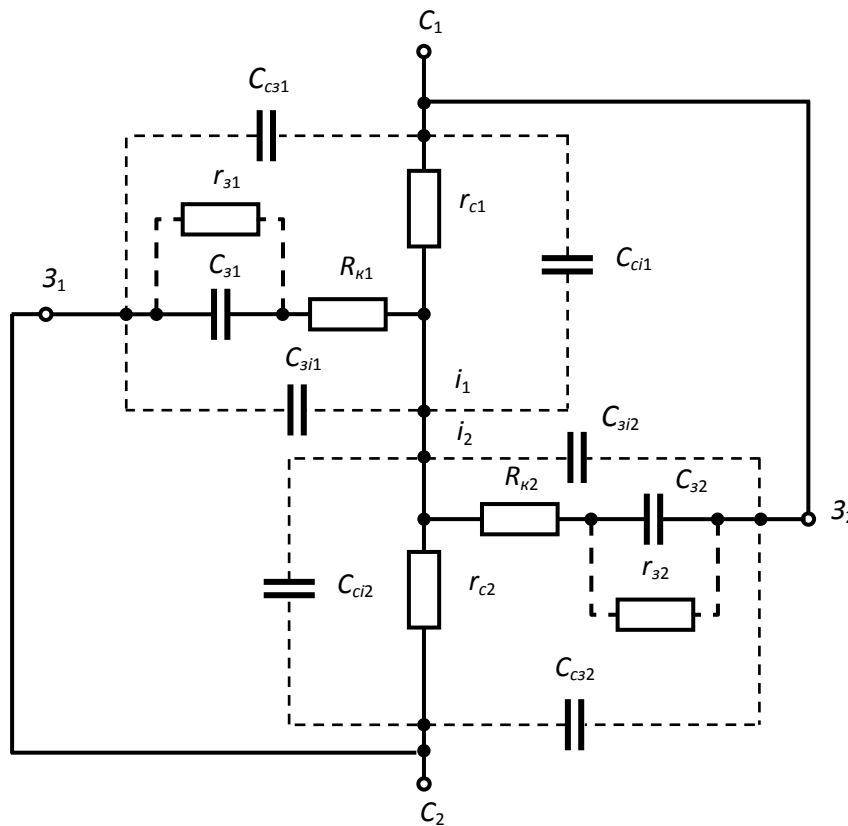


Рис. 2. Повна еквівалентна схема заміщення аналогу лямбда-діода

Оскільки значення ємностей C_3 , C_{3i} , C_{c3} , C_{ci} невеликі, то ними можна зневажити, а отже еквівалентна схема заміщення аналога лямбда-діода приймає вигляд, зображений на рис. 3.

Слід зазначити, що опори затворів достатньо великі – $10^9...10^{10}$ Ом [2], тому на диференціальні опори каналів r_{c1} і r_{c2} аналога лямбда-діода впливають не струми, що течуть через затвори польових транзисторів (у силу їх вкрай малих значень), а падіння напруг на їх затворах.

Результати досліджень та їх обговорення. Рівняння стокової вольт-амперної характеристики лямбда-діода:

$$I = \frac{1}{R_{\text{ко}1}} \frac{U_{\text{с}1}(U_{\text{зо}1} - U_{\text{з}1} - 1/2 U_{\text{с}1})}{U_{\text{зо}1}} = \frac{1}{R_{\text{ко}2}} \frac{U_{\text{с}2}(U_{\text{зо}2} - U_{\text{з}2} - 1/2 U_{\text{с}2})}{U_{\text{зо}2}}, \quad (1)$$

де $R_{\text{ко}1}, R_{\text{ко}2}$ – диференціальні опори каналів польових транзисторів;
 $U_{\text{с}1}, U_{\text{с}2}$ – падіння напруги між стоком і витком польових транзисторів;

$U_{\text{зо}1}, U_{\text{зо}2}$ – напруга відсічки польових транзисторів;

$U_{\text{з}1}, U_{\text{з}2}$ – напруга між затвором і витком польових транзисторів.

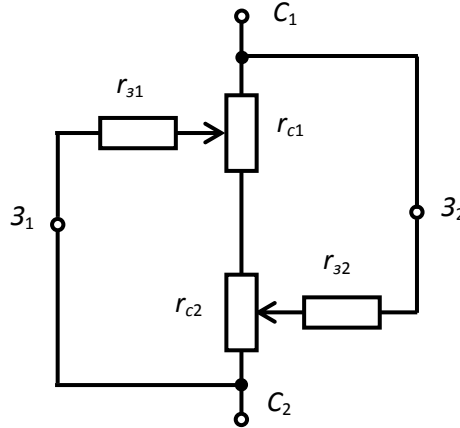


Рис. 3. Спрощена схема заміщення аналогу лямбда-діода

Оскільки напруга між затвором і витком транзистора $VT1$ дорівнює падінню напруги між стоком і витком транзистора $VT2$, тобто $U_{\text{з}1} = U_{\text{с}2}$, а напруга між затвором і витком транзистора $VT2$ дорівнює падінню напруги між стоком і витком транзистора $VT1$, тобто $U_{\text{з}2} = U_{\text{с}1}$, то напруга на аналогу лямбда-діода буде дорівнювати:

$$U_{\lambda} = U_{\text{с}1} + U_{\text{с}2}. \quad (2)$$

Після підстановки (2) у (1) одержимо рівняння:

$$I = \frac{1}{R_{\text{ко}2} U_{\text{зо}2}} \cdot U_{\text{с}2} \cdot U_{\text{зо}2} - \frac{1}{R_{\text{ко}2} U_{\text{зо}2}} \cdot U_{\text{с}2} \cdot U_{\text{с}1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{R_{\text{ко}2} U_{\text{зо}2}} \cdot U_{\text{с}2}. \quad (3)$$

Оскільки в аналогу лямбда-діода використовується комплементарна пара польових транзисторів, прийнемо такі умови: $I_{\text{с}1} = I_{\text{с}2}$, $U_{\text{с}1} = U_{\text{с}2}$, $U_{\text{зо}1} = U_{\text{зо}2}$, $R_{\text{ко}1} = R_{\text{ко}2}$, тоді рівняння вольт-амперної характеристики аналога лямбда-діода буде мати вигляд:

$$I = \frac{1}{2R_{\text{ко}}} \cdot U_{\lambda} - \frac{3}{8} \cdot \frac{1}{R_{\text{ко}} U_{\text{зо}}} \cdot U_{\lambda}^2. \quad (4)$$

Для використання аналога лямбда-діода, наприклад, в якості вимірювального перетворювача температури, включимо його за схемою моста (рис. 4). Еквівалентна схема заміщення аналога лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача температури буде мати вигляд, зображений на рис. 5.

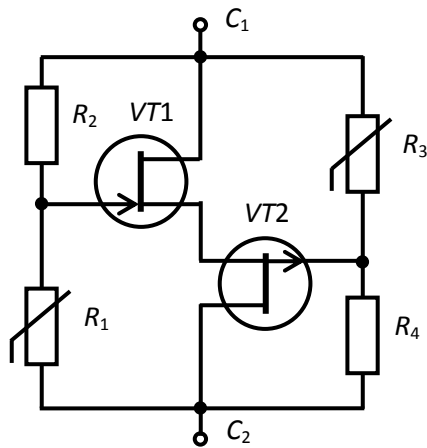


Рис. 4. Схема аналогу лямбда-діода в якості перетворювача температури

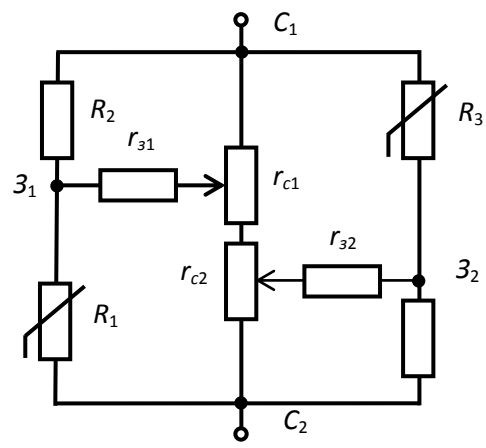


Рис. 5. Схема заміщення аналогу лямбда-діода в якості перетворювача температури

У якості резисторів R_1 і R_3 можна використати терморезистори з від'ємним або позитивним температурним коефіцієнтом опору (термістори або позистори), інші нелінійні елементи, опір яких залежить від будь-якої фізичної величини. Напруга на затворах лямбда-діода залежить від величини опорів терморезисторів R_1 , R_3 і резисторів R_2 , R_4 . Рівняння цієї залежності має вигляд:

$$U_3 = \frac{U_\lambda}{2} - U_\lambda \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_\lambda}{2} - U_\lambda \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4}. \quad (5)$$

Для спрощення розрахунку параметрів аналога лямбда-діода прийнемо, що R_1 і R_3 – терморезистори одного типу, які знаходяться в однакових температурних умовах, а опори резисторів R_2 і R_4 рівні між собою. Тоді рівняння вольт-амперної характеристики аналога лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача температури буде мати вигляд:

$$I_C = \frac{1}{2R_{ko}} \cdot U_\lambda - \frac{U_\lambda^2}{2R_{ko} \cdot U_{30}} \left(\frac{3}{4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right). \quad (6)$$

Використовуючи схему заміщення можна розрахувати вольт-амперну характеристику, визначити струм стоку, напругу запирання, а також вибрати параметри резисторів для використання аналога лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача температури.

Висновки і перспективи подальших досліджень. З аналізу рівнянь вольт-амперної характеристики аналога лямбда-діода можна зробити висновок щодо його використання в якості вимірювального перетворювача будь-якої фізичної величини.

Список використаних джерел

1. Жарков, В. Я. Застосування аналогу лямбда-діода для діагностики та захисту електрообладнання від аномальних режимів роботи / В. Я. Жарков, І. О. Попова // Науковий вісник Національного Аграрного Університету. – К.: НАУ, 1999. – Вип.19. – С.211-215.

2. Степаненко, И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И. П. Степаненко. – М.: Энергия, 1977. – 671 с.

References

1. Zharkov, V. Y., Popova, I. O. (1999). Zastosuvannja analogu ljambda-dioda dlja diagnostiki ta zahistu elektroobladnannja vid anormal'nih rezhimiv roboti [Lambda-diode analogue application for diagnostics and electrical equipment defense from the abnormal modes]. Kyiv, Ukraine: Scientific announcer of National Agriculture University, 19, 211–215.

2. Stepanenko I. P. (1977). Osnovy teorii tranzistorov I transistornyh shem [basic theory of transistors and transistor circuits]. Moscow: Energy, 671.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ АНАЛОГА ЛЯМБДА-ДИОДА

И. А. Попова, С. Ф. Курашкин

Аннотация. Работа посвящена разработке схемы замещения аналога лямбда-диода на комплементарных полевых транзисторах в качестве первичного преобразователя и ее исследование с целью получения уравнения зависимости тока стока от напряжения на зажимах аналога лямбда-диода в зависимости от параметров схемы замещения. Была составлена полная эквивалентная схема замещения аналога лямбда-диода и проанализированы ее параметры с учетом типичных параметров применяемых кремниевых полевых транзисторов, что дало возможность упростить схему. Дальнейшие исследования позволили получить уравнение вольт-амперной характеристики лямбда-диода.

Практический интерес имеет применение аналога лямбда-диода в качестве измерительного преобразователя любой физической величины, для чего аналог лямбда-диода был применен в мостовой схеме измерителя температуры. В одной из диагоналей мостового измерителя используются нелинейные элементы, сопротивление которых зависит от температуры.

Получено уравнение вольтамперной характеристики с учетом параметров мостового измерителя, что дает возможность утверждать о возможности использования аналога лямбда-диода в качестве измерительного преобразователя. Область применения аналога лямбда-диода широкая.

Авторами получены патенты, в которых используется аналог лямбда-диода: устройства для контроля температуры, отклонения напряжения в электрической сети, несимметрии напряжения.

Ключевые слова: *комплементарная пара, полевые транзисторы, первичный преобразователь, аналог лямбда-диода*

THE EQUIVALENT CIRCUIT OF SUBSTITUTION AS A PRIMARY ELEMENT BASED ON LAMBDA DIODE ANALOGUE

I. A. Popova, S. F. Kurashkin

Abstract. *The research is devoted to lambda-diode analogue equivalent circuit of substitution development as a transducer and receipt of equalization of current of flow and tension on the clamps of lambda-diode analogue depending on the parameters of substitution circuit. There was made complete equivalent circuit of substituting for lambda-diode analogue. Its parameters have been analyzed and typical parameters applied the FET transistors were taking into account, that enabled to simplify a circuit. Further researches allowed to get a volt-ampere characteristic of lambda-diode equalization. Lambda-diode analogue application as a measuring transducer of any physical unit has a practical interest. For that purpose the lambda-diode analogue was applied in the bridge circuit as a temperature measurer. Nonlinear elements which resistance depends on a temperature are used in one of diagonals of measurer bridge. Volt-ampere characteristic equalization was determined and parameters of measurer bridge were taking into account. It enables to state about possibility to use a lambda-diode analogue as a measuring transducer. An application of lambda-diode analogue is wide. Patents where lambda-diode analogue is used were received by authors: device for control a temperature, voltage deviation in electrical network, voltage asymmetry.*

Keywords: *complementation pair, FET transistors, primary element, transducer, lambda diode analogue*

УДК 632.9:631.302

МОДЕЛЬ БІОЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕЗОНАНСУ ЗА ПЕРЕДПОСІВНОГО ОБРОБІТКУ НАСІННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

А. Г. КУШНІРЕНКО, кандидат технічних наук, доцент
ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»

E-mail: nni elektrik@gmail.com

Анотація. *Дослідження присвячені вивченню поведінки узагальнюючого вектора намагніченості в насінні сільськогосподарських культур за дії на нього поздовжніми постійними та поперечними змінними магнітними полями за методикою ядерного магнітного резонансу.*

На основі проведених теоретичних досліджень визначено величину середньої магнітної сприйнятливості одиниці об'єму насіння х

© А. Г. Кушніренко, 2017

Ключевые слова: *комплементарная пара, полевые транзисторы, первичный преобразователь, аналог лямбда-диода*

THE EQUIVALENT CIRCUIT OF SUBSTITUTION AS A PRIMARY ELEMENT BASED ON LAMBDA DIODE ANALOGUE

I. A. Popova, S. F. Kurashkin

Abstract. *The research is devoted to lambda-diode analogue equivalent circuit of substitution development as a transducer and receipt of equalization of current of flow and tension on the clamps of lambda-diode analogue depending on the parameters of substitution circuit. There was made complete equivalent circuit of substituting for lambda-diode analogue. Its parameters have been analyzed and typical parameters applied the FET transistors were taking into account, that enabled to simplify a circuit. Further researches allowed to get a volt-ampere characteristic of lambda-diode equalization. Lambda-diode analogue application as a measuring transducer of any physical unit has a practical interest. For that purpose the lambda-diode analogue was applied in the bridge circuit as a temperature measurer. Nonlinear elements which resistance depends on a temperature are used in one of diagonals of measurer bridge. Volt-ampere characteristic equalization was determined and parameters of measurer bridge were taking into account. It enables to state about possibility to use a lambda-diode analogue as a measuring transducer. An application of lambda-diode analogue is wide. Patents where lambda-diode analogue is used were received by authors: device for control a temperature, voltage deviation in electrical network, voltage asymmetry.*

Keywords: *complementation pair, FET transistors, primary element, transducer, lambda diode analogue*

УДК 632.9:631.302

МОДЕЛЬ БІОЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕЗОНАНСУ ЗА ПЕРЕДПОСІВНОГО ОБРОБІТКУ НАСІННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

А. Г. КУШНІРЕНКО, кандидат технічних наук, доцент
ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»

E-mail: nni elektrik@gmail.com

Анотація. *Дослідження присвячені вивченню поведінки узагальнюючого вектора намагніченості в насінні сільськогосподарських культур за дії на нього поздовжніми постійними та поперечними змінними магнітними полями за методикою ядерного магнітного резонансу.*

На основі проведених теоретичних досліджень визначено величину середньої магнітної сприйнятливості одиниці об'єму насіння х

© А. Г. Кушніренко, 2017

та величину вектора намагніченості $\vec{M}$. Побудована математична модель для біологічної системи з урахуванням магнітного поля Землі. Встановлено, що для технології передпосівного обробітку насіння сільськогосподарських культур, індуктор, який утворює постійне магнітне поле, необхідно розташувати таким чином, щоб вектор напруженості постійного магнітного поля індуктора співпав із вектором напруженості магнітного поля Землі.

Ключові слова: *біоенергетичний резонанс, передпосівний обробіток насіння сільськогосподарських культур, постійне магнітне поле, змінне магнітне поле, поздовжня та поперечна релаксації*

Актуальність. У разі вирішення задач, пов'язаних з розробкою електротехнологій передпосівного обробітку насіння сільськогосподарських культур, виникає проблема встановлення взаємозв'язку параметрів електромагнітного поля (ЕМП) з електрофізичними характеристиками біологічної системи (БС) рослинного походження. За оптимального їх взаємовідношення та за співпадання частоти ЕМП з частотою основних чинників БС відбувається резонансне поглинання енергії поля, що призводить до прискорення біохімічних та фізіологічних процесів цієї системи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На належному рівні вивчено застосування ядерного магнітного резонансу в різних областях науки: в спектроскопії – для кількісного визначення вмісту певних атомів у речовині, в медицині – для діагностування органів, в квантовій хімії – для визначення констант і т. п. [1-3]. Для стимуляції насіння, росту та розвитку рослин застосування методу ядерного магнітного резонансу вивчено недостатньо.

Застосування метода ядерного магнітного резонансу в технології передпосівної обробки насіння дає можливість більш глибоко зрозуміти механізм впливу магнітного поля на насіння й визначити ефективні режими обробки.

Мета досліджень теоретично дослідити процес біоенергетичного резонансу за передпосівного обробітку насіння сільськогосподарських культур та побудувати математичну модель.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження базуються на основі феноменологічної теорії магнітного резонансу, розробленій Ф. Блохом, заснованій на можливості виділення деяких макроскопічних характеристик системи мікрочастин, які мають зміст середніх значень тих чи інших фізичних параметрів цієї системи.

В нашому випадку об'єктом дослідження є молекула, клітина, орган (зародок насінини). Припустимо деяке спрощення. Насінина має форму сфери з однорідними за об'ємом і постійними протягом певного часу електрофізичними параметрами. Насінину розглядаємо як фізичну точку і це припустимо для технології обробітку протруєного та запакованого в

мішкотару насіння без його розпакування. Насінина має усереднене постійне значення магнітної сприйнятливості, тобто $\chi = \text{const}$.

В якості макроскопічної характеристики системи середнього значення, Φ . Блох запропонував використовувати вектор намагніченості $\vec{M}$:

$$\vec{M} = \sum_i \vec{\mu}_i \quad (1)$$

де μ_i – магнітний момент основних чинників системи.

Для макроскопічних тіл вектор намагніченості $\vec{M}$ займає в поздовжньому постійному магнітному полі H встановлене урівноважене положення. Величина вектора намагніченості в даному випадку визначається за виразом:

$$\vec{M} = \chi \vec{H}, \quad (2)$$

де χ – середня магнітна сприйнятливість одиниці об'єму речовини.

У разі накладання поперечного змінного магнітного поля H_1 , за співпадіння частот коливання БС і частоти поля H_1 виникає магнітний резонанс. Тобто за умови:

$$\omega_1 = \omega,$$

де ω_1 – часта змінного магнітного поля H_1 ;

ω – частота прецесії вектора намагніченості.

Для даного випадку в загальному вигляді система рівнянь Блоха записується:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM(t)}{dt} &= \gamma \vec{M}(t) \times \vec{H}_1(t) \\ \frac{dM_z(t)}{dt} &= -\frac{M_z(t) - M_0}{T_1} \\ \frac{dM_{\perp}(t)}{dt} &= \frac{M_{\perp}(t)}{T_2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де γ – гіромагнітне відношення вектора намагніченості M до власного моменту БС;

H_1 - поперечне змінне магнітне поле;

M_z - поздовжня компонента вектора намагніченості;

$M_{\perp}$ – поперечна компонента вектора намагніченості;

T_1 – час поздовжньої (спін - решіткової) релаксації;

T_2 – час поперечної (або спін – спінової) релаксації.

Система диференціальних рівнянь 3 описує поведінку сумарного вектора намагніченості M та його складових M_z і $M_{\perp}$, які утворилися в результаті накладання поздовжнього постійного магнітного поля H та дії поперечного змінного магнітного поля H_1 . За допомогою зазначеної системи рівнянь математично описується процес магнітного резонансу даної системи.

Із цієї система диференціальних рівнянь, розглянемо перше:

$$\frac{d\vec{M}(t)}{dt} = \gamma \vec{M}(t) \times \vec{H}_1(t).$$

Якщо це рівняння розписати у вигляді рівнянь для окремих компонент вектора $\vec{M}$ через визначники, то отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} M_x(t) &= \gamma \begin{vmatrix} M_y(t) & M_z(t) \\ H_y(t) & H_z(t) \end{vmatrix} = \gamma M_y(t) \cdot H_z(t) - M_z(t) \cdot H_y(t) \\ M_y(t) &= \gamma \begin{vmatrix} M_z(t) & M_x(t) \\ H_z(t) & H_x(t) \end{vmatrix} = \gamma M_z(t) \cdot H_x(t) - M_x(t) \cdot H_z(t) \\ M_z(t) &= \gamma \begin{vmatrix} M_x(t) & M_y(t) \\ H_x(t) & H_y(t) \end{vmatrix} = \gamma M_x(t) \cdot H_y(t) - M_y(t) \cdot H_x(t) \end{aligned} \right\}.$$

Якщо ж додати відповідні доданки поздовжньої і поперечної релаксації, отримуємо систему диференціальних рівнянь у наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_x(t)}{dt} &= \gamma M_y(t) \cdot H_z(t) - M_z(t) \cdot H_y(t) - \frac{M_x(t)}{T_2} \\ \frac{dM_y(t)}{dt} &= \gamma M_z(t) \cdot H_x(t) - M_x(t) \cdot H_z(t) - \frac{M_y(t)}{T_2} \\ \frac{dM_z(t)}{dt} &= \gamma M_x(t) \cdot H_y(t) - M_y(t) \cdot H_x(t) - \frac{M_z(t) - M_0}{T_1} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Слід зазначити, що рівняння 3 і 4 можна застосувати для проведення теоретичного експерименту з метою визначення складових цієї системи.

Результати дослідження та їх обговорення. Взаємодію вектора намагніченості $\vec{M}$ із поздовжнім постійним магнітним полем H та поперечним змінним магнітним полем H_1 можна проаналізувати, відобразивши векторну схему, наведеною на рис. 1.

Умовна схема переходу із основного 1 у збуджений 2 стан вектора намагніченості $\vec{M}$ окремо взятої насінини сільськогосподарської культури наведеною на рис. 2.

Кількісний вміст та магнітні властивості елементів і молекул для клітини рослинного походження наведено у таблиці 1 [1-3].

За виразом 2 та за даними таблиці 2 визначено для системи мікрочастин клітини рослинного походження макроскопічну характеристику, вектор намагніченості $M = 13,125 \text{ мА/м}$, за напруженості продольного постійного магнітного поля $H = 625 \text{ А/м}$.

У разі накладання поперечного змінного магнітного поля H_1 та співпадіння частоти коливання вектор намагніченості $\vec{M}$ із частотою поля

H_1 виникає магнітний резонанс. Тобто за $\omega_1 = \omega$, де ω_1 – часта змінного магнітного поля H_1 , ω – частота прецесії вектора намагніченості M .

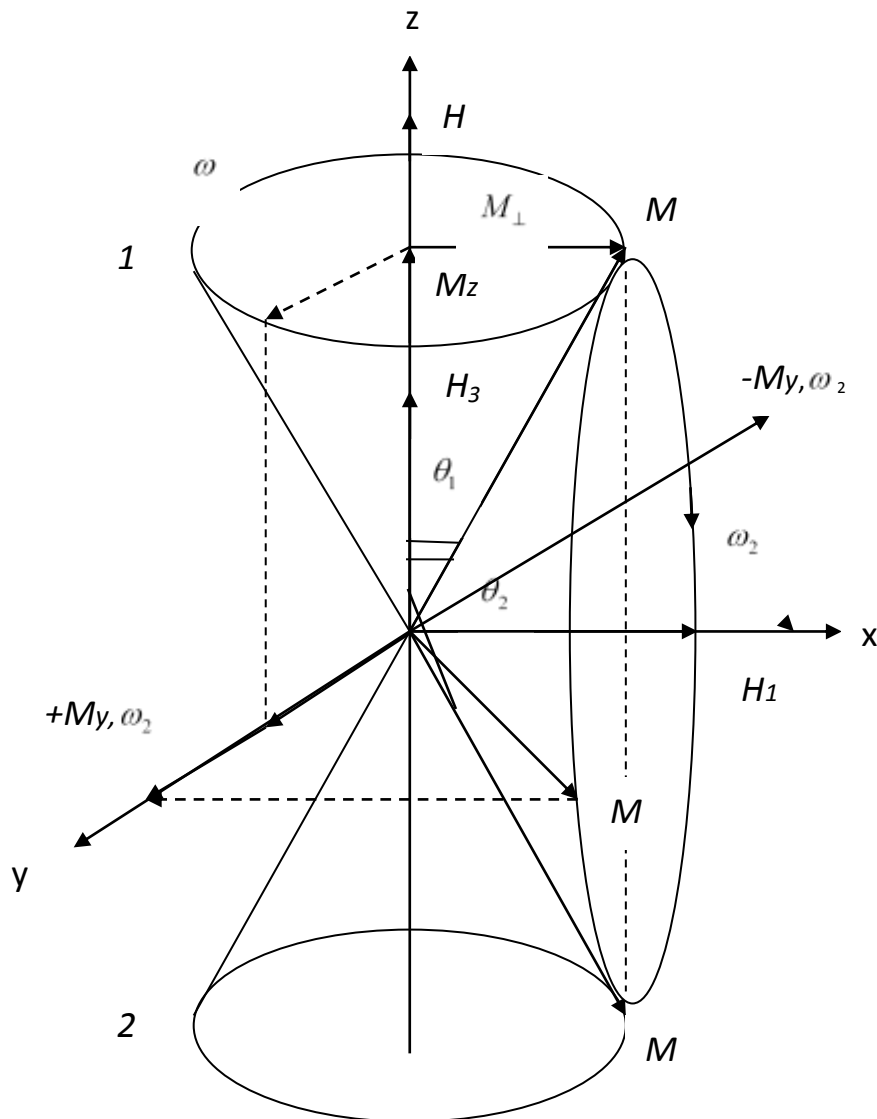


Рис. 1. Взаємодія вектора намагніченості M із поздовжнім постійним магнітним полем H та поперечним змінним магнітним полем H_1

Припустивши, що котушка індуктивності з власним значенням індуктивності L_0 і опором R_0 знаходиться в магнітному полі H і її обмоткою протікає електричний струм $I = I_0 \cos \omega t$ від підключеного генератора. Електричний струм I утворює змінне магнітне поле H_1 , яке перпендикулярне магнітному полю H . За магнітного резонанса в насінні виникатиме комплексна динамічна магнітна сприйнятливість:

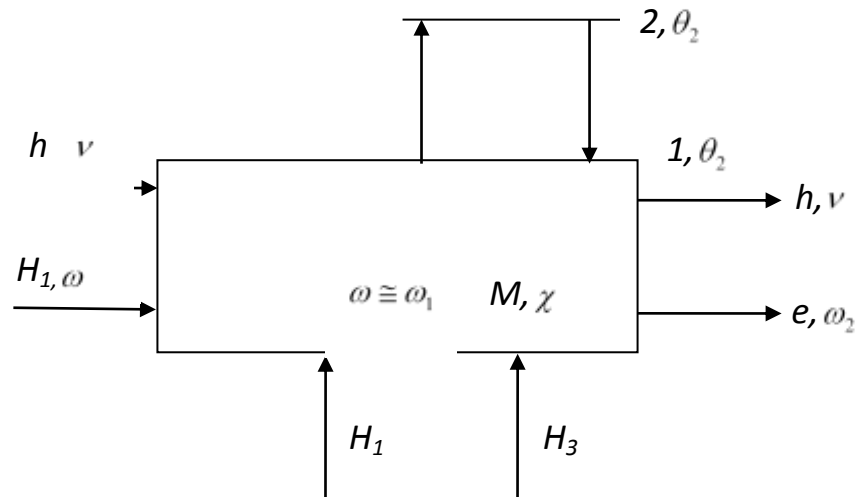


Рис. 2. Умовна схема переходу із основного стану 1 у збуджений (резонансний) стан 2 вектора намагніченості M окремо взятої насінини

1. Вміст та магнітні властивості елементів і молекул для клітини рослинного походження

% п. п.	Назва	Хімічне позначення	Вміст, %	χ	M , мА/м	Магнітні властивості
1	Кисень	O	65 - 75	$1,7 \cdot 10^{-5}$	10,625	П.
2	Вуглець	C	15 - 18	-		Н.
3	Водень	H	8 - 10	-		Н.
4	Азот	N	1,5 - 3	$1,3 \cdot 10^{-5}$	8,125	П.
5	Вода	H ₂ O	12	$-0,9 \cdot 10^{-5}$	-5,625	Д.
6	Σ	-	-	$2,1 \cdot 10^{-5}$	13,125	П.

$$\chi = \chi' - j\chi'' = \frac{u_0 \cos f(t, t_0) - v_0 \sin f(t, t_0) \exp\left[-\frac{(t-t_0)}{T_2}\right] + |\gamma| H_1 \int_{t_0}^t M_z(t') \exp\left[-\frac{(t-t_0)}{T_2}\right] \sin f(t, t') dt'}{2H_1} + \dots \quad (5)$$

$$+ j \frac{u_0 \sin f(t, t_0) + v_0 \cos f(t, t_0) \exp\left[-\frac{(t-t_0)}{T_2}\right] - |\gamma| H_1 \int_{t_0}^t M_z(t') \exp\left[-\frac{(t-t_0)}{T_2}\right] \cos f(t, t') dt'}{2H_1} = \frac{u}{2H_1} + j \frac{v}{2H_1}$$

Оскільки магнітна проникність насіння становить $\mu = 1 + \chi$, можна визначити індуктивність резонатора (вимірювальна комірка, резонатор):

$$L = \begin{bmatrix} u_0 \cos f(t, t_0) - v_0 \sin f(t, t_0) \bar{\exp}\left[-\frac{(t-t_0)}{T_2}\right] + \\ + |\gamma| H_1 \int_{t_0}^t M_z(t') \exp\left[-\frac{(t-t')}{T_2}\right] \sin f(t, t') dt' \\ 1 + \left(\frac{\phantom{u_0 \cos f(t, t_0) - v_0 \sin f(t, t_0) \bar{\exp}\left[-\frac{(t-t_0)}{T_2}\right] +}{2H_1} \right) - \\ \\ u_0 \sin f(t, t_0) + v_0 \cos f(t, t_0) \bar{\exp}\left[-\frac{(t-t_0)}{T_2}\right] - \\ - |\gamma| H_1 \int_{t_0}^t M_z(t') \exp\left[-\frac{(t-t')}{T_2}\right] \cos f(t, t') dt' \\ - j \frac{\phantom{u_0 \sin f(t, t_0) + v_0 \cos f(t, t_0) \bar{\exp}\left[-\frac{(t-t_0)}{T_2}\right] -}{2H_1} \end{bmatrix} L_0 . \quad (6)$$

Або

$$L = \mu L_0 = 1 + (\chi' - j\chi'') \bar{L}_0 = \left[1 + \left(\frac{u}{2H_1} - j \frac{v}{2H_1} \right) \right] L_0 . \quad (7)$$

У разі проведення досліду за $H = const$, інтенсивність сигналу резонансного поглинання енергії поля буде пропорційне лише полю H_1 .

В резонансному режимі траєкторію у вигляді спіралі на поверхні сфери буде описувати вектор поздовжньої намагніченості за переходу із основного стану 1 у збуджений 2 (резонансний), що і зображено на рис. 3.

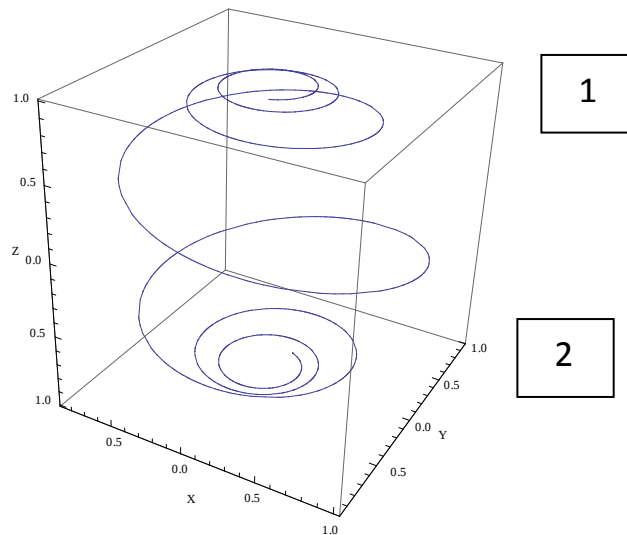


Рис. 3. Траєкторія, яку описує вектор поздовжньої намагніченості на поверхні шару за переходу із основного стану 1 у збуджений 2 (резонансний)

Висновки і перспективи. Підсумовуючи результати теоретичних досліджень можна констатувати, що процес біоенергетичного резонансу за дослідження насіння сільськогосподарських культур необхідно описувати із врахуванням напруженості магнітного поля Землі.

Індуктор, який створює постійне магнітне поле у досліджуваному зразку, необхідно розмістити в просторі таким чином, щоб його вектор напруженості співпав з напрямом вектора напруженості магнітного поля Землі.

Резонатор виготовляється у вигляді котушки індуктивності із індуктивністю, визначеною за виразом 7.

Список використаних джерел

1. Гюнтер, Х. Введение в курс спектроскопии ЯМР / Х. Гюнтер / пер. с англ. М.: Мир, 1984. 478 с.
2. Чижик, В. И. Квантовая радиофизика. Магнитный резонанс и его приложения / В. И. Чижик. СПб: Изд-во С-Петербур. ун-та, 2009. 700 с.
3. Аминова, Р. М. Квантовохимические методы вычисления констант ядерного магнитного экранирования / Р. М. Аминова // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2002. № 6. С. 11.

References

1. Gyunter, K. H. (1984). Vvedeniye v kurs spektroskopii YAMR [Introduction to the course of NMR spectroscopy]. Moskow, Mir, 478.
2. Chizhik, V. I. (2009). Kvantovaya radiofizika. Magnitnyy rezonans i ego prilozheniya [Quantum Radiophysics. Magnetic resonance and its applications]. Izd-vo S-Peterb. un-ta, 700.
3. Aminova, R. M. (2002). Kvantovokhimicheskiye metody vychisleniya konstant yadernogo magnitnogo ekranirovaniya [Quantum-chemical methods for calculating nuclear magnetic shielding constants]. Khimiya i komp'yuternoye modelirovaniye. Butlerovskiye soobshcheniya, 6, 11.

МОДЕЛЬ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА ПРИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

А. Г. Кушниренко

Аннотация. *Исследования посвящены изучению поведения обобщающего вектора намагниченности в семенах сельскохозяйственных культур при воздействии на него продольным постоянным и поперечным переменным магнитными полями по методике ядерного магнитного резонанса.*

На основе проведенных теоретических исследований определена величина средней магнитной восприимчивости единицы объема семян χ и величины вектора намагниченности. Построена математическая модель для биологической системы с учетом магнитного поля Земли. Установлено, что для технологии предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур, индуктор, который образует постоянное магнитное поле, необходимо расположить таким образом, чтобы вектор напряженности постоянного магнитного поля индуктора совпал с вектором напряженности магнитного поля Земли.

Ключевые слова: *биоэнергетический резонанс, предпосевную обработку семян сельскохозяйственных культур, постоянное магнитное поле, переменное магнитное поле, продольная и поперечная релаксации*

MODEL BIOENERGETIC RESONANCE AT PREPLANTING SOIL SEED CROPS

A. G. Kushnirenko

Abstract: *Research dedicated studied the behavior of magnetization vector synthesis in seed crops by the action of his regular longitudinal and transverse alternating magnetic fields for nuclear magnetic resonance technique.*

On the basis of theoretical studies determined the average value of the magnetic susceptibility χ seeds per unit volume and the value of the magnetization vector. A mathematical model for biological systems, taking into account the Earth's magnetic field. Established that the technology for preplant soil seed crops, inductor, which forms a permanent magnetic field should be placed so that the vector of the constant magnetic field vector coincided with the inductor magnetic field of the Earth.

Keywords: *bioenergetic resonance, pre-seed crop cultivation, constant magnetic field, alternating magnetic field, the longitudinal and transverse relaxation*

УДК 004.021:664.1

УПРАВЛІННЯ ДІЛЯНКОЮ ПЕРШОЇ САТУРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ТЕНЗОРНОГО АНАЛІЗУ

В. М. СІДЛЕЦЬКИЙ, кандидат технічних наук, доцент

Є. О. КАДУРА, студент*

Національний університет харчових технологій

E-mail: vmsidletskiy@gmail.com

Анотація. *Складність задачі управління подачею вапнякового молока та сатураційного газу на ділянку апаратів першої сатурації з'являється вже на етапі формування підходу до регулювання, крім цього, додатково потрібно врахувати множину можливих варіантів підтримання співвідношення. Це пояснює необхідність застосування моделей за формування управляючих діянь, а також перевірку уже сформованих діянь. При цьому модель повинна передбачати можли-*

* Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент В.М. Сідлецький

© В. М. Сідлецький, Є. О. Кадура, 2017

Ключевые слова: *биоэнергетический резонанс, предпосевную обработку семян сельскохозяйственных культур, постоянное магнитное поле, переменное магнитное поле, продольная и поперечная релаксации*

MODEL BIOENERGETIC RESONANCE AT PREPLANTING SOIL SEED CROPS

A. G. Kushnirenko

Abstract: *Research dedicated studied the behavior of magnetization vector synthesis in seed crops by the action of his regular longitudinal and transverse alternating magnetic fields for nuclear magnetic resonance technique.*

On the basis of theoretical studies determined the average value of the magnetic susceptibility χ seeds per unit volume and the value of the magnetization vector. A mathematical model for biological systems, taking into account the Earth's magnetic field. Established that the technology for preplant soil seed crops, inductor, which forms a permanent magnetic field should be placed so that the vector of the constant magnetic field vector coincided with the inductor magnetic field of the Earth.

Keywords: *bioenergetic resonance, pre-seed crop cultivation, constant magnetic field, alternating magnetic field, the longitudinal and transverse relaxation*

УДК 004.021:664.1

УПРАВЛІННЯ ДІЛЯНКОЮ ПЕРШОЇ САТУРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ТЕНЗОРНОГО АНАЛІЗУ

В. М. СІДЛЕЦЬКИЙ, кандидат технічних наук, доцент

Є. О. КАДУРА, студент*

Національний університет харчових технологій

E-mail: vmsidletskiy@gmail.com

Анотація. *Складність задачі управління подачею вапнякового молока та сатураційного газу на ділянку апаратів першої сатурації з'являється вже на етапі формування підходу до регулювання, крім цього, додатково потрібно врахувати множину можливих варіантів підтримання співвідношення. Це пояснює необхідність застосування моделей за формування управляючих діянь, а також перевірку уже сформованих діянь. При цьому модель повинна передбачати можли-*

* Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент В.М. Сідлецький

© В. М. Сідлецький, Є. О. Кадура, 2017

вість як структурної зміни (за зміни підходів до управління), так і адаптації за коригування технологічного режиму. Саме тому вибір тензорного аналізу до моделювання процесів на ділянці апаратів першої сатурації є найбільш доцільним.

В даній статті наведений приклад використання тензорного аналізу в автоматизованій системі управління апаратами ділянки першої сатурації. Наведена постановка задачі, для вирішення якої необхідне моделювання і використання тензорного аналізу за розробки моделі.

Показано розробку тензора для технологічного процесу та процесу управління, що дозволяє адаптувати кожну окрему модель апарату, а потім їх об'єднання в єдину модель технологічної ділянки, Також наведений підхід використання тензорної моделі для системи управління.

Ключові слова: *дефекація, сатурація, система управління, тензор, базис, тензорне множення*

Актуальність. До однієї із основних стадій виробництва цукру входить ділянка першої сатурації (рис.1) – стадія очищення дифузійного соку вапном та діоксидом вуглецю від нецукрів (сокоочисне відділення) [1]. Схема очищення дифузійного соку на ділянці першої сатурації складається з наступних основних операцій: попередня дефекація (переддефекація); основна дефекація; апарат першої сатурації. Це універсальна схема, в якій передбачена можливість очищення дифузійного соку різними варіантами, що обираються в залежності від якості перероблюваного буряка, тобто якості дифузійного соку.

Різні варіанти обробки дифузійного соку на станції дефекосатурації передбачають зміну роботи технологічного обладнання як введення в роботу апаратів, так і виключення їх із роботи (наприклад, робота із основною дефекацією та без неї; із повернення соку 1-ї сатурації на переддефекацію також можлива робота без повернення соку на переддефекацію або використання комбінованої холодно - гарячої дефекації), а також можливу зміну параметрів технологічного режиму в регламентних межах табл. 1. Тобто в залежності від якості перероблюваного буряка технологічний процес (кількість та послідовність працюючого обладнання) та технологічний режим будуть підбиратись для досягнення показників якості дифузійного соку на виході апарату першої сатурації, а також техніко-економічних показників всього підприємства, будуть накладені обмеження з використання ресурсів та часу проходження технологічного процесу.

Зміни в технологічному процесі також висувають вимоги до системи управління даної ділянки. Це пов'язано насамперед із тим, що за зміни роботи технологічного обладнання потрібно змінювати як задані значення для регуляторів (як наслідок можуть виникнути затяжні перехідні процеси), так і налаштування самих регуляторів: пропорційну, інтегральну та диференціальну складові. Але при цьому необхідно

зауважити, що у разі зміни ведення технологічного процесу самі підходи до управління можуть також змінитись.

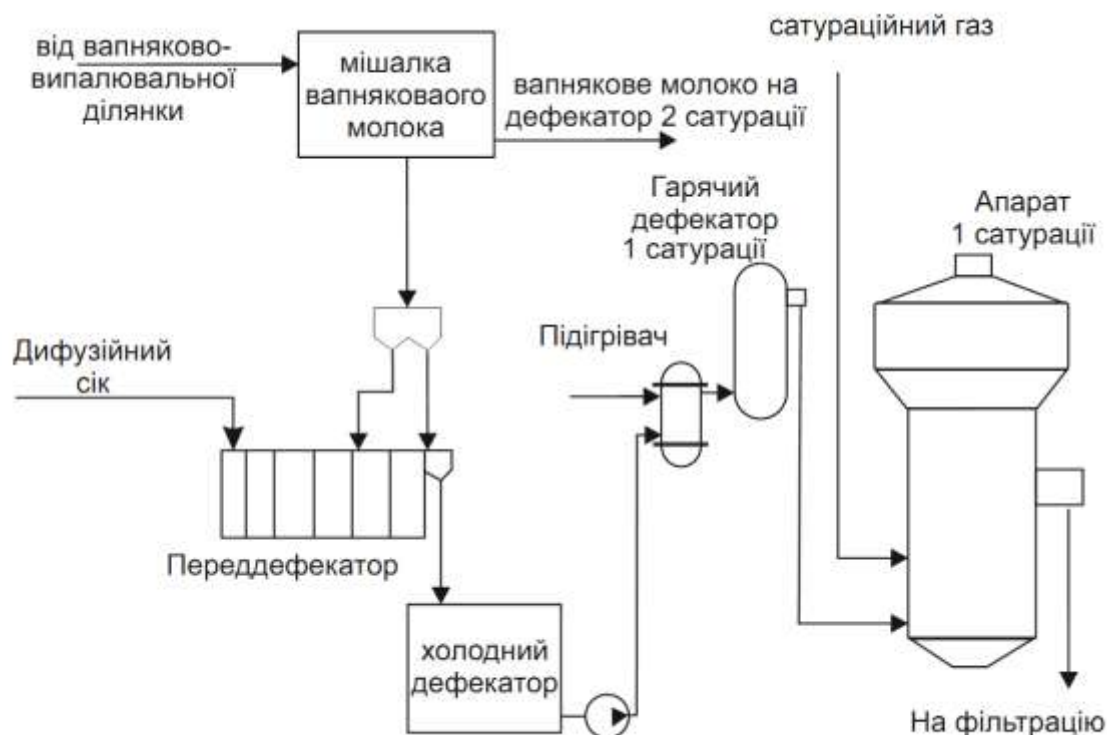


Рис 1. Спрощена схема технологічної ділянки 1 сатурації

1. Параметри технологічного режиму ділянки 1 сатурації

	Перед- дефе- кація	Холодна дефе- кація	Гаряча дефе- кація	1 сату- рація
Температура процесу, °C:	40-50	40-50	90	80-85
Тривалість процесу, хв.:	20-30	20,0- 30,0	5,0- 10,0	10,0
Витрата вапна, % CaO до маси буряка:	0,2-0,3	1,0-1,8	0,5-0,7	
Лужність соку, визначена за допомогою фенолфталеїну, % CaO:		0,8-1,2	0,8-1,2	0,09- 0,11
pH ₂₀ соку:	11,0-11,2			11 ± 0,2
Вміст CO ₂ в сатураційному газі, не менше, %:				28

Тобто для процесу очистки дифузійного соку характерна значна варіативність, але наведена варіативність стосувалась технологічного процесу, така ж ситуація є і по відношенню до системи управління. Наприклад, регулювання подачі вапна на переддефекатор може відбуватись трьома способами: 1) за значенням pH преддефекованого

соку на виході із апарату, 2) за співвідношенням дифузного соку і вапняного молока, 3) за співвідношенням дифузного соку до вапняного молока і коригуванням щодо значення рН переддефекованого соку.

В свою чергу, контури системи управління основною дефекацією можуть регулювати подачу вапна в апарат за такими трьома підходами: 1) постійно у часі, незалежно від кількості перероблених буряків та якості дифузійного соку, 2) в залежності від якості дифузійного соку, 3) за витратою дифузійного соку.

Для першої сатурації також характерні три підходи до керування, найбільшого поширення набула схема управління подачі сатураційного газу за відхиленням величини рН на виході із сатуратора, але кращі показники регулювання, коли сатураційний газ подається за співвідношенням кількості дифузійного соку до кількості газу із корекцією щодо рН на виході та за вмістом CO_2 в сатураційному газі.

Для вибору способу керування та налаштування регуляторів потрібне чітке розуміння технологічного процесу: фізико-хімічні складові, час його проходження, інерційність, транспортне запізнення процесу. Саме тому в процесі аналізу широко використовується моделювання як технологічного процесу, так і процесів керування. Використання моделей вносить розуміння причинно-наслідкових зв'язків та полегшує вибір підходів управління. На даний час для моделювання широко використовують методи диференціальних та алгебраїчних рівнянь, але, як зазначено вище, розроблена модель повинна враховувати: всі вхідні та вихідні параметри технологічного процесу; мати можливість структурної зміни (тобто мати можливість включення або виключення із моделі окремих елементів, які пов'язані із роботою окремих технологічних апаратів); можливість реагувати на зміну діапазону управляючих діянь; враховувати попередні технологічні процеси та мати здатність інтегруватись у наступні моделі або розрахунки управляючих дій. Тобто, розроблена модель процесу очистки дифузійного соку та управління цим процесом повинна враховувати всі можливі варіанти роботи та надавати можливість проведення їх аналізу і вирішення.

Саме тому в даній роботі запропоновано використати методи тензорного аналізу для розробки компонентів моделі та виконання розрахунків в системі управління процесом очистки дифузійного соку. Тензорний аналіз дозволяє спростити процес моделювання практично для будь-якої області за рахунок введення категорії багатовимірного простору. Розроблена тензорна модель дозволяє описувати всі задачі незалежно від їх складності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тензор узагальнює поняття скаляра, вектора і матриці. При цьому правила перетворення компонент тензора влаштовані так, що ми можемо конструювати нові тензори з наявних за деякими простими правилами.

Тензорний аналіз представляє собою узагальнення понять з векторного аналізу і дозволяє об'єднати масиви даних та фізичні величин складної природи, які не можуть бути описані або представлені у вигляді

скалярів або векторів [2]. Тому, використання тензорного методу для побудови моделі виробничого процесу є найбільш виправданим.

Тензорний аналіз та тензорне розкладання застосовуються для розробки нейронних мереж, проектування систем штучного зору, обробки сигналів, обробки та аналізу даних [3].

Насамперед, тензор – це математичний об'єкт, який не залежить від зміни системи координат, але його компоненти у разі зміни системи координат перетворюються за певними математичними законами. Із тензором тісно пов'язаний його ранг і він може бути нульового, першого, другого і так далі, рангу. Тензор нульового рангу – це скаляр, який є наслідком прямого вимірювання параметра, наприклад, температури, густини, витрати. тиску і ін. Більш складні вимірювання, наприклад, спектроскопія дозволяє отримати комплекс параметрів, який можна задати у вигляді вектора – це тензор першого рангу. У двовимірному просторі тензор другого рангу найпростіше уявити як матрицю, яка описує неоднорідність заданого простору та діє на вхідний вектор, змінюючи його напрям і масштаб. Як правило, для аналізу комплексних даних n -го порядку формується тензор n -го рангу, який використовується для моделювання функцій великого числа змінних.

Теорія тензорного аналізу дозволяє спростити моделювання законів практично для будь-якої області за рахунок введення категорії багатовимірного простору, вона дозволяє описувати всі поверхні незалежно від їх складності. Тензорний аналіз та тензорне розкладання застосовуються у багатьох областях, наприклад: нейронні мережі, проектування систем штучного зору, обробки сигналів та обробки і аналізу даних. Тензорний аналіз представляє собою узагальнення понять з векторного аналізу та дозволяє об'єднати масиви даних та фізичні величин складної природи, які не можуть, бути описані або представлені у вигляді скалярів або векторів. Тому, використання тензорного методу для побудови моделі виробничого процесу є найбільш виправданим.

Для роботи із тензорами широко використовуються програмні пакети для EOM. Наприклад, для MATLAB розроблені спеціалізовані програми Tensor Toolbox, TDALAB Laboratory [4, 5]. Вони дозволяють вирішувати завдання представлення та обробку даних у вигляді тензорів. Дані програмні пакети застосовуються для обробки сигналів, систем контролю, нейронних мереж, нечіткої логіки, статистичної обробки та моделювання.

Мета дослідження. Різні варіанти обробки дифузійного соку на станції дефекоатурації передбачають зміну роботи технологічного обладнання як введенням в роботу апаратів, так і виключенням їх із роботи (наприклад, робота із основною дефекацією та без неї; із повернення соку 1-ї сатурації на переддефекацію також можлива робота без повернення соку на переддефекацію або використання комбінованої холодно-гарячої дефекації), а також можливу зміну параметрів технологічного режиму в регламентних межах. Тобто в залежності від якості перероблюваного буряка технологічний процес (кількість та

послідовність працюючого обладнання) та технологічний режим будуть підбиратись для досягнення показників якості дифузійного соку на виході ділянки defeкоcатурації, а також техніко-економічних показників всього підприємства, будуть накладені обмеження з використання ресурсів та часу проходження технологічного процесу.

Локальні контури управління апаратами ділянки інтегровані в автоматизовану систему управління всього процесу defeкоcатурації, а та, в свою чергу, інтегрується до інших ділянок підприємства і всі разом формують автоматизовану систему управління підприємством. Система управління сокоочисного відділення включатиме в себе традиційні локальні контури управління параметрами та додаткові модулі, в яких будуть формуватись управляючі дії, що слугуватимуть завданням для ведення технологічного режиму, тобто завданням для локальних контурів управління.

Зміни в технологічному процесі формують вимоги до системи управління сокоочисного відділення. Це пов'язано, насамперед, із тим, що у разі зміни роботи технологічного обладнання потрібно змінювати як задані значення для регуляторів (як наслідок можуть виникнути затяжні перехідні процеси), так і змінювати налаштування самих регуляторів: пропорційну, інтегральну та диференціальну складові. Але при цьому необхідно зауважити, що у разі зміни ведення технологічного процесу самі підходи до управління можуть також змінитись.

Тобто для процесу очистки дифузійного соку характерна значна варіативність, але наведена варіативність відносилась до технологічного процесу, така ж ситуація і є по відношенню до системи управління. Наприклад, регулювання подачі вапна на переддефекатор може відбуватись трьома способами: 1) за значенням рН преддефекованого соку на виході із апарату, 2) за співвідношенням «дифузний сік/вапняне молоко», 3) за співвідношенням «дифузний сік/вапняне молоко» і коригуванням за значенням рН переддефекованого соку.

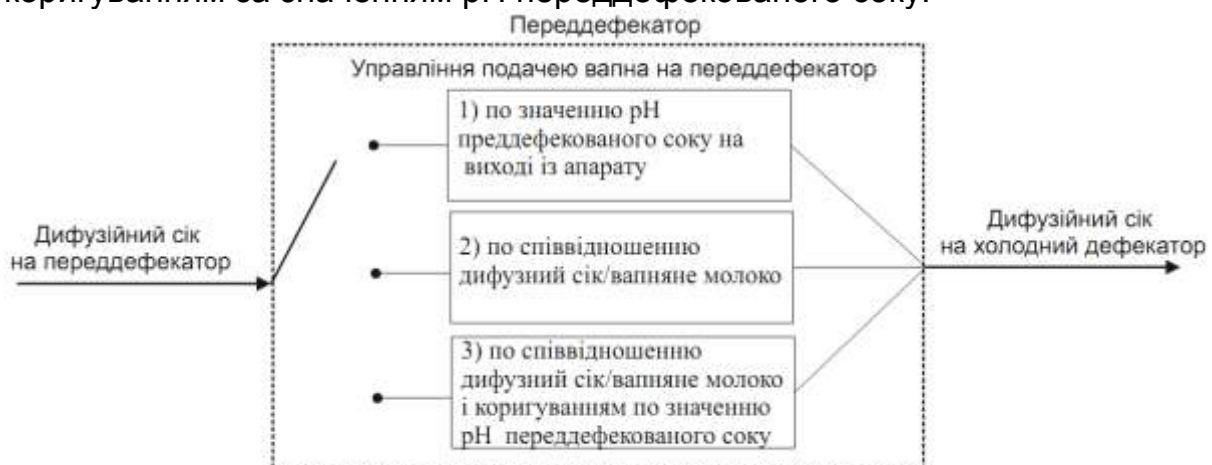


Рис 2. Вибір регулювання подачі вапна на переддефекатор

В свою чергу, контури системи управління основною defeкацією можуть регулювати подачу вапна в апарат за такими трьома підходами:

1) постійно у часі, незалежно від кількості перероблених буряків та якості дифузійного соку, 2) в залежності від якості дифузійного соку, 3) за витратою дифузійного соку.



Рис 3. Вибір регулювання подачі вапна на основну дефекацію

Для першої сатурації також характерні три підходи до керування. Найбільшого поширення набула схема управління подачі сатураційного газу у разі відхилення величини рН на виході із сатуратора, але кращі показники регулювання, коли сатураційний газ подається за співвідношення кількості дифузійного соку до кількості газу із корекцією за рН на виході та за вмістом CO_2 в сатураційному газі.



Рис 4. Вибір регулювання подачі сатураційного газу в 1 сатуратор

Виходячи із рис 2-4, можна стверджувати, що складність задачі управління подачею вапнякового молока та сатураційного газу на ділянку апаратів 1 сатурації з'являється вже на етапі формування підходу до регулювання, а якщо при цьому ще і врахувати множину можливих варіантів підтримання співвідношення, то можна із впевненістю судити про необхідність застосування моделей за формування управляючих

діянь та перевірки процесу управління. Також модель повинна передбачати можливість як структурної зміни (за зміни підходів до управління), так і адаптації за коригування технологічного режиму. Саме тому вибір тензорного аналізу до моделювання процесів на ділянці апаратів 1 сатурації є найбільш доцільним

Результати дослідження та їх обговорення . Для початку приймаємо, що завжди присутній початковий та кінцевий стан технологічного процесу, наприклад, після проходження технологічного процесу змінились показники системи (середовища). Також є початковий та кінцевий стан в роботі системи керування, яка формує управляюче діяння для переходу з одного усталеного режиму в інший, для зміни стану параметра (стану обладнання – вкл./викл.) або для утримання системи в заданому режимі. Це може бути періодична робота апарату, введення в роботу чи виведення технологічної лінії з роботи, збій роботи обладнання або зміна режиму роботи теплообмінного апарату.

В загальному приймаємо, що за управління параметрами технологічного процесу (керування апаратами, ділянками, технологічними лініями або підприємства в цілому) кожний керований процес в будь-який момент може переходити (вимагає переходу) з одного поточного стану в інший.

Початкова точка вектору – це вхідні параметри, кінцева точка – це вихідні параметри, тобто це числові значення вхідних, вихідних змінних або – координати вектор. Але ці координати (тобто числа) самі по собі не мають ніякого сенсу і їх потрібно використовувати тільки з відповідними базовими векторами, що будуть утворювати систему координат простору технологічного процесу. При цьому розмірність технологічного простору буде залежати від кількості змінних на вході і виході. Координатні осі вибираються, як абсолютна система координат, що відповідатиме розмірності простору процесу пастеризації. Тобто кількість осей відповідатиме кількості параметрів. При цьому всі базисні осі повинні бути взаємно перпендикулярні (ортогональні) та мати однакові розмірності і рівні одиничній мірі (ортонормовані).

Якість проходження кожного технологічного процесу характеризується наборами значень вхідних та вихідних параметрів. Якщо прийняти, що для станції сокоочистки є вектор вхідних змінних $\vec{x}$, що матиме такі складові як: витрата дифузійного соку, температура, вміст в соку нецукрів (пульпа, пектинові речовини, слабкі азотисті основи, солі органічних і неорганічних кислот, білок, амінокислоти), значення рН, витрата вапна, витрата сатураційного газу, кольоровість; вектор вихідних змінних $\vec{y}$. Вектор вихідних змінних для ділянки дефекосатурації матиме такі складові: температура соку, лужність соку, рН, вміст нецукрів, кольоровість соку, чистота соку.

Також необхідно доповнити новий простір, в даному випадку $\vec{u}$ – вектор управління. На рис. 5 показано графічне представлення процесу на ділянці 1 сатурації у вигляді трьохмірного простору.

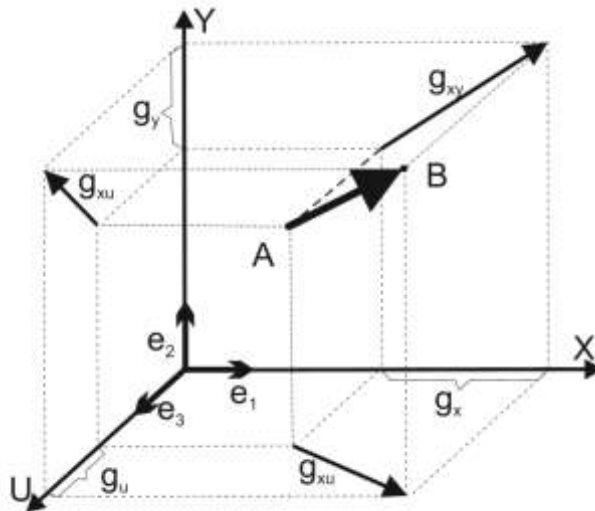


Рис 5. Представлення процесу на ділянці 1 сатурації у вигляді трьохмірного простору

Графічне представлення процесу на рис. 5 краще подати у вигляді математичного виразу :

$$y_m = A^k_{mn} x_n u_k, \quad (1)$$

де A^k_{mn} - тензор, що описує процеси на ділянці 1 сатурації.

Як зазначено в постановці завдання потрібно не просто побудувати модель (в даному випадку тензор), а вміти адаптувати її в залежності від виду технологічного процесу, тобто кількості в роботі апаратів та їх послідовності в процесі, або зміни структури системи керування об'єктом. Наприклад, змінюються технологічні процеси для переддефектора (змінюється відсоткове співвідношення подачі вапняного молока на переддефектор), а також для апарату основної дефекації (ввели подачу вапнякового молока в апарат) та апарату 1 сатурації.

За моделювання роботи апаратів ділянки першої сатурації, тензори дозволяють не тільки побудувати модель у вигляді багатомірного об'єкту, а й проводити над нею алгебраїчні операції: об'єднання тензорів, їх додавання та множення.

$$V_{ij} + U_{ij} = A_{ij}, \quad (2)$$

$$V_{ij} U_{pqr} = A_{ijpqr}. \quad (3)$$

Тобто виконуючи алгебраїчні операції над тензорами технологічних апаратів та рівнів управління, формується тензорна модель для всієї ділянки.

Наприклад, об'єднання трьох просторів в одну модель можна виконати за допомогою тензорного множення трьох лінійних просторів, в нашому випадку: V – простір переддефектора, W – основної дефекації, U – простір першої сатурації сатурації, що будуть входити в багатомірний простір D для тензора A :

$$A = V \otimes W \otimes U. \quad (4)$$

Базиси для кожного простору будуть наступними: простір $B_V = e_1, \dots, e_n$ – базис простору V , $B_W = l_1, \dots, l_m$ – W , $B_U = t_1, \dots, t_k$ – U . Кожний елемент вказаних просторів буде знаходитись відповідно за значеннями свого базису:

$$v = \sum_{j=1}^n c_{ij} e_j, \quad w = \sum_{r=1}^m q_{ir} l_r, \quad u = \sum_{z=1}^k p_{iz} t_z \quad \text{де } c_{ij}, q_{ir}, p_{iz} \in D. \quad (5)$$

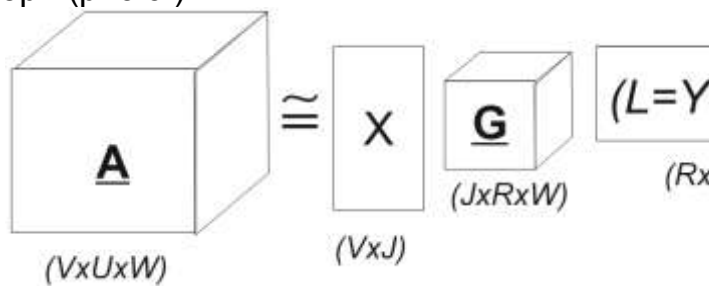
Відповідно до правил тензорного множення [2] та (3) елементи тензора A будуть розраховані:

$$a = \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^m \sum_{z=1}^k \left(\sum_{i=1}^s c_{ij} \cdot q_{ir} \cdot p_{iz} \right) \cdot e_j \otimes l_r \otimes t_z. \quad (6)$$

Тобто елементи тензору A будуть перераховані відповідно до базису $B_A = e_1 \otimes l_1 \otimes t_1, \dots, e_j \otimes l_r \otimes t_z$.

Знайдений тензор використовується як модель технологічного процесу ділянки 1 сатурації в автоматизованій системі керування, а саме для розрахунку управляючого діяння чи знаходження прогнозованого значення.

Важливою задачею є використання даної моделі у системі керування, тобто за розрахунку управляючого діяння або знаходження прогнозованого значення. Тому для використання тензорних моделей в системах керування потрібно зменшити розмірність тензору до розмірності вхідної інформації. Для цього використовують математичний апарат, що зменшує розмірність тензора – тензорне розкладання. Найбільш вживаними є розкладання Таккера, сингулярне розкладання, скелетне розкладання. Провівши розкладання можна отримати матризовані тензори (рис 6.)



$$A_{ikq} = \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R g_{jr q} x_{ij} y_{kr} \quad (7)$$

Рис 6. Розкладання тензора методом Такера: а) графічне представлення, б) аналітичне

Таким чином можна сформулювати тензорну модель для всієї ділянки дефекосатурації та відповідно всіх ієрархій керування.

Висновки і перспективи подальших наукових досліджень. В даній статті наведений приклад використання тензорного аналізу в автоматизованій системі управління процесів для ділянки 1 сатурації. Перевага тензорного аналізу в тому, що тензор як для об'єкта управління, так і самої системи управління, розраховується тільки один раз, далі компоненти тензора перераховуються в залежності від вибраного базису. Якщо є тензори для технологічного апарату або лінії, то за необхідності моделі ділянки підприємства або всього виробництва тензори можна додавати та множити. При цьому будуть сформовані нові тензори, тобто буде розроблена нова тензорна модель як для ділянки, так і для всього підприємства.

Список використаних джерел

1. Сидлецкий, В. М. АСУ станциями сокодобывания и сокоочистки / В. М. Сидлецкий, В. М. Кушков, С. М. Швед. // Автоматизация в промышленности – 2008. – №2. – С. 26-29.
2. Разумова, М. А. Основы векторного и тензорного анализа: навчальний посібник / М. А. Разумова, В. М. Хотяїнцев. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2011. – 216 с.
- 3., Cichocki, A. Nonnegative Matrix and Tensor Factorizations: Applications to Exploratory Multi-way Data Analysis and Blind Source Separation. Chichester / A. Cichocki, R. Zdunek, A.-H. Phan, and S. Amari. – U.K.: John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 407p.
4. Tensor Toolbox version 2.6 by Brett W. Bader, Tamara G. Kolda, Jimeng Sun, Evrim Acar, Daniel M. Dunlavy, Eric C. Chi, Jackson Mayo, et al. Copyright 2015, Sandia National Laboratories. Released February 6, 2015
5. TDALAB Laboratory for Tensor Decomposition and Analysis by Guoxu Zhou, Andrzej Cichocki 2012 Cichocki Laboratory for Advanced Brain Signal Processing.

References

1. Sidletskiy, V. M., Kushkov, V. M., Shved, S. M. (2008) ASU stantsiyami sokodobyivaniya i sokoochistki [ACS for juice production and juice cleaning stations]. Avtomatizatsiya v promyshlennosti, 2, 26-29.
2. Razumova, M. A. Khotiaintsev, V. M. (2011) Osnovy vektornogo i tenzornogo analizu [Basics of vector and tensor analysis]. Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr "Kyivskiy universytet", 216.
- 3., Cichocki, A., Zdunek, R., Phan, A.-H., Amari, S. (2009). Nonnegative Matrix and Tensor Factorizations: Applications to Exploratory Multi-way Data Analysis and Blind Source Separation. Chichester. U.K., John Wiley & Sons Ltd, 407.
4. Tensor Toolbox version 2.6 by Brett W. Bader, Tamara G. Kolda, Jimeng Sun, Evrim Acar, Daniel M. Dunlavy, Eric C. Chi, Jackson Mayo, et al. Copyright 2015, Sandia National Laboratories. Released February 6, 2015
5. TDALAB Laboratory for Tensor Decomposition and Analysis by Guoxu Zhou, Andrzej Cichocki 2012 Cichocki Laboratory for Advanced Brain Signal Processing.

УПРАВЛЕНИЕ УЧАСТКОМ ПЕРВОЙ САТУРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ТЕНЗОРНОГО АНАЛИЗА

В. М. Сидлецкий, Е. О. Кадура

Аннотация. В данной статье показан пример использования тензорного анализа в автоматизированной системе управления аппаратами участка 1 сатурации. Показана постановка задачи, для решения которой необходимо моделирования и использования тензорного анализа в процессе разработки модели. Представлена разработка тензора для технологического процесса и процесса управления, а также подход использования тензорной модели.

Ключевые слова: дефекация, сатурация, система управления, тензор, базис, тензорное умножение

THE METHOD OF TENSOR ANALYSIS FOR PROCESS CONTROL SYSTEMS FIRST SATURATION

V. Sidletskyu, I. Kadura.

Annotation. This article shows an example of the use of tensor analysis in an automated process control system phase 1 carbonation devices. Shown formulation of the problem, the solution of which is necessary to the modeling and the use of tensor analysis in the development model. Results for the development of the tensor of the process and process control systems, as well as the approach of using tensor model.

Keywords: defecation, saturation, the control system, the tensor basis tensor product

УДК 621.3: 631.53.027.33

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВОК ДЛЯ ОБРОБКИ ЗЕРНОВИХ В СИЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛЯХ

С. М. УСЕНКО, кандидат технічних наук,

О. В. НАУМЕНКО, асистент

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: virf750@mail.ru

Анотація. Суттєвим фактором, що призводить до втрат за зберігання зерна є діяльність комах-шкідників зернових запасів. Для знищення шкідників переважно застосовують фуміганти, які є досить токсичними. Альтернативним методом є озонування, але сучасні способи використання озону є енергозатратними та неефективним у зв'язку з втратами озону за його подачі від генератора озону до зерна та нерівномірністю обробки.

Аннотация. В данной статье показан пример использования тензорного анализа в автоматизированной системе управления аппаратами участка 1 сатурации. Показана постановка задачи, для решения которой необходимо моделирования и использования тензорного анализа в процессе разработки модели. Представлена разработка тензора для технологического процесса и процесса управления, а также подход использования тензорной модели.

Ключевые слова: дефекация, сатурация, система управления, тензор, базис, тензорное умножение

THE METHOD OF TENSOR ANALYSIS FOR PROCESS CONTROL SYSTEMS FIRST SATURATION

V. Sidletskyu, I. Kadura.

Annotation. This article shows an example of the use of tensor analysis in an automated process control system phase 1 carbonation devices. Shown formulation of the problem, the solution of which is necessary to the modeling and the use of tensor analysis in the development model. Results for the development of the tensor of the process and process control systems, as well as the approach of using tensor model.

Keywords: defecation, saturation, the control system, the tensor basis tensor product

УДК 621.3: 631.53.027.33

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВОК ДЛЯ ОБРОБКИ ЗЕРНОВИХ В СИЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛЯХ

С. М. УСЕНКО, кандидат технічних наук,

О. В. НАУМЕНКО, асистент

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: virf750@mail.ru

Анотація. Суттєвим фактором, що призводить до втрат за зберігання зерна є діяльність комах-шкідників зернових запасів. Для знищення шкідників переважно застосовують фуміганти, які є досить токсичними. Альтернативним методом є озонування, але сучасні способи використання озону є енергозатратними та неефективним у зв'язку з втратами озону за його подачі від генератора озону до зерна та нерівномірністю обробки.

Метою даної роботи є дослідження розрядних процесів у зерновій масі та встановлення впливу металевих включень на їх інтенсивність.

В запропонованому методі обробки зерно розмішується між плоско-паралельними пластинчастими електродами, до яких підводиться висока напруга. Особливістю такого виду обробки є те, що на зернову масу, мікрофлору та комах-шкідників діють такі фактори впливу: сильне електричне поле, поверхневий та об'ємний струм, іонізаційні процеси, що відбуваються в повітряному просторі зернової маси, аероіони та озон, які утворюються під дією часткових розрядів.

В статті представлені результати досліджень щодо впливу додаткових електродів на розрядні процеси у зерновій масі. Встановлено, що додаткові електроди підвищують інтенсивність розрядних процесів у зерновій масі.

Ключові слова: *зернова маса, комірні шкідники, сильне електричне поле, розрядні процеси, додаткові електроди*

Актуальність. Одним з основних шляхів покращення стану зернової галузі нашої держави є зменшення втрат і підвищення якості зерна за зберігання. Суттєвим фактором, що призводить до втрат за зберігання є діяльність комах-шкідників зернових запасів. Для знищення шкідників переважно застосовують фуміганти, які є досить токсичними. Як альтернатива застосовується озонування, але сучасні способи використання озону є енергозатратними та неефективним у зв'язку з втратами озону за його подачі від генератора озону до зерна та нерівномірністю обробки [5, с. 34-35; 7, с. 41-44; 9, р. 101-122].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На кафедрі електроприводу та електротехнологій розробляються засоби та пристрої [1, 322 с.; 2, с. 184–191], в яких утворення озону відбувається безпосередньо в зерновій масі під дією сильного електричного поля (СЕР). Дослідження показали можливість застосування даного методу для боротьби зі шкідниками зернових [3, с. 185-192; 4, с. 133-138; 6].

Концентрація озону в повітряних проміжках зернової маси залежить від інтенсивності іонізаційних процесів, в першу чергу, частоти часткових розрядів в повітряних включеннях. Інтенсивність іонізаційних процесів змінюється в залежності від напруженості СЕР. Напруженість СЕР можна збільшувати до певного значення, перевищення якого може призвести до пробую у зерновій масі [2, с. 184–191].

Відомо, що введення металевих включень в діелектричний матеріал призводить до перерозподілу електричного поля всередині матеріалу, внаслідок чого напруженість електричного поля біля поверхні металевих включень встановлюється більшою, ніж напруженість зовнішнього електричного поля [8, с. 19-20]. Зерно має властивості діелектрика, тому всередині зернової маси також відбувається перерозподіл електричного поля. Це призводить до підвищення інтенсивності розрядних процесів у

зерновій масі. Тому виникла необхідність дослідження впливу металевих включень в зерновій масі на інтенсивність розрядних процесів.

Мета дослідження – аналіз розрядних процесів в зерновій масі та встановлення впливу металевих включень на їх інтенсивність.

Матеріали та методи дослідження. У запропонованому методі обробки зерно розміщується між плоско-паралельними пластинчастими електродами, до яких підводиться висока напруга. Особливістю такого виду обробки є те, що на зернову масу, мікрофлору та комах-шкідників діють такі фактори впливу: сильне електричне поле, поверхневий та об'ємний струм, іонізаційні процеси, що відбуваються в повітряному просторі зернової маси, аероіони та озон, які утворюється під дією часткових розрядів [1, 322 с.].

Для дослідження розрядних процесів у зерновій масі було виготовлено дослідну установку (рис. 1).

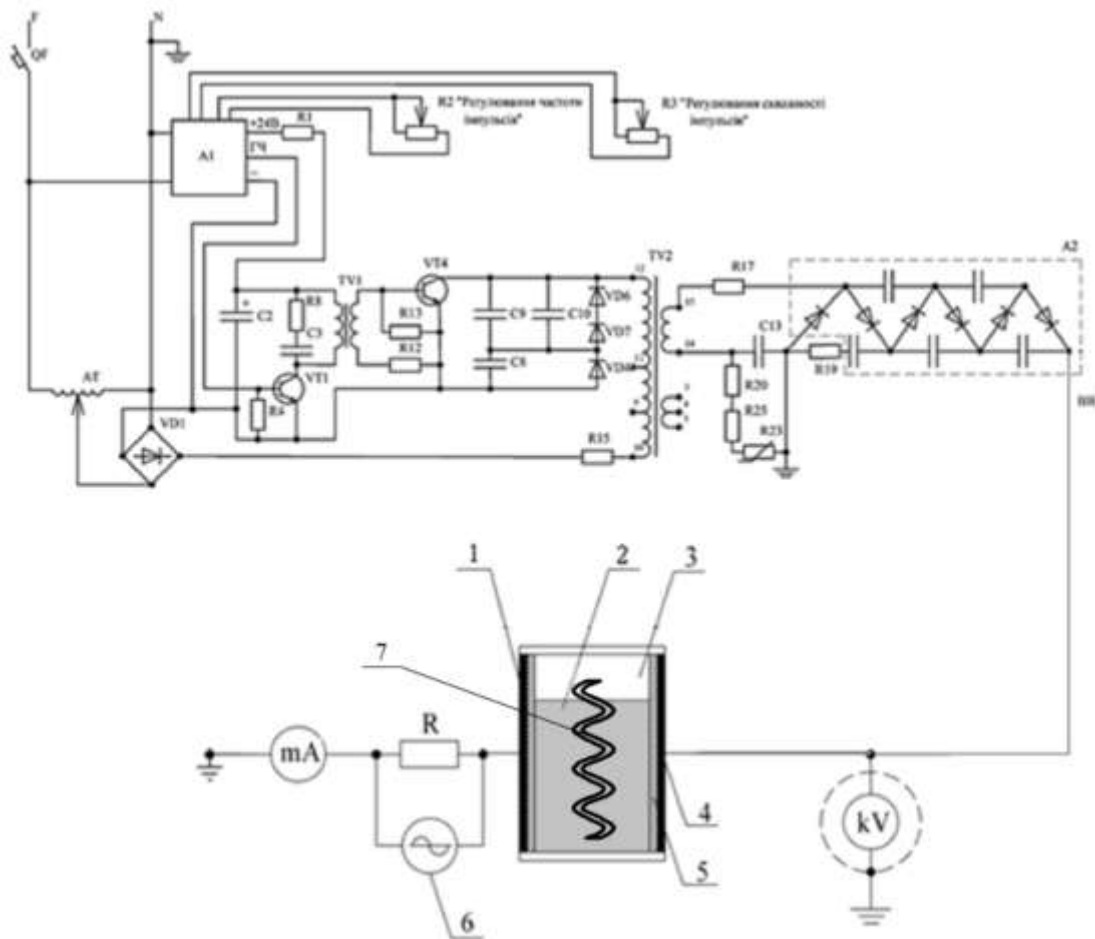


Рис.1. Схема лабораторної установки для дослідження розрядних процесів у зерновій масі: 1, 4 – плоско-паралельні пластинчасті електроди; 2 – оброблюване зерно; 3 – камера обробки; 5 – діелектричні пластини; 6 – осцилограф; 7 – додаткові електроди (металеві включення)

Від імпульсного джерела високої напруги напруга подається до плоско-паралельних електродів 1, 4. Стінки камери обробки виготовлено з

діелектричного матеріалу (оргскло). Регулювання напруги живлення передбачено за допомогою автотрансформатора АТ. В камеру обробки 3 встановлено діелектричні пластини 5, які відділяють зерно 2 від електродів. В коло нульового проводу введено резистор R, який фіксує розрядні струми, які проходять у зерні. Сигнал знімається за допомогою осцилографа 6. В зернову масу введено додаткові електроди 7. Контроль напруги здійснюється кіловольтметром kV, струм контролюється міліамперметром mA. В схемі передбачено регулювання частоти та скважності імпульсів ІДВН.

Результати дослідження та їх обговорення. Для досліджень взято зразки зерна ячменю сорту «Вакула» вологістю 14 %. Розміри камери обробки: відстань між електродами – 3 см; довжина електрода – 10 см; висота засипки зерна – 6 см.

В якості додаткових електродів використовувались металеві стержні хвилеподібної форми.

Результати досліджень наведені в таблиці та на рис. 2.

1. Частота розрядів у зерні під дією сильного електричного поля імпульсного струму

Частота імпульсів, кГц	Напруженість електричного поля, кВ/см	Частота розрядів, кГц	
		без додаткових електродів	з додатковими електродами
3	5	3,05	3,63
9	5	3,3	5,55
15	5	3,95	6,23

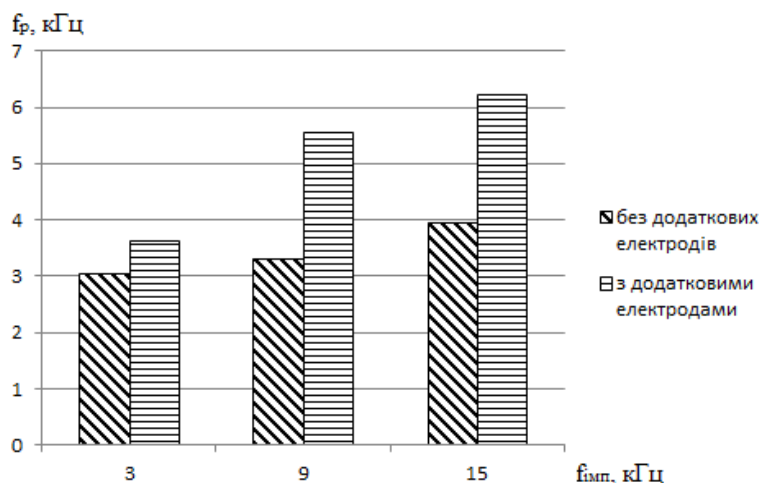


Рис. 2. Вплив додаткових електродів на інтенсивність розрядних процесів за частоти імпульсів: 3 кГц; 9 кГц; 15 кГц

В результаті проведених досліджень встановлено, що введення додаткових електродів підвищує інтенсивність розрядних процесів у зерновій масі. Таким чином введення додаткових електродів дозволить підвищити концентрацію озону в камері обробки, а відповідно і ефективність обробки.

В дослідженнях також було встановлено, що на інтенсивність впливає частота імпульсів імпульсного джерела високої напруги. За різної частоти імпульсів ефективність використання додаткових електродів різна.

Висновки і перспективи. За результатами досліджень встановлено, що введення додаткових електродів у зернову масу призводить до підвищення інтенсивності розрядних процесів у ній, але ефективність використання додаткових електродів суттєво залежить від частоти імпульсів джерела. У разі зміни частоти від 3 до 15 кГц інтенсивність розрядних процесів в зерновій масі із встановленими додатковими електродами змінювалась в межах 20-70%, що вказує на необхідність проведення додаткових досліджень в цьому напрямі.

Список використаних джерел

1. Берека, О. М. Обробка насіння сільськогосподарських культур в електричному полі високої напруги [Текст]: дис. ...докт. техн. наук / О. М. Берека. – К., 2010. – 322 с.
2. Берека, О. М. Часткові розряди в зерновій масі під дією сильного електричного поля [Текст] / О. М. Берека, С. М. Усенко, С. В. Петриченко // Праці Таврійського державного агротехнічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Вип. 11. – Том 6. – С. 184– 191.
3. Берека, О. М. Установка для знешкодження комах-шкідників зерна у сильному електричному полі [Текст] / О. М. Берека, О. В. Науменко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – К.: ВЦ НУБіП України, 2014. – Вип. 194. – Ч. 3. – с. 185-192.
4. Берека, О. Н. Дезинсекция зерновой массы в сильном электрическом поле [Текст] / О. Н. Берека, А. В. Науменко // Инновации в сельском хозяйстве. Москва: ГНУ ВИЭХ Россельхозакадемии, 2014. - №4(9). – с. 133-138.
5. Ловкіс, З. В. Дезинсекція комах-шкідників озонем [Текст] / З. В. Ловкіс, Т. П. Троцька // Зерно і хліб. – 2005. – №2. – С. 34-35.
6. Патент на винахід № 105984 Україна, МПК A23L 3/32 (2006.01), A01F 25/14 (2006.01). Пристрій для знешкодження комах-шкідників зерна у сильному електричному полі [Текст] / Берека О. М., Науменко О. В. Заявник і патентовласник НУБіПУ. – № а201303445; заяв. 20.03.2013; опубл. 10.07.2014, Бюл. №13.
7. Шевченко, Н. Г. Шкідники запасів зерна та контроль їх чисельності [Текст] / Н. Г. Шевченко, Т. П. Гордієнко // Посібник українського хлібороба – 2008. – с. 41-44.
8. Щерба, М. А. Закономерности распределения электрического поля в диэлектрической среде при изменении размеров и формы проводящих включений [Текст] / М.А. Щерба // Техническая электродинамика. – 2012, №2 - с. 19-20.
9. Shadia, E. Abd El-Aziz. Control Strategies of Stored Product Pests [Text] / Shadia E. Abd El-Aziz // Journal of Entomology. – 2011. – №8 (2). – p. 101-122.

References

1. Bereka, O. M. (2000) Obrobka nasinnia silskohospodarskykh kultur v elektrychnomu poli vysokoi napruhy [Processing of crop seeds in an electric field of high voltage]. Kyiv, 322.
2. Bereka, O. M., Usenko, S. M., Petrychenko, S. V. (2011). Chastkovi rozriady v zernovii masi pid diieiu sylnoho elektrychnoho polia [Partial discharges in the grain mass by the influence of a high electric fields]. Proceedings of the Tavria State Agrotechnical University, 11 (6), 184–191.
3. Bereka, O. M., Naumenko, O. V. (2014). Ustanovka dlia zneshkodzhennia komakh-shkidnykiv zerna u sylnomu elektrychnomu poli [Installation for decontamination of insect pests of grain in a high electric field]. Scientific Bulletin of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series «Technology agribusiness and energy», 194 (3), 185-192.
4. Bereka, O. N., Naumenko, A. V. (2014). Dezynseksyia zernovoi massy v sylnom elektrycheskom pole [Disinsection of the grain mass in a high electric field]. Innovations in agriculture, 4(9), 133-138.
5. Lovkis, Z. V., Trotska, T. P. (2005). Dezynseksiia komakh-shkidnykiv ozonom [Fumigation of insect pests by ozone]. Cereals and bread, 2, 34-35.
6. Bereka, O. M., Naumenko, O. V. (2014). The device for the removal of of insect pests of grain in a high electric field. The patent of Ukraine for invention. A23L 3/32 (2006.01), A01F 25/14 (2006.01). № a201303445; declared 20.03.2013; publ. 10.07.2014, №13.
7. Shevchenko, N. H., Hordiienko, T. P. (2008). Shkidnyky zapasiv zerna ta kontrol yikh chyselnosti [Pests of grain stores and control of their population]. Guide of an Ukrainian farmer, 41-44.
8. Shcherba, M. A. (2012). Zakonomernosty raspredelenyya élektrycheskoho polya v dyélektrycheskoy srede pry yzmenenyy razmerov y formy provodyashchykh vklyuchenyy [Regularities in the distribution of an electric field in a dielectric material when the dimensions and shape of conductive inclusions change]. Technical electrodynamics, 2, 19-20.
9. Shadia, E. Abd El-Aziz (2011). Control Strategies of Stored Product Pests. Journal of Entomology. 8 (2), 101-122.

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ НА РАЗРЯДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗЕРНОВОЙ МАССЕ

С. Н. Усенко, А. В. Науменко

Аннотация. Существенным фактором, который приводит к потерям при хранении зерна, является деятельность насекомых-вредителей зерновых запасов. Для уничтожения вредителей преимущественно применяют фумиганты, которые являются достаточно токсичными. Альтернативным методом является озонирование, но современные способы использования озона является энергозатратными и неэффективным в связи с потерями озона при его подаче от генератора озона к зерну и неравномерностью обработки.

Целью данной работы является исследование разрядных процессов в зерновой массе и установление влияния металлических включений на их интенсивность.

В предложенном методе обработки зерно размещается между плоско-параллельными пластинчатыми электродами, к которым подводится высокое напряжение. Особенностью такого вида обработки является то, что на зерновую массу, микрофлору и насекомых-вредителей действуют такие факторы влияния: сильное электрическое поле, поверхностный и объемный ток, ионизационные процессы, происходящие в воздушном пространстве зерновой массы, аэроионы и озон, образующейся под действием частичных разрядов.

В статье представлены результаты исследований по влиянию дополнительных электродов на разрядные процессы в зерновой массе. Установлено, что дополнительные электроды повышают интенсивность разрядных процессов в зерновой массе.

Ключевые слова: *зерновая масса, амбарные вредители, сильное электрическое поле, разрядные процессы, дополнительные электроды*

EFFECT OF ADDITIONAL ELECTRODES ON DISCHARGE PROCESSES IN A GRAIN MASS

S. Usenko, O. Naumenko

Abstract. *An important factor that leads to losses of grain storage is the activity of insect pests of grain reserves. To destroy pests mainly used fumigants that are quite toxic. An alternative method is ozone, but modern uses of ozone is energy-consuming and inefficient due to the loss of ozone in its submission of ozone generator to the grain and the uneven treatment*

The purpose of this work is to study discharge processes in the grain mass and to determine the effect of metallic inclusions on their intensity.

The proposed method of processing corn is between plane-parallel plate electrodes to which high voltage is supplied. The peculiarity of this type of treatment is that the grain mass, flora and insect pests, the following factors of influence: strong electric field, surface and volume current ionization processes occurring in the airspace of grain mass air ions and ozone, which is formed under partial discharge.

The article presents the results of research on the impact of additional electrodes on discharge processes in the grain mass. Found that additional electrodes increases intensity of discharge processes in the grain mass.

Keywords: *grain mass, granary pests, high electric field, discharge processes, additional electrodes*

ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРОВОГО РЕЖИМУ ПІВДНЯ УКРАЇНИ ДЛЯ ПОТРЕБ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ

М. П. КУЗНЕЦОВ, доктор технічних наук, професор

Інститут відновлювальної енергетики

E-mail: nik_ku@ukr.net, ORCID iD: 0000-0002-0497-7439

О. В. ЛИСЕНКО, кандидат технічних наук, доцент

Таврійський державний агротехнологічний університет

E-mail: Helga_vl@ukr.net, ORCID iD: 0000-0001-7085-7796

Анотація. Сучасний стан енергетики потребує альтернативних шляхів забезпечення регіонів України енергоресурсами. Проведення аналізу та оцінки характеристик вітрового режиму є одним з найважливіших етапів у визначенні перспективності території регіону для розвитку вітроенергетики. Однак суттєвого та глибокого аналізу регіональних особливостей не проводилось, в першу чергу, за відсутності достатніх даних для проведення таких досліджень. У статті проведено оцінку характеристик вітрового потоку на півдні України за дворічним масивом 10-хвилинних вимірів швидкості та напрямку вітру метеопостом Ботіївської ВЕС, Приазовського району, Запорізької області. А саме, проведено розрахунок середньомісячної швидкості вітру та її середньоквадратичного відхилення, для оцінки продуктивності ВЕС визначено потенційну питому потужність типової вітроенергетичної установки.

Проведено порівняльну оцінку розрахунків за розподілом Вейбула та фактичними значеннями швидкості вітру на різних висотах. Проаналізована залежність швидкості вітру від висоти виміру та можливі флуктуації швидкості й напрямку вітру. Проведена оцінка кореляції між значеннями швидкості вітру та його напрямом.

Ключові слова: *вітровий потік, середня швидкість вітру, енергетична характеристика ВЕС*

Актуальність. Україна має один із найбільших рівнів споживання енергоресурсів: 2,2 % від світового споживання енергії за менше ніж 1% населення світу. Одна з причин інтенсивного енергоспоживання є застарілі технології й обладнання, які вже давно виробили свій ресурс і мають дуже низьку енергетичну ефективність. І хоча заміна старого обладнання та використання інноваційних технологій дає змогу зменшити енергоспоживання на 30%, такі заходи дорогі й тривалі в часі. Природні ресурси (такі як вугілля, нафта, газ) і засновані на їх використанні електрогенеруючі станції на сьогодні є ключовими джерелами енергії. Їхня частка в загальному балансі первинної енергії України сягає 79 %; атомні електростанції в загальному балансі виробляють близько 18 % первинної

енергії. Частка відновлювальних джерел енергії (таких як енергія сонця, вітру, води, біогаз тощо) в загальному балансі незначна і складає лише 3 % первинної енергії, незважаючи на те, що Україна має величезний потенціал. Україна забезпечує себе первинними ресурсами лише на 61 %, а 39 % складає дефіцит, який забезпечується імпортуванням енергоресурсів з інших країн. Час від часу залежність від імпортних енергоресурсів призводить до серйозних економічних і політичних конфліктів, які суттєво впливають на національну безпеку України, гальмує зростання економіки. Саме тому існує велика необхідність пошуку альтернативних шляхів скорочення цієї залежності, особливо у світлі вичерпності природних ресурсів, можливих катастроф, виконання міжнародних зобов'язань щодо зменшення викидів парникових газів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведення аналізу та оцінки характеристик вітрового режиму є одним з найважливіших етапів у визначенні перспективності території для розвитку вітроенергетики. Аналізу спостережень метеорологічних показників та оцінці вітрового режиму території України присвячено ряд робіт вітчизняних фахівців. Але вивчення особливостей вітрового режиму окремих регіонів України майже не проводилося. Аналіз енергетичної складової вітрового режиму території України представлений в працях С.О. Кудрі, М.П. Кузнєцова, Л.В. Дмитренка і С.Л. Барандіча. У працях оцінено енергетичний потенціал вітру на різних висотах, вченими проведено районування території України за показниками енергоресурсів та розроблено карти вітрового потенціалу території України. Однак суттєвого та глибокого аналізу регіональних особливостей не проводилось, в першу чергу, за відсутності необхідних даних для проведення таких досліджень. Адже ті дані, якими оперує метеорологічна служба, не відповідають потребам енергетики.

Мета дослідження – аналіз та оцінка характеристик вітрового потоку півдня України для потреб вітроенергетики на прикладі метеоданих, отриманих з Ботіївської ВЕС у Приазовському районі Запорізької області.

Матеріали і методи дослідження. Для проведення досліджень вітрового режиму використано дворічний масив результатів 10-хвилинних вимірів швидкості та напрямку вітру, отриманих зі спільної метеовежі, синхронно на двох висотах – 66 та 94 м. Для аналізу обрано чотири місяці: січень, квітень, липень, жовтень – як репрезентативні для різних сезонів року.

Крім оцінки стохастичності параметрів власне вітру для вітроенергетики важливим є енергетичний потенціал вітрових потоків. Традиційним для оцінки енергетичного потенціалу вітру є використання кубічної залежності потужності від швидкості вітру. Однак, оскільки реальні енергетичні характеристики сучасних вітроелектричних установок (ВЕУ) мають суттєво нелінійну характеристику, яка лише частково має параболічний характер, в даному дослідженні використано типову криву потужності ВЕУ умовно одиничної потужності. На рис. 1 зображено таку

енергетичну характеристику та апроксимацію її табличних значень, що відповідають популярним сучасним моделям вітроустановок мегаватного класу. Загальна форма виразу для кривої потужності має вигляд:

$$P_W(v) = \begin{cases} 0, & v < V_0, v \geq V_m \\ P(v, a_1, a_2, \dots), & V_0 \leq v \leq V_P \\ P_W, & V_P < v < V_m \end{cases} \quad (1)$$

де V_0 , V_P та V_m – відповідно стартова, розрахункова (що відповідає номінальній потужності P_H) та максимальна швидкості вітру,

a_i – параметри, що описують вигляд кривої потужності на ділянці без обмежень. Наприклад, це можуть бути коефіцієнти логістичної кривої для конкретного типу ВЕУ:

$$P(v) = \frac{P_H}{1 + a_1 e^{a_2 v}} \quad (2)$$

Для визначення питомих показників прийнято: $P_H=1$ (одиниць потужності).

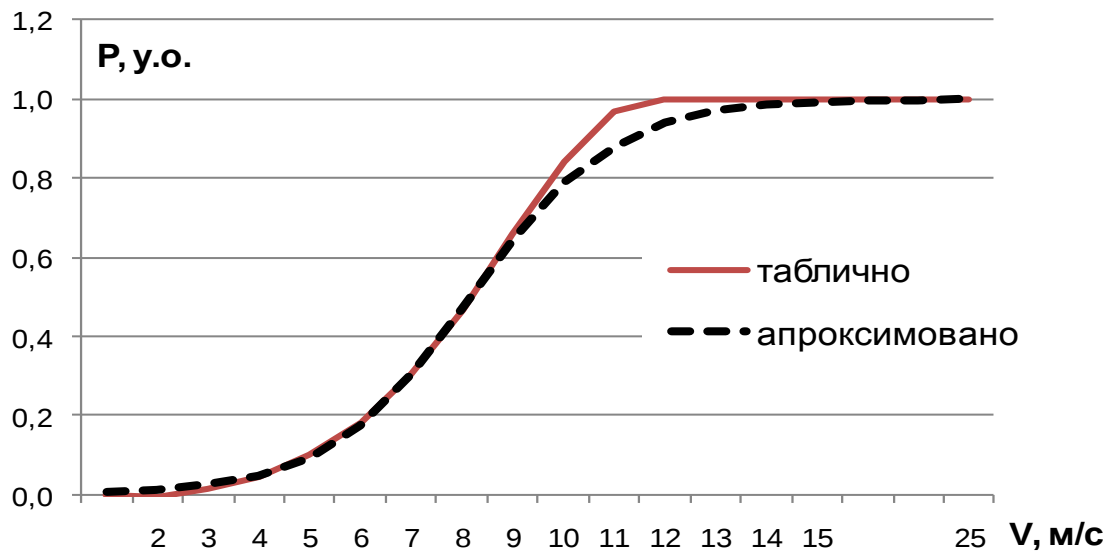


Рис.1. Типова крива потужності ВЕУ (при $P_H=1$ у.о.)

Вироблена ВЕУ за певний час T електроенергія визначається за виразом:

$$E_W = T \int_0^{\infty} P_W(v) f(v) dv \quad (\text{кВт. год}), \quad (3)$$

де $f(v)$ – функція щільності розподілу швидкості вітру як випадкової величини;

v – поточна швидкість вітру.

Інтеграл за виразом (3) визначає середню на часовому інтервалі T потужність ВЕУ. Для опису функції щільності розподілу швидкості вітру звичайно використовують двопараметричний розподіл Вейбула:

$$f(v) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{\beta}\right)^{\gamma}\right], \quad (4)$$

де β і γ – параметри масштабу і форми відповідно.

Разом з тим, даний розподіл не завжди точно відповідає фактичному, тому важливо пересвідчитись у розмірі отриманої похибки для оцінки її допустимості. За необхідності можна застосувати інші розподіли чи їх комбінації, щодо яких існують численні дослідження.

В таблиці 1 наведено значення середньомісячної швидкості вітру V_c , її середньоквадратичного відхилення σ (висота вимірів 94 м) та відповідні параметри розподілу Вейбула β і γ з виразу (4). Для оцінки потенційної продуктивності ВЕУ з відповідною висотою осі ротора розраховано середню потужність P_c за розподілом Вейбула (3) та за фактичних значень швидкості вітру на 10-хвилинних інтервалах з перерахунком у потужність за виразом (2).

1. Параметри вітрового потоку на висоті 94 м (2016 рік)

місяць	V_c , м/с	σ , м/с	γ	β , м/с	P_c (Вейб.)	P_c факт.
січень	7,43	3,46	1,94	8,40	0,39	0,41
квітень	7,98	3,59	2,34	9,00	0,43	0,44
липень	6,23	2,62	2,51	7,01	0,27	0,28
жовтень	9,32	4,14	2,37	10,52	0,53	0,58

В таблиці 2 наведено аналогічні значення для висоти вимірів 66 м.

2. Параметри вітрового потоку на висоті 66 м (2016 рік)

місяць	V_c , м/с	σ , м/с	γ	β , м/с	P_c (Вейб.)	P_c факт.
січень	6,82	2,97	2,42	7,70	0,33	0,34
квітень	7,46	3,31	2,38	8,42	0,39	0,39
липень	5,95	2,38	2,65	6,69	0,24	0,24
жовтень	8,48	3,81	2,35	9,57	0,47	0,48

Що стосується середньої швидкості вітру, на меншій висоті вона традиційно менша. Зазначимо, що для перерахунку швидкості вітру на різні висоти традиційно застосовують формулу Хелмана: $V(h_1) = V(h_2) \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{\alpha}$, де

$0,14 \leq \alpha \leq 0,24$ в залежності від шорсткості підстилаючої поверхні. В нашому випадку показник експоненційної залежності $\alpha=0,21$ для середньорічних значень швидкості вітру на висотах 66 та 94 м; якщо ж розраховувати цей показник (експоненту Хелмана) для кожного виміру, то осереднене значення становило б $\alpha=0,18$. Ця залежність є статистичною, а не функціональною. Так на рис. 2 зображено приклад запису швидкості вітру на двох висотах (дані від 5 жовтня 2016р.), де ці швидкості в окремих випадках можуть бути

практично рівними. При цьому кореляційна залежність поточних значень досить висока – на рівні 0,95-0,97 для досліджених даних.

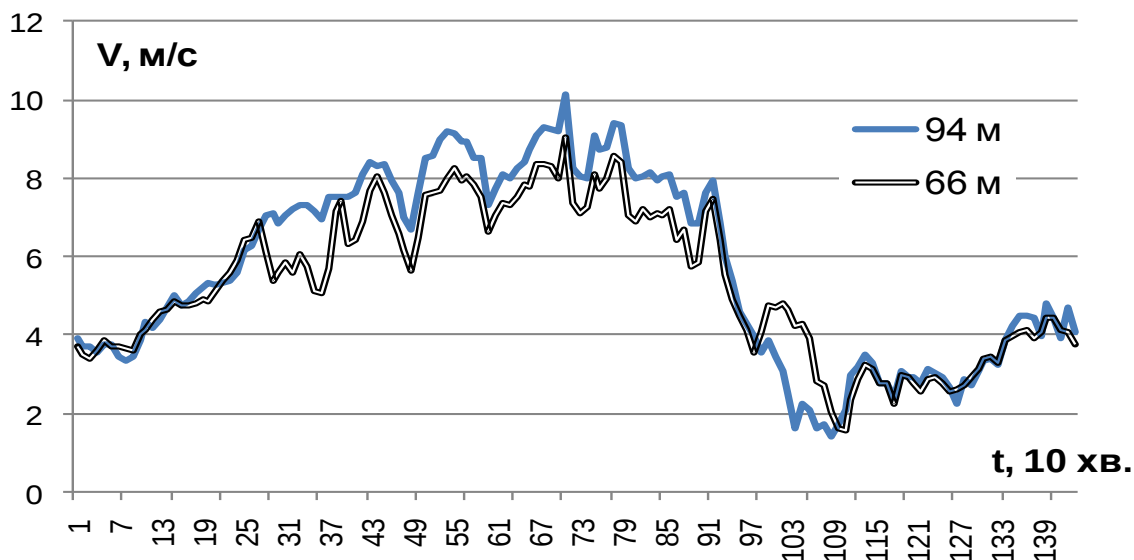


Рис. 2. Добовий графік швидкості вітру на різних висотах

Можливі навіть ситуації інверсійних значень (на висоті 66 м швидкість вітру вища, ніж на 94 м); такою особливістю є діапазон між 97-м та 109-м 10-хвилинними інтервалами, тобто з 16:20 до 18:00. В цей час напрям вітру короткочасно змінився з північно-західного на північно-східний; можливо, саме турбулентність за напрямом (рис. 3) спричинила такий ефект.

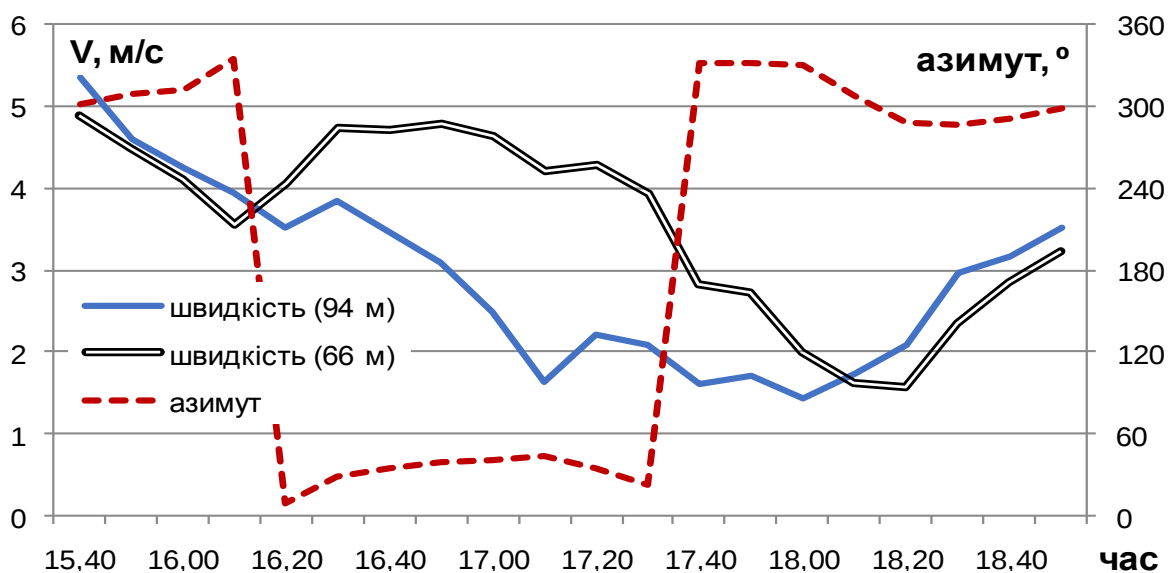


Рис. 3. Флуктуації швидкості та напрямку вітру

Щоб оцінити кореляцію між значеннями швидкості та напрямку вітру, розрахуємо кореляційний коефіцієнт за виразом [2]:

$$r^2 = \frac{(r_{vc} - r_{vs})^2}{1 - r_{cs}^2}, \quad (5)$$

де $r_{vc} = \text{corr}(v, \cos \theta)$; $r_{vs} = \text{corr}(v, \sin \theta)$; $r_{cs} = \text{corr}(\cos \theta, \sin \theta)$; θ – напрям вітру (азимут).

Для даних 2016 р. маємо:
 $r_{vc} = 0.06$; $r_{vs} = 0.13$; $r_{cs} = -0.01$; $r = 0.07$, в тому числі за місяцями:

січень – $r_{vc} = -0.21$; $r_{vs} = -0.08$; $r_{cs} = -0.04$; $r = 0.13$;

квітень – $r_{vc} = 0.21$; $r_{vs} = -0.04$; $r_{cs} = -0.14$; $r = 0.25$;

липень – $r_{vc} = 0.14$; $r_{vs} = -0.03$; $r_{cs} = -0.11$; $r = 0.17$;

жовтень – $r_{vc} = 0.10$; $r_{vs} = 0.40$; $r_{cs} = 0.14$; $r = 0.30$.

Такі значення кореляції слід вважати слабо значимими.

Результати досліджень та їх обговорення. Як впливає з отриманих даних (табл. 1, 2), розрахункова потужність умовної ВЕУ за розподілом Вейбула дещо менша від отриманої з фактичних значень швидкості вітру, при цьому на висоті 94 м середня похибка приблизно дорівнює 4%, а на висоті 66 м – 2%. Помітно також, що параметр форми на меншій висоті дещо більший, що свідчить про меншу дисперсію і викликано стабільнішим вітром, проте, ця різниця незначна і може вважатися статистично незначимою. Отже, залежність розподілу швидкості вітру від висоти, принаймні на висотах 60-100 м, можна вважати стаціонарною в сенсі імовірності. Тому, для ландшафтів, подібних до площадки розглядуваної ВЕС, за оцінки потенційної продуктивності вітроустановок можна користатися параметрами вертикального розподілу швидкості вітру та щільності часового розподілу відповідно до формул Хелмана і Вейбула. Імовірна похибка при цьому співмірна з похибкою вимірювань і на передпроектній стадії може вважатися нехтовною.

Відповідно до результатів кореляційного аналізу, залежність швидкості вітру від напрямку в межах року статистично незначна, хоча в окремі місяці досягає рівня слабкої залежності. Отже, за визначення дислокації ВЕУ на площадці ВЕС достатньо користуватися наявною в метеорологічних довідниках діаграмою азимутального розподілу (розою вітрів).

Досліджені параметри придатні для оцінки продуктивності ВЕС на тривалому часовому горизонті. Це необхідно для визначення придатності територій та доцільності застосування там вітрової енергетики. Однак для оцінки взаємодії ВЕС з локальною електромережею важливо знати також поведінку поточної потужності, тобто характер короткочасних змін швидкості вітру, тривалості окремих режимів тощо. Це вимагає подальших досліджень на відповідність вимогам роботи енергосистеми в досліджуваному регіоні.

Висновки і перспективи. Досліджені показники вітрового режиму дозволяють точніше спрогнозувати на тривалий час роботу вітроелектричної станції в досліджуваному регіоні та її вплив на характер постачання електроенергії у разі роботи у складі централізованої чи локальної енергосистеми. При цьому перелік досліджених параметрів не

є вичерпним, а потреба в додаткових дослідженнях визначається особливостями роботи енергосистеми як в частині генерування, так і споживання електроенергії.

Список використаних джерел

1. Практичний посібник із впровадження компоненту з енергоефективності проекту МРГ-II «Енергоефективні технології та відновлювальні джерела енергії» червень 2012 [Електроний ресурс] // Режим доступу: http://cba.org.ua/images/stories/documents/EE_Manual_UKR.pdf

2. A joint probability density function of wind speed and direction for wind energy analysis / J. A.Carta, P. Ramirez, C. Bueno.// Energy Conversion and Management – 2008. – V.49. – P.1309–1320.

References

1. Practical Guide of Component Implementation of Energy Efficiency Project CBA - II "Energy efficient technologies and renewable sources of energy", June 2012. Available at: http://cba.org.ua/images/stories/documents/EE_Manual_UKR.pdf

2. Carta, J.A., Ramirez, P., Bueno, C. (2008). A joint probability density function of wind speed and direction for wind energy analysis. Energy Conversion and Management, 49, 1309–1320

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОВОГО РЕЖИМА ЮГА УКРАИНЫ ДЛЯ НУЖД ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

Н. П. Кузнецов, О. В. Лисенко

Аннотация. Современное состояние энергетики свидетельствует о необходимости поиска альтернативных путей обеспечения энергоресурсами территории Украины. Проведение анализа и оценки характеристик ветрового режима является одним из важнейших этапов в определении перспективности территории для развития ветроэнергетики. Однако существенного и глубокого анализа региональных особенностей не проводилось, в первую очередь, из-за отсутствия необходимых данных. В статье проведена оценка характеристик ветрового потока юга Украины по двухлетнему массиву 10-минутных измерений скорости и направления ветра метеопостом Ботиевской ВЭС, Приазовского района, Запорожской области. В частности, проведен расчет среднемесячной скорости ветра и его среднеквадратичного отклонения, для оценки производительности ВЭС определена потенциальная удельная мощность типовой ветроэнергетической установки. Проведена сравнительная оценка расчетов по распределению Вейбула и фактическими значениями скорости ветра на разных высотах. Проанализирована зависимость скорости ветра от высоты измерения и возможные флуктуации скорости и направления ветра. Проведена оценка корреляции между значениями скорости ветра и его направлением.

Ключевые слова: ветровой поток, средняя скорость ветра, энергетическая характеристика ВЭУ

WIND REGIME CHARACTERISTICS ESTIMATION OF SOUTH OF UKRAINE FOR THE WIND ENERGY NEEDS

M. Kuznietsov, O. Lysenko

Abstract. *The current state of energy shows that there is great need to search for alternative ways of energy supply in Ukraine. Analysis and evaluation of the characteristics of the wind regime is one of the most important stages in the identification of promising areas for wind energy development. However, substantial and in-depth analysis of regional features hasn't been conducted, primarily due to lack of data needed to conduct such studies. In the article the characteristics of the wind flow south of Ukraine for a two-year array of 10-minute measuring wind speed and direction according to WPP Botiivskoi, Priazovskiy, Zaporizhzhya region was evaluated. In particular, the average monthly wind speed and its standard deviation was calculated, and to evaluate the performance of the wind turbine the potential power of a typical wind power unit was identified. The comparative evaluation of the calculations of the distribution of Weibull and actual values of the wind speed at the different heights was estimated. The dependence of the wind speed from altimetry and possible fluctuations in wind speed and direction was analyzed. The evaluation of the correlation between wind speed and direction was shown.*

Keyword:. *the wind regime, the average wind speed, wind turbine power output*

УДК 621.311.26.031

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПІД ЧАС ГЕНЕРЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ІЗ БІОГАЗУ

Н. В. БУРЕГА, молодший науковий співробітник
Тернопільський національний педагогічний
університет ім. В. Гнатюка
E-mail: buregan@ukr.net

Анотація. *Розглянута перспектива використання органічної біосировини, що дозволить зміцнити власну енергосистему та вирішити назріваючу екологічну катастрофу через низький рівень використання технологій утилізації відходів та вловлення сміттєзвального біогазу. Проведено аналіз тенденцій росту ринку біогазових технологій на основі світових лідерів його виробництва. З метою більш детального порівняння обрано п'ять комерційних електротехнологічних комплексів для визначення їх енергетичних та*

© Н. В. Бурега, 2017

WIND REGIME CHARACTERISTICS ESTIMATION OF SOUTH OF UKRAINE FOR THE WIND ENERGY NEEDS

M. Kuznietsov, O. Lysenko

Abstract. *The current state of energy shows that there is great need to search for alternative ways of energy supply in Ukraine. Analysis and evaluation of the characteristics of the wind regime is one of the most important stages in the identification of promising areas for wind energy development. However, substantial and in-depth analysis of regional features hasn't been conducted, primarily due to lack of data needed to conduct such studies. In the article the characteristics of the wind flow south of Ukraine for a two-year array of 10-minute measuring wind speed and direction according to WPP Botiivskoi, Priazovskiy, Zaporizhzhya region was evaluated. In particular, the average monthly wind speed and its standard deviation was calculated, and to evaluate the performance of the wind turbine the potential power of a typical wind power unit was identified. The comparative evaluation of the calculations of the distribution of Weibull and actual values of the wind speed at the different heights was estimated. The dependence of the wind speed from altimetry and possible fluctuations in wind speed and direction was analyzed. The evaluation of the correlation between wind speed and direction was shown.*

Keyword:. *the wind regime, the average wind speed, wind turbine power output*

УДК 621.311.26.031

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПІД ЧАС ГЕНЕРЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ІЗ БІОГАЗУ

Н. В. БУРЕГА, молодший науковий співробітник
Тернопільський національний педагогічний
університет ім. В. Гнатюка
E-mail: buregan@ukr.net

Анотація. *Розглянута перспектива використання органічної біосировини, що дозволить зміцнити власну енергосистему та вирішити назріваючу екологічну катастрофу через низький рівень використання технологій утилізації відходів та вловлення сміттєзвального біогазу. Проведено аналіз тенденцій росту ринку біогазових технологій на основі світових лідерів його виробництва. З метою більш детального порівняння обрано п'ять комерційних електротехнологічних комплексів для визначення їх енергетичних та*

© Н. В. Бурега, 2017

економічних показників. Обрано ринкову модель установки БГУ-05, для розробки імітаційної моделі системи утворення біометану із врахуванням режимів роботи, впливу зовнішнього середовища. В якості джерела генерації електричної енергії, на основі літературних даних та комерційних пропозицій модернізовано бібліотечну модель Matlab водневої ТОПЕ для роботи на біометані із врахуванням системи рекуперації теплової енергії, для забезпечення потреб анаеробного процесу ферментації та споживача. Обрана ринкова модель системи очистки біогазу з метою врахування енергетичних потреб електротехнологічного комплексу, розроблена система керування теплоносія між ТОПЕ, реактором та споживачем. В результаті моделювання розраховано мінімально необхідну потужність стеку паливних елементів для забезпечення енергетичних режимів генерації біогазу із врахуванням температури зовнішнього середовища.

Ключові слова: біогазова установка, твердооксидний паливний елемент, імітаційна модель, система, біогаз, хімічне паливо, електротехнологічний комплекс

Актуальність. Однією із вимог до вступу України в Європейський союз є енергетична, котра передбачає збільшення частки використання поновлювальних джерел у власній енергосистемі. Володіючи значним біосировинним потенціалом та низьким рівнем розвитку утилізації органічних відходів промисловості, аграрного сектору, продукції АПК та діяльності людини, можна стверджувати про можливість розвитку технології добування біогазу на нашій території. Слід зазначити, що значний науковий потенціал спрямований на дослідження в галузі покращенням виходу біометану, складу субстратів, конструкцій реакторів та режимів роботи завантажування та перемішування. Малоефективною ділянкою електротехнологічного комплексу є генерації електричної енергії із використання ДВЗ, що спонукає до пошуку нових технології отримання електричної енергії. Одним із перспективних напрямів є використання електрохімічних технологій на базі твердооксидних паливних елементів із ККД до 60%.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз світового досвіду демонструє зростання потужності біогазових установок (БГУ) в країнах із спорідненими до України кліматичними особливостями та органічною сировиною (рис. 1) [1], що є індикатором економічної доцільності даної технології.

Можливість поєднання різноманітних органічних відходів із різними субстратами дозволяє генерувати біогаз залежно від сировинної бази конкретного регіону. Перевагою БГУ є гнучкість до використання сировини та генерація енергоносія в ламінарному режимі, що дозволяє зменшити витрати на систему акумуляції. Річна частка використання біогазу у США становить 500 млн. м³, Великій Британії – 200 млн. м³, Данії – 45 млн. м³, Китаї – 1,3 млрд м³, що забезпечується близько 5 млн. біогазових установок [2].



Рис. 1. Динаміка зростання кількості БГУ у Німеччині станом на 2013 р. із сумарною згенерованою електричною потужність 3,53ГВт на 7772 об'єктах

Мета дослідження – аналіз режимів роботи електротехнічного комплексу на базі створеної імітаційної моделі біогазової установки та твердооксидного паливного елемента для підвищення ККД генерації електричної енергії.

Матеріали і методи дослідження. Теоретичні дослідження базувалися на основних законах електротехніки, термодинаміки, збереження енергії та теоріях теплопередачі, електрохімічного перетворення енергії та теорії імовірності. Дослідження супроводжувалися розробленою марематичною моделлю із застосуванням імітаційного моделювання в програмному середовищі Matlab.

У ході виконання роботи використано методики досліджень вітчизняних і зарубіжних фахівців, матеріали науково-технічних конференцій щодо використання технологій безвідходного виробництва біогазу, таких як: Г. Г. Гелетука, Т. А. Железна, М. М. Жовнір, Д. В. Дероган, І. Б. Матвєєва, в котрих в значній мірі висвітлено сучасний стан біоенергетики ЄС та біопотенціал в Україні.

Результати дослідження та їх обговорення. На сучасному етапі використання БГУ має широку практику і великий світовий досвід, що налічує біоустановки різних конструкцій та потужностей, проте, домінуючою часткою (68%) є одноступінчаста система БГУ проточного типу з повним перемішуванням субстрату, системою акумулювання біогазу (синтетичні балони), підтримкою температури та рН середовища із рециркуляцією біомаси.

Біогаз, в основному, використовується для тепло- та електропостачання об'єктів господарювання, які знаходяться неподалік БГУ або для генерації електроенергії у загальну мережу. Для забезпечення технологічних процесів генерації біогазу в БГУ електричною та тепловою енергією у комплексі з ними використовуються електрогенератори із двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) та системами рекуперації теплової енергії димових викидів.

Існуюча система генерації електричної енергії яка широко використовується в комплексі із БГУ може бути суттєво модернізована шляхом використання твердооксидних паливних елементів (ТОПЕ), котрі в один технологічний етап перетворюють хімічне паливо (H_2 , CH_4) на електричний струм. Такий підхід дозволить підвищити ККД технологічного етапу генерації електроенергії до $\eta = 60\text{--}70\%$, що суттєво вище, ніж у ДВЗ та парових турбін ($\eta = 20\%$ та 45% відповідно) [3].

Робочий режим ТОПЕ проходить за температур $700\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$, що дає змогу рекуперувати частину теплової енергії для підтримки біологічних процесів анаеробної ферментації та потреб комплексу. За таким принципом побудована система BlueGEN, енергетичний баланс котрої вказаний на рисунку 2 із загальним ККД 85% [4].



Рис. 2. Енергетичний баланс ринкової установки BlueGEN на базі ТОПЕ потужністю $1,5\text{ kWt}$

Оскільки БГУ можуть бути побудовані як з одним, так і з багатьма ступенями анаеробного процесу та з різними інженерними підходами до перемішування, відбору та завантаження субстратів, тому виникає необхідність детального аналізу даної технології. На основі огляду ринкових пропозицій БГУ Німеччини було розглянуто п'ять основних технологічних рішень та вибрано на підставі цього такі критерії: споживання енергії для власного забезпечення (рис. 3 а), коефіцієнт вмісту CH_4 із одиниці об'єму протягом доби (рис. 3 б), рівень капіталовкладень (рис. 3 в) та вартість одного m^3 ферментера до добового об'єму виходу біометану (рис. 3 г). В результаті аналізу було обрано одноступінчасту установку БГУ-05 з об'ємом реактор 903 m^3 із використанням блокової ТЕЦ потужністю 180 kWt на базі газорідинного двигуна із добовою генерацією електричної – $3679\text{ kWt}\cdot\text{год}$ та теплової – $3781\text{ kWt}\cdot\text{год}$ енергії. Добовий вихід біогазу – $2,23\text{ nm}^3$ з одного 1 m^3 сировини із вмістом метану 54% або $1,18\text{ nm}^3\text{--CH}_4$ [5].

Для розробки моделі комплексу було враховано встановлені електротехнічні характеристики обладнання та добове завантаження біомаси ($17,8\text{ тонн}$) із зазначеними пропорціями (свинячий гній – 73% , кукурудзяний силос – 27%). Завантаження сухої біосировини в реактор

здійснюється шнеком-дозатором з електродвигуном потужністю 1,1 кВт порціями (по 800 кг кожних 4 години) 6 раз на добу. Свиначий гній подається два рази на добу по 7,5 тонн (через кожних 12 годин) за допомогою відцентрового насоса Stallkamp потужністю 11 кВт.

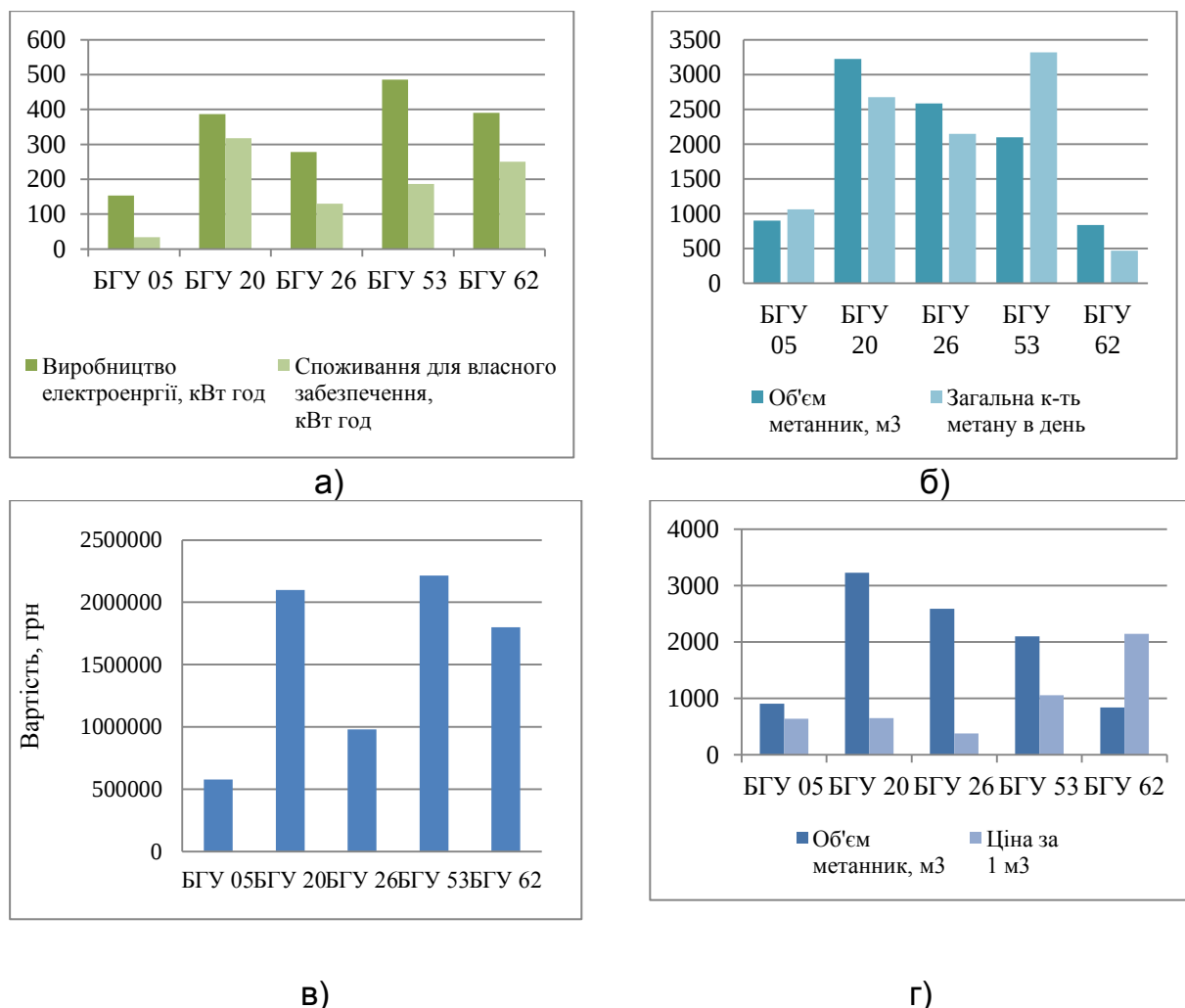


Рис. 2. Порівняльний аналіз БГУ різних технологічних рішень: а) співвідношення виробленої та спожитої електроенергії; б) відношення об'єму метанника і виходу CH_4 за добу; в) вартість БГУ; г) співвідношення вартості 1 м³ метанника до загального об'єму установки

Оскільки за вивантаження чи завантаження сировини розподіл теплоти в об'ємі реактора є недостатньо ефективним для оптимального виходу біогазу, технологія БГУ передбачає використання перемішувального пристрою з подовженими осями, потужністю 10 кВт, котрий вмикається кожних дві години після завантаження силосу шнеком. Для руху біомаси у нижній частині ферментатора використовується перемішувальний пристрій із занурювальним двигуном потужністю 11 кВт, який вмикається 6 раз на добу через годину після завантаження сухої біосировини шнеком [6].

Відповідно до алгоритму функціонування БГУ енергетичні затрати для забезпечення необхідних режимів її роботи можна розділити на електричні та теплові

$$\sum P = P_E + P_T \quad (1)$$

де P_E – електричні затрати БГУ;
 P_T – теплові затрати БГУ.

Баланс електричних витрат матиме наступний вигляд:

$$P_E = P_{ш} + P_{цн} + P_{п1} + P_{п2} + P_B \quad (2)$$

де $P_{ш}$ – енергетичні витрати шнека;

$P_{цн}$ – завантажувального відцентрового насоса;

$P_{п1}, P_{п2}$ – перемішувальних пристроїв;

P_B – вивантажувального відцентрового насоса.

Загальна споживана електроенергія за відповідний період роботи:

$$W_E = \sum_{i=1}^5 P_i \cdot t_i, \quad (3)$$

де $i = 1 \div 5$ – елемент пристрою (відповідно шнек, відцентровий насос, пристрій перемішування);

P_i – потужність пристрою;

t_i – час роботи пристрою.

На основі технічних характеристик обладнання та алгоритму його функціонування, було розроблено імітаційну модель комплексу БГУ програмними засобами Matlab/Simulink (рис. 4а), для визначення середньодобового споживання електроенергії під час генерації біогазу в номінальному режимі.

Процес бродіння проходить в мезофільному режимі за температури в реакторі 39,5 °С. Тепловий баланс біореактора можна представити як загальну споживану теплову енергію:

$$W_T = (Q_1 + Q_2) \cdot t, \quad (4)$$

де Q_1 – середньодобова теплова енергія для нагрівання біомаси до температури бродіння, кВт·год;

Q_2 – середньодобова теплова енергія для компенсації всіх тепловтрат, кВт·год;

t – час виходу системи до вказаної температури бродіння, діб.

$$Q_2 = Q_{KM} + Q_{БМ} + Q_D. \quad (5)$$

Найбільш суттєвими є втрати енергії Q_{KM} через стінки метанника в навколишнє середовище із площею бічної поверхні 360 м² та площею основи 150 м². Верхня частина реактора анаеробного бродіння теплоізолювана мінеральною ватою товщиною 100 мм та додатково прошарком утвореного біогазу, середньою вистою 2000 мм. Корпус виконаний із нержавіючої сталі товщиною 10 мм і теплоізолюований мінеральною ватою, товщиною 100 мм.

Оскільки під час завантаження біосировини (із температурою 15 °С) та її вивантаження $Q_{БМ}$, відбувається лише 4% руху біомаси від загального об'єму протягом доби, зміною температури можна знехтувати. Аналогічними є втрати теплоти під час перемішування біомаси Q_D , котрі становлять не більше 1,5%.

Система підігріву сметанника виконана у вигляді спірального теплообмінника із нержавіючої сталі, розташованого у нижній частині реактора із площею контакту 98 м².

Відповідно до теплового балансу було побудовано модель підсистеми реактора із врахуванням втрат у зовнішнє середовище в залежності від його температури, термоізоляції корпусу, температури сировини (рис. 4б).

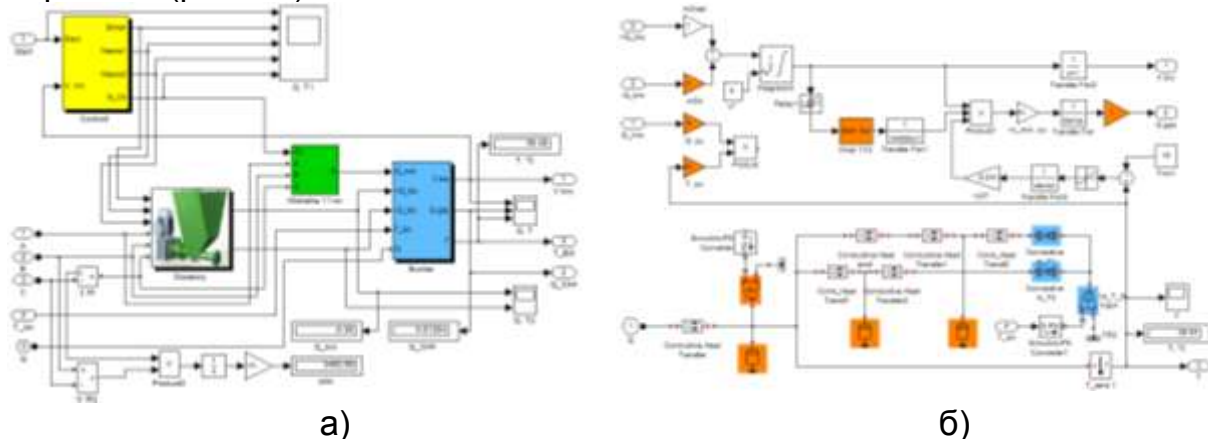


Рис. 4. Імітаційна модель комплексу БГУ–05: а) підсистема керування дозувальними пристроями сировини; б) підсистема теплової моделі із розрахунком теплових втрат в реакторі

Проведений аналіз літературних джерел та комерційних пропозицій таких установок дозволив модернізувати модель ТОПЕ (на основі імітаційної моделі із бібліотеки Matlab/Simulink) за рахунок використання теплообмінника, в результаті чого було встановлено, що система потужністю 120 кВт (два стеки по 60 кВт) дозволяє генерувати в середньому за добу близько 2866 кВт · год електричної та 1121 кВт год теплової енергії, споживаючи при цьому 446,6 м³ біометану. Це дозволяє використати її в якості основного джерела генерування енергії, оскільки володіє у 1,7 раз вищим показником від ДВЗ. В моделі комплексу враховано енергоспоживання ринкової системи очистки Camda KDCL-50-WQ із продуктивністю 50 м³ за годину та споживання електроенергії 50 кВт год [7].

На випадок нештатних ситуацій система володіє запасом електричної енергії, який зберігається у свинцевокислотних акумуляторних батареях, ємністю 400 А·год, напругою 480 В. Мостовий трифазний інвертор із перетворенням постійного струму в змінний з одинарним перетворювачем напруги 480-560 В у трифазну змінну напругу 220/380 В.

Імітаційна модель дозволила відпрацювати перехідні процеси в електротехнічному комплексі, визначити основні енергетичні затрати та генерацію біометану в залежності від зовнішньої температури $-15, 0, 15, 30$ °С протягом 120 діб (рис. 5).

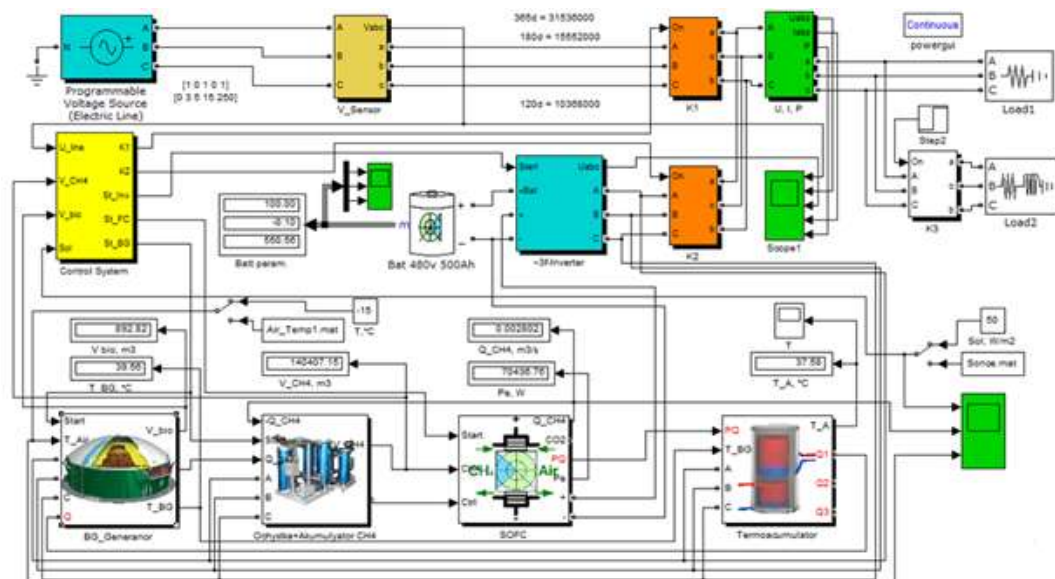


Рис. 5. Структура імітаційної моделі електротехнологічного комплексу генерації енергії із біометану на базі ТОПЕ

Оскільки вихід біогазу відбувається з 11 дня після запуску (рис. 6а), кількість згенерованого хімічного палива є недостатньою для підтримки енергетичних режимів комплексу. Тому, в системі передбачено сховище природного газу, об'ємом 14000 м³, котре заповнюється перед запуском із розрахунком забезпечення виходу метанника в номінальний режим роботи (рис. 6б). Зміна потужності ТОПЕ та кількість надходження теплової енергії у реактор анаеробної ферментації наведена на рис. 6в та рис. 6г відповідно.

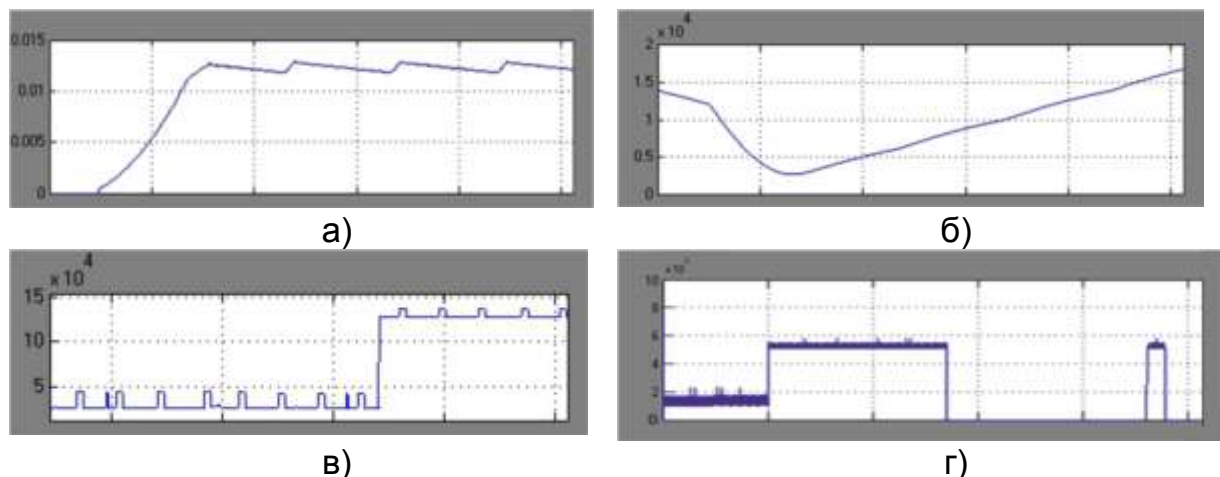


Рис. 6. Графік роботи БГУ протягом 120 днів за температури зовнішнього середовища 15 °С: а) продуктивність генерації біометану в БГУ, м³/с; б) зміна об'єму газу в сховищі системи очистки, м³; в) потужність ТОПЕ; г) надходження теплової енергії у БГУ

Тестування моделі комплексу дозволило визначити основні затрати енергії, спрямовані на розігрів біореактора, встановити час виходу на

номінальний режим роботи за зовнішньої температури – 15, 0, 15, 30 °C протягом 120 діб (табл.1).

1. Результати роботи моделі комплексу протяг 120 діб під впливом зовнішньої температури із використанням ТОПЕ, потужністю 120 кВт

Споживання енергії	Зовнішня температура, °C			
	-15	0	15	30
Електричні витрати, кВт · год	7303	7108	6939	6926
Теплові витрати, кВт · год	48752	41715	34400	27908
Вихід установки на номінальний режим роботи				
Час, діб	38,5	34	31	29,5
Електричні витрати, кВт · год	2343	2013	1792	1702
Теплові витрати, кВт · год	32276	29659	27543	25736
Згенеровано газу, м ³	98402	100833	102376	103437
Споживання системою очистки, кВт · год	138506	141704	143814	144245

Висновки і перспективи. Для дослідження режимів роботи електротехнічного комплексу було проведено аналіз ринкових технологій БГУ, обрано найбільш комерційно привабливі установки генерації хімічної енергії від біомаси. Удосконалено спосіб перетворення хімічної енергії біогазу у електричний струм із ККД 60%, шляхом заміни ДВЗ на електрохімічне джерело на базі ТОПЕ. Розроблена імітаційна модель комплексу на базі ТОПЕ, потужністю 120 кВт із середньодобовою генерацією 2866 кВт·год електричної та 1121 кВт·год теплової енергії; БГУ об'ємом реактора 903 м³ із максимальним добовим показниками генерації біогазу на рівні 2013 м³. Імітаційна модель дозволила розрахувати режими роботи та параметри системи очистки із продуктивністю 45 м³/год для отримання необхідної кількості біометану впродовж доби та початковий об'єм сховища 8000 м³ для автономної роботи комплексу.

Список використаних джерел

1. Концепція виробництва біогазу з біоенергетичних рослин в Україні [Електронний ресурс] – 2016. – Режим доступу : <http://eurowine.com.ua/?q=node/21301>.
2. Сидоров Ю. І. Сучасні біогазові технології. Національний університет «Львівська політехніка» / Ю. І. Сидоров // BIOTECHNOLOGIA ACTA, V. 6, No1, 2013.
3. Independent power supply of menage object based on biosolid oxide fuel / O. S.Beshta, V. S. Fedoreyko, A. O. Palchyk, N. V. Burega. // Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. – Taylor & Francis Group. London, UK, 2015. – С. 33-39.
4. Solid Power. BlueGen [Електронний ресурс]. – 2013. – Режим доступу: <http://www.bluegen.de>.
5. Biogas-MessprogrammII 61 BiogasanlagenimVergleich – Hofplatz 1 18276 Gülzow: FachagenturNachwachsendeRohstoffee.V. (FNR), 2009. – 170 с.
6. Erich Stallkamp ESTA GmbH [Електронний ресурс] // Stallkamp – Режим

доступу: <http://www.stallkamp.pl>.

7. Системи біогазової очистки [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу: <https://russian.alibaba.com/product-detail/biogas-scrubber-biogas-purification-system-biogas-pretreatment-system-1599308897.html>.

References

1. Kontseptsiya vyrobnytstva biohazu z bioenerhetychnykh roslyn v Ukrayini (2016). [The concept of bioenergy biogas plants in Ukraine].–Available at:<http://eurowine.com.ua/?q=node/21301>.

2. Sydorov, Yu. I. (2013). Suchasni biohazovi tekhnolohiyi Natsional'nyy universytet «L'vivs'ka politekhnika» [Modern biogas technology. National University "Lviv Polytechnic"]. BIOTECHNOLOGIA ACTA, 6 (1).

3. Beshta, O. S., Fedoreyko, V. S., Palchyk, A. O., Burega, N. V. (2015). Independent power supply of menage object based on biosolid oxide fuel. Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. Taylor & Francis Group. London, UK, 33-39.

4. Solid Power. BlueGen (2013). Available at: <http://www.bluegen.de>.

5. Biogas-MessprogrammII 61 BiogasanlagenimVergleich – Hofplatz 1 18276 (2009). Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.V. (FNR), 170.

6. Erich Stallkamp ESTA GmbH. Stallkamp – Available at: <http://www.stallkamp.pl>.

7. Systemy biohazovoi ochystky (2016).[Biogaspurificationsystems].Available at: <https://russian.alibaba.com/product-detail/biogas-scrubber-biogas-purification-system-biogas-pretreatment-system-1599308897.html>.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С БИОГАЗА

Н. В. Бурега

Аннотация. Рассмотрена перспектива использования органического биосырья, что позволит укрепить собственную энергосистему и решить назревающую экологическую катастрофу при низком уровне использования технологий утилизации отходов и улавливания мусорного биогаза. Проведен анализ тенденций роста рынка биогазовых технологий на основе мировых лидеров его производства. С целью более детального сравнения выбрано пять коммерческих электротехнологических комплексов для определения их энергетических и экономических показателей. Выбрана рыночная модель установки БГУ-05 для разработки имитационной модели системы образования биогаза с учетом режимов работы, влияния внешней среды. В качестве источника генерации электрической энергии на основе литературных данных и коммерческих предложений модернизировано библиотечную модель Matlab водородной TOTE для работы на биометане с учетом системы рекуперации тепловой энергии для обеспечения потребностей анаэробного процесса ферментации и потребителя. Выбранная рыночная модель системы

очистки биогаза с целью учета энергетических потребностей электротехнологического комплекса, разработана система управления теплоносителя между ТОТЕ, реактором и потребителем. В результате моделирования рассчитана минимально необходимая мощность стека топливных элементов для обеспечения энергетических режимов генерации биогаза с учетом температуры внешней среды.

Ключевые слова: *биогазовая установка, твердооксидный топливный элемент, имитационная модель, система, биогаз, химическое топливо, электротехнологический комплекс*

RESEARCH MODES ELECTRO-TECHNOLOGICAL OBJECT IN ENERGY GENERATION FROM BIOGAS

N. Burega

Annotation. *The perspective of the use of organic biomaterials is considered, which will allow to strengthen its own energy system and solve the emerging ecological catastrophe for the low level of utilization of technologies for waste utilization and capture of landfill biogas. The analysis of tendencies of growth of the market of biogas technologies on the basis of world leaders of its manufacture is carried out. For the purpose of a more detailed comparison, five commercial electrotechnological complexes were chosen to determine their energy and economic indicators. The market model of the BGU-05 installation was selected for the development of a simulation model of the biomethane education system, taking into account the operating modes, the influence of the external environment. As a source of electricity generation on the basis of literature data and commercial proposals, the Matlab library model of hydrogen SOFC has been modernized to work on biomethane, taking into account the heat recovery system to meet the needs of the anaerobic fermentation process and the consumer. The selected market model of the biogas treatment system to take into account the energy needs of the electrotechnical complex, a control system for the coolant between the SOFC, the reactor and the consumer was developed. As a result of the simulation, the minimum required power of the stack of fuel cells is calculated to ensure the energy regimes of biogas generation, taking into account the temperature of the external environment.*

Keywords: *biogas plant, a solid oxide fuel cell, a simulation model of the system, biogas, chemical fuel, electro-technological complex*

ВИКОРИСТАННЯ БІОРЕСУРСІВ МІСЦЕВОГО ПОХОДЖЕННЯ В АПК ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

В. П. МАРТИНІВ, аспірант*

**Тернопільський національний педагогічний університет
ім. В. Гнатюка**

E-mail: martynivv22@gmail.com

Анотація. Збільшення обсягів виробництва на фоні подорожчання енергоресурсів, викликає потребу в розробці перспективних енерго- й ресурсозберігаючих технологій та устаткування. Суттєвими недоліками технологічних процесів АПК сушіння зерна, що використовують теплогенератори, є те, що під час свого функціонування вони споживають велику кількість викопних енергоресурсів, присутні нерентабельні графіки їх роботи (пов'язані з відсутністю сировини для сушіння), розсіюють значну кількість теплової енергії. Основними напрямками вирішення вище названих проблем є використання принципів рекуперації, когенерації та застосування альтернативних видів палива, зокрема, перетворення твердих відходів у енергетичні ресурси. Застосування систем генерації електроенергії в зерносушильних комплексах дає можливість одночасно функціонувати технологічній лінії зерносушіння та отримувати дешеву електроенергію з біоресурсів місцевого походження, необхідну для потреб об'єктів господарювання. Дана система дозволяє замінити викопні (вуглеводневі) енергоресурси на біопаливо місцевого походження, здійснювати генерацію електроенергії в кількості 300-500 кВт·год для потреб об'єктів господарювання, зменшити час окупності технології в 2–3 рази в порівнянні з існуючими. Проаналізовано світові тенденції розвитку альтернативної енергетики, вказано на можливості застосування біоресурсів в агропромисловому комплексі для генерування електроенергії, проведено обґрунтування вітчизняного потенціалу альтернативних відновлюваних енергоресурсів.

Ключові слова: *альтернативна енергетика, ефективність, зерносушильний комплекс, енергоресурси, раціональність*

Актуальність. Енергетична самодостатність є на сьогоднішній день головним критерієм економічної повноцінності держави. Особливо гостро ця проблема стоїть перед Україною, де ціни на паливо безперервно зростають, неефективне використання паливно-енергетичного комплексу спостерігається в усіх галузях промисловості, структурні зміни, що відбулися протягом останнього десятиліття, характеризуються серйозним технологічним відставанням України від промислово розвинених держав світу (Данія, Іспанія, Португалія, Німеччина).

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В. С. Федорейко

Аналіз основних досліджень і публікацій. Окремі питання, які пов'язані з економічною характеристикою паливно-енергетичного комплексу України розглянуто у працях науковців М. О. Корчемного.. «Енергозбереження в агропромисловому комплексі», В. С. Федорейка.. «Шляхи підвищення енергетичної ефективності економіки України», Г. Г. Гелетухи «Аналіз енергетичних стратегій країн ЄС та світу і роль в них відновлюваних джерел енергії». які в значній мірі розкривають сучасний стан використання систем генерації електроенергії з біоресурсів місцевого походження із використанням принципів рекуперації, когенерації та застосування альтернативних видів палива, зокрема, перетворення твердих відходів у побутові енергетичні ресурси. Їх аналіз доводить, що агропромислові комплекси (для сушіння зерна і кормів) є одними з найбільших споживачів усіх видів палива, тому їх раціональному використанню приділяється велика увага, а питання, пов'язані з використанням альтернативних джерел енергії в АПК, набули пріоритетного значення та недостатньо висвітлені науковцями.

Мета дослідження – підвищення енергоефективності зерно-сушильних комплексів шляхом застосування систем генерації та біоресурсів місцевого походження.

Матеріали і методи дослідження. Теоретичні дослідження базувалися на основних законах енергозбереження, теплопередачі, електротехніки, термодинаміки. У ході виконання роботи використано методики досліджень вітчизняних і зарубіжних фахівців, матеріали науково-технічних конференцій.

Енергетична проблема нераціонального використання промислових потужностей, обмежені можливості атомної та гідроенергетики змушують звернути увагу на використання альтернативних енергоносіїв (вітер, сонце, тепло землі, біомаси, відходи промислових виробництв), перетворення теплової енергії в електричну [1].

Зростання тарифів на електроенергію та паливні матеріали, що створює додаткове фінансове навантаження на економіку нашої держави, стимулює до впровадження сучасних когенераційних та рекуперативних технологій, раціонального використання енергоресурсів, в тому числі, у процесах АПК для сушіння зерна.

За прогнозами міжнародного енергетичного агентства, до 2030 року потреби людства в електроенергії зростуть до 30116 млрд. кВт·год, що більше ніж удвічі перевищує сучасні потреби [2].

На сьогодні відновлювані джерела енергії забезпечують близько 19% кінцевого енергоспоживання в світі, зокрема, традиційна біомаса – 9%, сучасні ВДЕ – більше 10%. ВДЕ відіграють в енергетичній політиці України лише другорядну роль. Та частка альтернативних джерел енергії, яка запланована в енергетичній стратегії країни, а саме приблизно 6% станом на 2030 р., означає помітне відставання темпів їхньої розбудови від можливостей економічного потенціалу.

Найбільшими виробниками «зеленої» електроенергії є 7 країн, сумарні потужності яких складають 71,5% світових (470 ГВт, без

врахування гідроенергії): Китай, США, Німеччина, Італія, Іспанія, Японія, Індія [2].

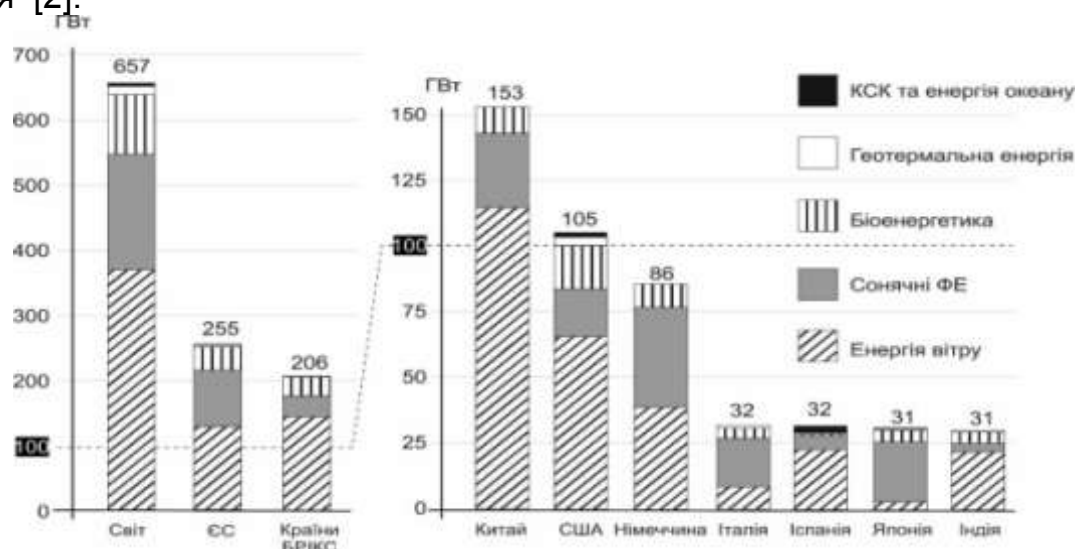


Рис. 1. Встановлена електрична потужність ВДЕ в світі, 2014 р.

Аналіз даних рис. 1 дає можливість зрозуміти, що першочерговість капіталовкладень в енергоощадні проекти і ефективне управління ними давно і масово реалізуються у світі. Адже саме такі проекти забезпечують кількісну економію паливно-енергетичних ресурсів, якісну пропорцію зниження шкідливих викидів SO_2 , NO_x , CO_2 , націлені на енергозаміщення природного газу відновлювальними біоресурсами місцевого походження. Вони частково розв'язують проблему екологічного та термального характеру, що виникає за використання викопних (вуглеводневих) енергоресурсів.

Результати дослідження та їх обговорення. Нами запропоновано спосіб підвищення енергоефективності зерносушильного комплексу, шляхом використання генеруючого модуля (парової турбіни) для перетворення теплової енергії в електричну.

Принципову схему генерації електроенергії показано на рисунку 2.

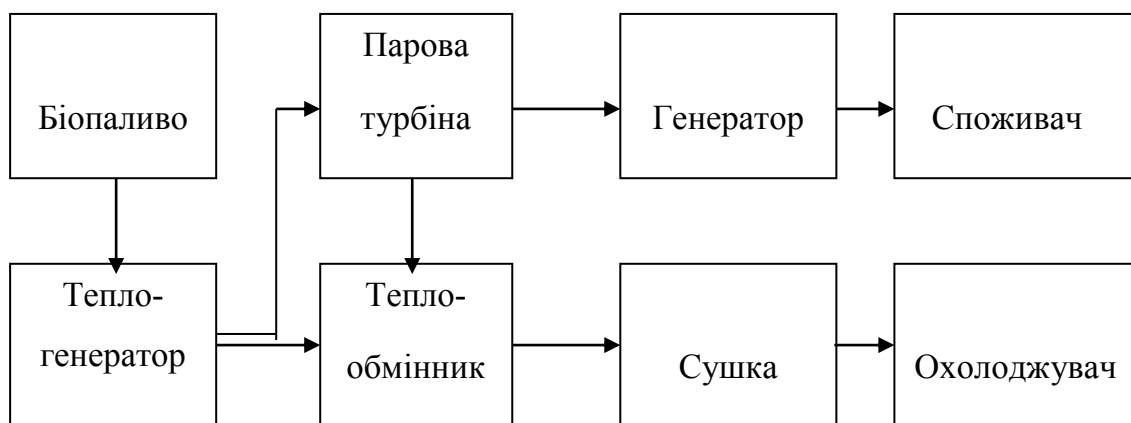


Рис. 2. Застосування систем генерації в процесі сушіння зерна

Застосування систем генерації електроенергії в АПК дозволяє одночасно функціонувати технологічній лінії зерносушіння та отримувати дешеву електроенергію з біоресурсів місцевого походження, необхідну для потреб об'єктів господарювання. Принцип роботи комплексу полягає у тому, що енергія високотемпературних теплових потоків, які виділяється в результаті спалювання біопалива у теплогенераторі потужністю 2 мВт, потрапляє у електрогенеруючий модуль (парову турбіну), в якому відбувається перетворення теплової енергії в електричну. Загалом рівняння теплового балансу теплогенератора можна записати так:

$$Q_3 = Q_{КОР} + Q_{ВТРАТ}, \quad (1)$$

де Q_3 – загальна теплота теплогенератора, кДж;

$Q_{КОР}$ – корисна теплота, кДж;

$Q_{ВТРАТ}$ – теплота втрат, кДж.

Якщо ж теплогенераторну установку доповнити генеруючим модулем для перетворення теплової енергії в електричну, тоді частина потужності теплових втрат $Q_{ВТРАТ}$ теплогенератора, використовується як джерело для генерації електричної енергії P_E , решта – неутилізовані втрати $Q_{НЕУТ}$:

$$Q_{ВТРАТ} = P_E + Q_{НЕУТ} \text{ втрат.} \quad (2)$$

У свою чергу $Q_{ВТРАТ}$ є функцією від загальної теплової потужності теплогенератора:

$$Q_{ВТРАТ} = Q_3 - Q_3 \cdot \eta_{ТГ} = (1 - \eta_{ТГ}) \cdot Q_{ПАЛ} \cdot n \cdot m, \quad (3)$$

де $\eta_{ТГ}$ – коефіцієнт корисної дії теплогенератора;

$Q_{ПАЛ} \cdot n$ – теплотворна здатність палива;

m – маса палива.

Генеруючий модуль пов'язаний з високооборотним генератором електричного струму, загальним валом-ротором. Перетворювач (блок силової електроніки) забезпечує подачу споживачеві електроенергії необхідної напруги і частоти.

В період відсутності сировини для сушіння (кукурудзи, ріпака, сої) система генерації електроенергії у зерносушильному комплексі дає можливість згенерувати електроенергію в кількості 300 – 500 кВт·год. Безперечно, втрати під час перетворення є, проте, згенерована електроенергія в 5-7 разів дешевша від виробленої з використанням газу, нафти, вугілля, тому ці перетворення виглядають привабливо. Загальновідомо, що чим більше генеруючих точок електроенергії, тим стабільніша енергосистема.

Рационалізацією цього проекту є також те, що в якості палива можна використовувати різну сировину біологічного походження з річним циклом повного відновлення (стрижні початків кукурудзи, солому, лушпиння соняшника, відходи промислових деревопереробних підприємств тощо). Перехід на альтернативні відновлювані джерела енергії, зважаючи на потенціал України, значно знизить залежність нашої держави від імпортованої енергосировини та дасть можливість отримання дешевої теплової і електричної енергії.

Висновки і перспективи. Таким чином, використання біоресурсів в АПК із застосуванням систем генерації електроенергії дозволяє:

- замінити викопні (вуглеводневі) енергоресурси на біопаливо місцевого походження для перетворення теплової енергії в електричну, де в якості сировини використовуються стрижні початків кукурудзи, солома, лушпиння соняшника, відходи деревопереробних підприємств тощо.

- здійснювати генерацію електроенергії в кількості 300-500 кВт·год для потреб об'єктів господарювання та зменшити навантаження на електромережу;

- використовувати паливний ресурс у зерносушильному комплексі для генерації теплової енергії в електричну, в тому числі, із важко-ліквідних матеріалів, що забезпечить зменшення часу окупності технології в 2–3 рази в порівнянні з існуючими.

Список використаних джерел

1. Федорейко, В. С. Шляхи підвищення енергетичної ефективності економіки України / В. С. Федорейко, І. С. Іскерський // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. - 2015. - Вип. 224. - С. 14-19.

2. Гелетуша, Г. Г. Аналіз енергетичних стратегій країн ЄС та світу і ролі в них відновлюваних джерел енергії. Ч. 1 / Г. Г. Гелетуша, Т. А. Железна, А. І. Баштовий // Пром. теплотехніка. - 2016. - 38, № 2. - С. 56-63.

3. Корчемний, М. О. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М. О. Корчемний, В. С. Федорейко, В. І. Щербань – Тернопіль: Підручники посібники, 2001. – 974 с.

References

1. Fedoreiko, V. S., Iskerskyi, I. S. (2015). Shliakhy pidvyshchennia enerhetychnoi efektyvnosti ekonomiky Ukrainy [Ways to improve energy efficiency economy Ukraine] Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriiia : Tekhnika ta enerhetyka APK, 224, 14-19.

2. Heletukha, H.H., Zheliezna, T. A., Bashtovyi, A. I. (2016). Analiz enerhetychnykh stratehii krain YeS ta svitu i roli v nykh vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ch. 1 [Analysis of the energy strategies of the EU and the world and their role in renewable energy. Part 1]. Prom. Teplotekhnika, 38 (2), 56-63.

3. Korchemnyi, M. O., Fedoreiko, V. S., Shcherban V. P. (2001). Enerhozberezhennia v ahropromyslovomu kompleksi. [Energy conservation in agriculture]. Ternopil, Pidruchnyky i posibnyky, 974.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОРЕСУРСОВ МЕСТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В АПК ДЛЯ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В. П. Мартинив

Аннотация. Увеличение объемов производства на фоне удорожания энергоресурсов, вызывает потребность в разработке

перспективных энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования. Существенными недостатками технологических процессов АПК, использующих теплогенераторы, является то, что во время своего функционирования они потребляют большое количество ископаемых энергоресурсов, присутствуют нерентабельные графики их работы (связанные с отсутствием сырья для сушки), происходит рассеивание большого количества тепловой энергии.

Основными направлениями решения перечисленных проблем является использование принципов рекуперации, когенерации и применения альтернативных видов топлива, в частности, - превращение твердых отходов в энергетические ресурсы. Применение систем генерации электроэнергии в АПК позволяет одновременно работать технологической линии зерносушки и получать дешевую электроэнергию, необходимую для нужд объектов хозяйствования, из биоресурсов местного происхождения. Система позволяет заменить ископаемые (углеводородные) энергоресурсы на биотопливо местного происхождения, осуществлять генерацию электроэнергии в количестве 300-500 кВт·год для нужд объектов хозяйствования, уменьшить время окупаемости технологии в 2-3 раза по сравнению с существующими.

В статье проанализированы мировые тенденции развития альтернативной энергетики, указано на возможность применения биоресурсов в агропромышленном комплексе для генерирования электроэнергии, проведено обоснование отечественного потенциала альтернативных возобновляемых энергоресурсов.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, эффективность, зерносушильный комплекс, энергоресурсы, рациональность

USE LOCAL LIFE OF ORIGIN IN AIC TO GENERATE HEAT AND POWER

V. Martyniv

Annotation. The increase in production against the backdrop of rise in price of energy is the need to design and advanced energy saving technologies and equipment. Significant deficiencies AIC processes that use heat generators, is that during their operation they consume large amounts of fossil energy, present their work unprofitable charts (related to the lack of raw materials drying) dissipate a significant amount of heat. The main directions of solving the above problems is to use the principles of recovery, cogeneration and alternative fuels, in particular - converting solid waste into energy resources. The use of power generation in agriculture can simultaneously operate technological line grain drying and getting cheap electricity from the local origin of biological resources necessary for the needs of facilities management. Lets replace fossil (hydrocarbon) energy into biofuel local origin, to the generation of electricity in the amount of 300-500 kVt·hod needs for

facilities management, reduce the payback time technology by 2-3 times compared to existing ones. Analyzed global trends in alternative energy, given the possibility of the use of biological resources in agriculture to generate electricity conducted national study potential alternative renewable energy.

Keywords: *alternative energy, efficiency, grain drying complex, energy, rationality*

УДК 631.362.3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ В ОБЕРТАЛЬНОМУ БАРАБАНІ ЗА КОМБІНОВАНОГО ПІДВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Р. А. КАЛІНІЧЕНКО, кандидат технічних наук, доцент кафедри...

*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

Б. І. КОТОВ., доктор технічних наук, професор

Вінницький національний аграрний університет України

А. В. СПІРІН, кандидат технічних наук, доцент

Вінницький національний аграрний університет України

E-mail: rkalinichenko@ukr.net

Анотація. Зберігання у сухому стані – найбільш розповсюджений спосіб консервування рослинних матеріалів. Енерговитрати на сушіння зернових, насінневих і кормових матеріалів можуть складати до 50 % від сумарних затрат на виробництво готового продукту. Універсальні сушарки барабанного типу широко використовуються в господарствах, оскільки, дозволяють проводити зневоднення різних сипучих вологих матеріалів, але за цілим рядом показників роботи (питомі затрати енергії, рівень автоматизації, виконання екологічних вимог, та інші) ці сушарки не зовсім відповідають сучасним вимогам виробництва сільськогосподарської і переробної галузей. Вирішення задач оптимізації щодо продуктивності і енергозатрат барабанних агрегатів можливе лише за наявності адекватної математичної моделі процесів. Тому метою досліджень було вдосконалення математичного опису процесів тепло- і масообміну в процесі сушіння матеріалу в обертовому барабані за наявності джерел ІЧ-випромінювання. За результатами аналізу аналітичних математичних моделей теорії тепло- і масообміну отримано математичний опис динамічних режимів зневоднення сипкого матеріалу в обертовому барабані з комбінованим конвективно-радіаційним підведенням енергії до матеріалу за врахування розподіленості параметрів процесу за довжиною барабану. Отримані рівняння

facilities management, reduce the payback time technology by 2-3 times compared to existing ones. Analyzed global trends in alternative energy, given the possibility of the use of biological resources in agriculture to generate electricity conducted national study potential alternative renewable energy.

Keywords: *alternative energy, efficiency, grain drying complex, energy, rationality*

УДК 631.362.3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ В ОБЕРТАЛЬНОМУ БАРАБАНІ ЗА КОМБІНОВАНОГО ПІДВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Р. А. КАЛІНІЧЕНКО, кандидат технічних наук, доцент кафедри...

*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

Б. І. КОТОВ., доктор технічних наук, професор

Вінницький національний аграрний університет України

А. В. СПІРІН, кандидат технічних наук, доцент

Вінницький національний аграрний університет України

E-mail: rkalinichenko@ukr.net

Анотація. Зберігання у сухому стані – найбільш розповсюджений спосіб консервування рослинних матеріалів. Енерговитрати на сушіння зернових, насінневих і кормових матеріалів можуть складати до 50 % від сумарних затрат на виробництво готового продукту. Універсальні сушарки барабанного типу широко використовуються в господарствах, оскільки, дозволяють проводити зневоднення різних сипучих вологих матеріалів, але за цілим рядом показників роботи (питомі затрати енергії, рівень автоматизації, виконання екологічних вимог, та інші) ці сушарки не зовсім відповідають сучасним вимогам виробництва сільськогосподарської і переробної галузей. Вирішення задач оптимізації щодо продуктивності і енергозатрат барабанних агрегатів можливе лише за наявності адекватної математичної моделі процесів. Тому метою досліджень було вдосконалення математичного опису процесів тепло- і масообміну в процесі сушіння матеріалу в обертовому барабані за наявності джерел ІЧ-випромінювання. За результатами аналізу аналітичних математичних моделей теорії тепло- і масообміну отримано математичний опис динамічних режимів зневоднення сипкого матеріалу в обертовому барабані з комбінованим конвективно-радіаційним підведенням енергії до матеріалу за врахування розподіленості параметрів процесу за довжиною барабану. Отримані рівняння

можна використовувати для аналізу процесу і оптимізації режимних параметрів за відомих значень конструктивних параметрів.

Ключові слова: *математична модель, барабан, ІЧ-випромінювач, сушильний агент, вологий матеріал*

Актуальність. Сушіння є індустріальним способом сухого консервування вологих рослинних матеріалів і продуктів і у відношенні до об'ємів висушування зернових, насіннєвих і кормових матеріалів складає суттєву долю у виробничих галузях АПК. Для висушування такого різноманіття сільськогосподарської сировини в натуральному або подрібненому (для надання сипкості) вигляді широко використовують найбільш універсальні сушильні агрегати барабанного і пневмобарабанного типу. В агрегатах останнього типу матеріал в процесі пересипання за обертання барабану переміщується під дією сушильного агента. Вітчизняна промисловість і закордонні виробники для потреб сільського господарства виробляє значну кількість моделей сушарок такого типу. Але за цілим рядом показників роботи (питомі затрати енергії, рівень автоматизації, виконання екологічних вимог, та інші) ці сушарки не зовсім відповідають сучасним вимогам виробництва сільськогосподарської і переробної галузей.

Значні витрати енергії на випаровування вологи з матеріалу зумовлені значними витратами теплоти в оточуюче середовище, а саме витратами теплоти з відпрацьованим сушильним агентом і теплопередачею через поверхню барабану в оточуюче середовище. Радикальним способом зниження цих видів втрат енергії є зменшення загальної кількості сушильного агента, що може бути досягнуто підведенням додаткової енергії безпосередньо в зону сушіння через спеціальні нагрівальні елементи – інфрачервоні випромінювачі. Але застосування такого способу організації процесу сушіння стримується відсутністю розрахункових математичних моделей тепло- і масообміну в процесі сушіння в барабанних агрегатах за наявності додаткових джерел ІЧ-випромінювання в локальних зонах сушарки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В існуючих публікаціях достатньо матеріалів щодо розрахунку процесів тепло- і масообміну [1] та переміщення матеріалу [2] в установках барабанного типу за сушіння сільськогосподарських і харчових матеріалів. Обґрунтовано ефективність застосування терморадіаційного енергопідведення [3] в сушильних барабанах. Основною перевагою таких схем сушильного процесу є більш ефективна передача теплової енергії до матеріалу і можливість впливати на характер розподілу температури матеріалу за довжиною барабану. Однак у відомих роботах вплив локального ІЧ-підведення до матеріалу за одночасного впливу рухомого сушильного агента не розглядається, а математичний опис таких процесів відсутній.

Мета дослідження – вдосконалення математичного опису процесів тепло- і масообміну в процесі сушіння матеріалу в обертовому барабані за наявності джерел ІЧ-випромінювання.

Матеріали і методи досліджень. Специфіка досліджуваного питання зумовлює доцільність використання в якості основного аналітично-розрахункового методу дослідження процесів тепло- і масообміну за сушіння дисперсного матеріалу в барабанних агрегатах. Оскільки математичний опис застосовується для визначення раціональних режимів роботи сушарки в стаціонарному і перехідному (динаміка виходу на сталий режим) процесах, вважатимемо, що досліджується конкретний барабан з комбінованою лопатевою і розподільною насадкою з відомими геометричними параметрами. Задача досліджень при цьому полягає у визначенні впливу потужності і її розподілу на процеси нагріву і зневоднення матеріалу. Враховуючи прямооточний рух сушильного агента і матеріалу гідравлічна схема роботи агрегату відповідатиме моделі ідеального витіснення.

Результати дослідження та їх обговорення. Для складання математичного опису зробимо відповідні припущення, що спростують схему процесу, але не спотворюють фізичну сутність явищ: теплофізичні властивості переміщуваних середовищ та елементів конструкції барабана постійні, теплопровідність за радіусом і довжиною не враховуємо; тепловиділення випромінюючого елемента сконцентровано в одній внутрішній ємності; усі види теплообміну враховуються коефіцієнтами тепловіддачі, що не залежать від температури; нагрівання матеріалу і конструкцій безградієнтне; розподіл параметрів процесу одномірний в напрямку руху матеріалу і сушильного агента (OY).

З урахуванням зроблених припущень математична модель процесу сушіння матеріалу в барабанному агрегаті для зони розташування ІЧ-випромінювача в загальному випадку описується системою диференціальних рівнянь у частинних похідних п'ятого порядку для чотирьох теплоінерційних ємностей (матеріал, випромінювач, барабан, сушильний агент) і масоємності матеріалу за таких початкових умов:

$$\tau = 0; t = t_0; \theta = \theta_0; U = U_0 \quad ; \quad \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial U}{\partial \tau} = 0 \quad \text{і} \quad \text{граничних умов:}$$

$$y = 0; t = t_1 = t_0; \theta = \theta_1 = \theta_0; \quad \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\partial U}{\partial y} = 0;$$

$$Lm_z c_z \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - Lm_0 r_0 \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial U}{\partial y} \right) = \alpha_k f_z \theta - \theta + \varepsilon \sigma \cdot f_w T_w^4 - T_z^4 + \alpha_{k-w} f_b \theta_b - \theta; \quad (1)$$

$$P = m_w c_w \frac{\partial \theta_w}{\partial \tau} + \varepsilon \sigma \cdot f_w' A_w T_w^4 - T_z^4 + \alpha_k f_w \theta_w - t + \alpha_w f_b'' \theta_w - \theta_b; \quad (2)$$

$$m_b c_b \frac{\partial \theta_b}{\partial \tau} = \alpha_b f_b \theta_w - \theta_b + \alpha_k f_b \theta_z - \theta_b; \quad (3)$$

$$Lm_p c_p \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + v_p \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \alpha_k f_z \theta - t + \alpha_k f_b \theta_b - t + \alpha_k f_w'' \theta_w - t; \quad (4)$$

$$Lm_0 \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial U}{\partial y} \right) = k(t) U - U_p; \quad (5)$$

де $t, \theta, \theta_w, \theta_b$ – відповідно температури сушильного агента (повітря), матеріалу, випромінювача, барабану;

U, U_p – вологовміст матеріалу поточний і рівноважний;

$T = 273 + \theta$ – абсолютна температура;

P – потужність випромінювача;

A – коефіцієнт поглинання матеріалу;

ε – ступінь чорноти випромінювального тіла (випромінювача);

σ – стала Стефана-Больцмана;

f_z, f_b, f_w – поверхні матеріалу, барабану і випромінювача;

m_z, m_w, m_b, m_p – маси матеріалу, випромінювача, барабану, повітря;

α – коефіцієнт теплообміну (k – конвективного, w – радіаційного);

$k(t)$ – коефіцієнт сушіння;

v_p, v_z – швидкості переміщення сушильного агента (повітря) і матеріалу.

За використання зонального опромінення матеріалу, коли ІЧ-випромінювач розміщений в барабані у певній зоні (зона I – рис.1) необхідно мати також математичний опис процесу сушіння в барабані у разі відсутності випромінювача і наявності насадки (зона II – рис.1).

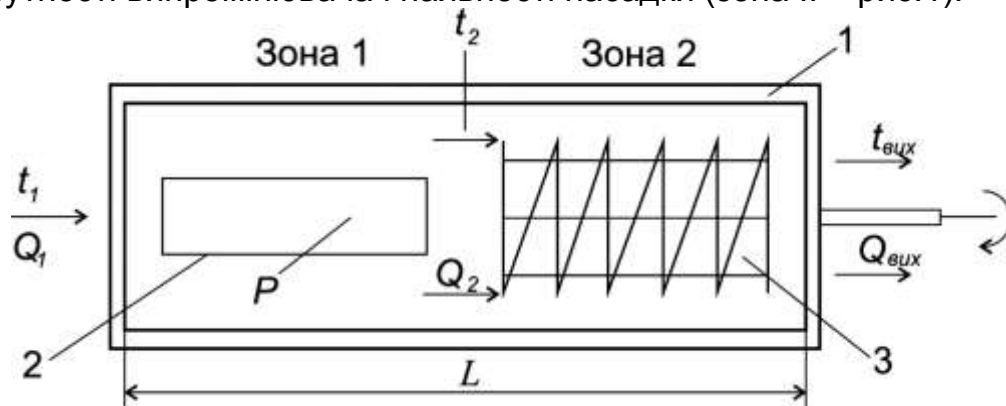


Рис.1. Схема барабанної сушарки (1 – барабан, 2 – ІЧ-випромінювач, 3 – насадка)

Для другої зони сушильного барабана математична модель може бути представлена системою диференціальних рівнянь четвертого порядку для чотирьох теплоінерційних ємностей (сушильного агента, матеріалу, насадки, корпусу барабану):

$$Lm'_a c_p \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + v_p \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \alpha f' \theta - t + \alpha f'_{n-b} \theta_n - t + \alpha f'_b \theta_b - t \quad (6)$$

$$Lm'_z c_z \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = \alpha f' \theta - \theta + Lm_0 r \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \alpha_n f'_n \theta_n - \theta \quad (7)$$

$$m_n c_n \frac{\partial \theta_n}{\partial \tau} = \alpha f'_n \theta - \theta_n + \alpha f'_n \theta_z - \theta_n \quad (8)$$

$$m'_b c'_b \frac{\partial \theta_b}{\partial \tau} = \alpha f'_b \theta - \theta_b + \alpha f'_b \theta_z - \theta_b \quad (9)$$

де m_n, c_n, f_n – маса, питома теплоємність і поверхня теплообміну насадки;

θ_n – температура насадки,

t_z – температура зовнішнього середовища; (позначка ' вказує на належність до другої зони барабана.

Отримані системи рівнянь описують процеси сушіння матеріалу в барабанному агрегаті і можуть бути розв'язані числовими методами на ЕОМ.

Для спрощеного аналізу впливу режимних параметрів на процес зміни вологості і температури матеріалу можна використати наближений метод [4]. В установленому режимі усі параметри процесу в будь-який момент часу будуть однаково розподілені за координатою, тобто $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial U}{\partial \tau} = 0$, що дає можливість визначити статичні характеристики сушарки $\theta(y)$, $t(y)$, $U(y)$ за лінеаризації радіаційних членів рівнянь, а саме заміною [5]:

$$\varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) = \alpha_e (\theta_1 - \theta_2) \quad (10)$$

де $\alpha_e = c_{np} \cdot 10^{-8} (T_1^2 + T_2^2) (\theta_1 + \theta_2)$;

c_{np} – приведений коефіцієнт випромінювання.

Врахувавши (10) можна отримати аналітичний розв'язок системи рівнянь для сталого режиму.

Динаміку процесу – перехідний режим можна визначити замінивши градієнти $\frac{\partial t}{\partial y}$, $\frac{\partial \theta}{\partial y}$, $\frac{\partial U}{\partial y}$ похідними від отриманих розв'язків θ' , t' , U' .

Висновки і перспективи. Отримано математичний опис динамічних режимів сипкого матеріалу в обертальному барабані з комбінованим конвективно-радіаційним підведенням енергії до матеріалу за врахування розподіленості параметрів процесу за довжиною барабану.

Отримані рівняння можна використовувати для аналізу процесу і оптимізації режимних параметрів у разі відомих значень конструктивних параметрів.

Список використаних джерел

1. Антипов, С. Т. Тепло- и массообмен при сушке в аппаратах с вращающимся барабаном / С. Т. Антипов, В. Я. Валуйский, В. И. Меснянкин. – Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2001. – 308 с.
2. Першин, В. Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В. Ф. Першин, В. Г. Однолько, С. В. Першина. – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.
3. Незведська, І. В. Обґрунтування параметрів сушильних барабанів з терморадіаційним енергопідведенням сушильного агента при сушінні коренів цикорію / І. В. Незведська. // Сучасні проблеми збалансованого природокористування: матеріали V-міжнародної наук.-практ. конф ... ПДАТУ. Кам'янець-Подільський. – 2010. – С. 170–172.

4. Котов, Б. І. Врахування розподіленості параметрів при моделюванні динамічних режимів сушарок сільськогосподарських матеріалів / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, В. О. Швидя. // Сільськогосподарські машини. – 2016. – №34. – С. 74–80.

5. Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.

References

1. Antipov, S. T., Valuyskiy, V.Y a., Mesnyankin, V. I. (2001). Teplo- i massoobmen pri sushke v apparatakh s vrashchayushchimsya barabanom [Heat and mass transfer in the drying apparatus with a rotary drum]. Voronezh: Voronezh. gos. tekhnol. akad., 308.

2. Pershin, V. F., Odnol'ko, V. G. (2009). Pererabotka sypuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa [Processing of bulk materials in drum-type machines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 220.

3. Nezvedska, I. V. (2010). Obgruntuvannia parametriv sushylnykh barabaniv z termoradiatsiynym enerhopidvedenniam sushylnoho ahenta pry sushinni koreniv tsykoriiu [Substantiation of parameters of drying drums termoradiatsiynym enerhopidvedenniam drying agent drying chicory roots]. Materialy V-mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «Suchasni problemy zbalansovanoho pryrodokorystuvannia» PDATU. Kam'ianets-Podilskyi, 170–172.

4. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., Shvydia, V. O. (2016). Vrakhuvannia rozpodilenosti parametriv pry modeliuvanni dynamichnykh rezhymiv susharok silskohospodarskykh materialiv [Consideration distributions parameters in the simulation of dynamic modes dryers agricultural materials]. Silskohospodarski mashyny, 34, 74–80.

5. Ginzburg, A. S., (1973) Osnovy teorii i tekhniki sushki pishchevykh produktov [Fundamentals of the theory and technology of food drying]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 528.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ БАРАБАНЕ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ПОДВОДЕ ЭНЕРГИИ

Р. А. Калиниченко, Б. И. Котов, А. В. Спирин

Аннотация. *Хранение в сухом состоянии – наиболее распространенный способ консервирования растительных материалов. Энергозатраты на сушку зерновых, семенных и кормовых растительных материалов могут составлять до 50% от суммарных затрат на производство готового продукта. Универсальные сушилки барабанного типа широко используются в хозяйствах, поскольку позволяют проводить обезвоживания различных сыпучих влажных материалов, но по целому ряду показателей работы (удельные затраты энергии, уровень автоматизации, выполнения экологических требований, и другие) эти сушилки не совсем соответствуют современным требованиям производства сельскохозяйственной и перерабатывающей отраслей. Решение задач оптимизации по производительности и энергозатратам барабанных*

агрегатов возможно только при наличии адекватной математической модели процессов, поэтому целью исследований было совершенствование математического описания процессов тепло- и массообмена в процессе сушки материала во вращающемся барабане при наличии источников ИК-излучения. По результатам анализа аналитических математических моделей теории тепло- и массообмена получено математическое описание динамических режимов обезвоживания сыпучего материала во вращающемся барабане с комбинированным конвективно-радиационным подводом энергии к материалу с учетом распределенности параметров процесса по длине барабана. Полученные уравнения можно использовать для анализа процесса и оптимизации режимных параметров при известных значениях конструктивных параметров.

Ключевые слова: математическая модель, барабан, ИК-излучатель, сушильный агент, влажный материал

MATHEMATICAL MODEL OF PLANT RAW MATERIALS DRYING IN A ROTATING DRUM WITH THE COMBINED ENERGY SUPPLY

R. A. Kalinichenko, B. I. Kotov, A. V. Spirin

Abstract. Storage in dry most common method of preserving plant material. Energy consumption for drying grain, seed and feed material can comprise up to 50% of the total cost of production of the finished product. Universal dryer drum widely used as farms because allow dewatering of various loose moist materials, but for a number of performance indicators (unit cost of energy, the level of automation, the implementation of environmental requirements, etc.), these dryers do not completely meet the current requirements of agricultural and processing industries. Solving optimization problems on performance and energy consumption drum units is possible only if adequate mathematical models of processes because the purpose of research was to improve the mathematical description of heat and mass transfer during drying material in a rotating drum in the presence of sources of infrared radiation. The analysis of analytical mathematical models of thermal mass transfer theory received mathematical description of dynamic modes dewatering bulk material in the rotary drum with combined convection-radiation energy to supply material distribution taking into account parameters of the length of the drum. The equations can be used for process analysis and optimization of operating parameters with known values of design parameters.

Keywords: mathematical model, drum, IR emitter, drying agent, wet material

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ

С. В. ГАЙДУКЕВИЧ, старший викладач

Л. С. КОЛОДІЙЧУК, кандидат педагогічних наук, доцент

М. В. ПОТАПЕНКО, старший викладач

Н. П. СЕМЕНОВА, старший викладач

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

E-mail: SoleykoS@mail.ru

Анотація. Проаналізовано можливості використання теплових насосів для підвищення енергоефективності систем опалення тваринницьких приміщень, на прикладі телятника на 600 голів. Проведено моніторинг витрати і надходження теплоти в залежності від зміни теплового режиму сільськогосподарського приміщення і навколишнього середовища та встановлено залежність між цими показниками. Складено тепловий баланс об'єкту дослідження і розраховано теплове навантаження, виходячи з умов забезпечення температурного режиму в залежності від виду тварин, теплопровідності огорожувальних конструкцій і кліматичної зони розташування. Встановлено, що найбільші тепловтрати в телятнику виникають через огорожувальні конструкції і вентиляцію залежно від зовнішньої температури. Обчислено основні технічні характеристики теплового насоса та проведено їх аналіз.

Ключові слова: *тепловий насос, теплонасосна система, система опалення, теплове навантаження*

Актуальність. Низька ефективність використання енергетичних ресурсів, особливо в електротехнологічних комплексах щодо забезпечення мікроклімату в спорудах АПК, обумовлює пошук шляхів удосконалення існуючих і розробку нових прогресивних електротехнологій та засобів реалізації.

Сьогодні підвищення енергоефективності системи опалення тваринницького приміщення стає все більш актуальним у зв'язку із ростом цін й зменшенням лімітів на енергоносії.

Це пов'язано з тим, що забезпечення необхідного мікроклімату є одним з найбільш енергоємних технологічних процесів (до 40 % від загальних енерговитрат) поряд із приготуванням й роздаванням кормів, прибиранням гною.

Зокрема, в умовах постійно зростаючих цін на енергоносії пошук шляхів енергозбереження є першочерговим завданням, вирішення якого

дозволить забезпечити максимальну продуктивність тварин за мінімальних витрат паливно-енергетичних ресурсів.

Враховуючи вище сказане, в умовах інтенсивного розвитку промислового тваринництва важливою інженерною задачею є створення таких вентиляційно-опалювальних систем, які б забезпечували необхідні зоогігієнічні умови утримання тварин і знижували енерговитрати на створення оптимального мікроклімату.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробкою опалювальних установок та підвищенням їх ефективності в аграрному секторі економіки займалися такі науковці як А. А. Амерханов, А. Г. Римарів, Г. Н. Самарін, С. В. Мельник, Н. А. Садомів, М. П. Шаталів, А. Г. Семенова, А. В. Соковікова, А. М. Адріанів, В. В. Савічев, К. И. Шкурихіна, К. А. Гарькавий, В. Г. Житів, С. А. Філатов, А. В. Бодунов, Ю. А. Воробйова, Д. А. Лашин, П. Ш. Ібрагімов і інші..

Більшість науковців вважають, що вітчизняне аграрне виробництво неминуче стикається з необхідністю модернізації техніки, технологій і процесів з метою виробництва конкурентоздатної на світовому ринку продукції.

Повна модернізація, в основному, спрямована на підвищення продуктивності, точності регулювання параметрів технологічного процесу і підвищення енергоефективності [2].

Мета дослідження – розглянути питання підвищення енергоефективності системи опалення тваринницького приміщення за рахунок використання повітряного теплового насоса.

Матеріали і методи дослідження. Відомо, що ефективність теплового насосу, як будь-якої теплової установки, залежить безпосередньо від географічного розташування, особливостей кліматичної зони, особливостей самого приміщення тощо. В теплових насосах використовують низькотемпературні джерела теплоти. Зокрема повітря, ґрунт, поверхневі природні води та підземні води.

З перелічених низькотемпературних джерел теплоти зупинимось на повітрі, що не потребує капіталовкладень і є безкоштовним джерелом.

Результати дослідження та їх обговорення. Основними видами енергоресурсів, які споживає аграрне виробництво, є паливно-мастильні матеріали (ПММ), газ, тепла і електрична енергії. В залежності від сільськогосподарського напрямку пріоритет віддається різним його видам. Тваринництво, в основному, споживає ПММ і електроенергію, перетворюючи їх в теплову енергію.

На відміну від газових котлів, котлів на рідкому і твердому паливі, теплові насоси мають відмінні показники економічності роботи (щомісячні витрати зменшуються від 2 до 10 разів).

Основна відмінність теплового насоса від інших генераторів теплової енергії, наприклад, електричних, газових і дизельних генераторів тепла полягає в тому, що за виробництва тепла до 80% енергії вбирається з навколишнього середовища. Це дозволяє отримати в 3-4 рази більше теплової енергії в порівнянні з витраченою електричною.

На сьогоднішній день в Україні вартість виробництва теплової енергії значно залежить від виду «палива»: найдешевшим є природний газ, потім електроенергія і дизельне паливо. Тому з'являється можливість відмовитися або значно скоротити використання вище згаданих видів палива, а значить, менше часу приділяти обслуговуванню обладнання з його виробництва, звичайно, це економія енергії і грошей.

Одним із ключових чинників, що впливають на собівартість одержуваної сільськогосподарської продукції, є її енергоємність. За стандартом енергоємність розраховується як кількість енергії, що витрачається на виробництво одиниці продукції. Величина зворотна енергоємності – енергоефективність.

Енергоефективність представляє собою ефективне, в даному випадку, раціональне використання енергетичних ресурсів. Іншими словами, використання меншої кількості енергії, але при цьому забезпечуючи той же рівень вихідної продукції. На даний момент основним технологічним процесом є процес підтримання нормованих параметрів мікроклімату.

За таким показником, як енергоефективність, вітчизняні виробники мають помітне відставання від своїх західних колег. Суттєвий вплив в даній ситуації має географічне положення і кліматичні умови країни, а також недоліки у використанні новітніх технологій, технічних пристроїв і систем управління. Саме тому дотепер аграрний бізнес не має підвищеного попиту і є проблемним для малих господарств. За постійного зростання цін на енергоносії ситуація лише ускладнюється.

Якщо врахувати, що вартість 1 кВт·год неухильно зростає, як і вартість всіх енергоресурсів, то необхідно знайти більш економний, енергозберігаючий спосіб формування мікроклімату. При цьому важливо, щоб він був найбільш точний, оскільки відхилення від норм приведуть до втрат через порушення імунітету тварин. Адже чим менше вік тварин, тим більше енергії на них потрібно витратити, щоб довести до реалізаційного віку. Нижче приведена таблиця 1 [4] розкриває дану інформацію на прикладі телят.

1. Залежність споживаної енергії від віку телят

Вік телят, міс	0-1	1-2	3	4-6
Температура утримання, °C	16-18	12-16	10-12	8-10
Необхідна кількість енергії на 1 голову за год., ккал	135,8	114,35	57,6	13,75

Вважаємо, що для економії й ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів, необхідна розробка і впровадження енергозберігаючого устаткування з метою створення і підтримування в необхідних межах основних параметрів мікроклімату в тваринницьких приміщеннях.

На практиці однією з перспективних енергозберігаючих технологій, яка використовує відновлювані джерела енергії для створення оптимального мікроклімату, є застосування теплових насосів. Теплові насоси є різновидом трансформаторів теплоти і призначені для одержання

теплоносія середнього та підвищеного потенціалу, використовуваного за теплового споживання [6].

Схиляємось до думки, що в умовах інтенсивного розвитку промислового тваринництва важливою задачею є модернізація вентиляційно-опалювальних систем за такими напрямками:

- застосування новітніх технологій енергозбереження в тваринницьких приміщеннях;
- впровадження автоматизованих систем управління параметрами мікроклімату тваринницьких приміщень.

Зокрема, підвищення енергоефективності енергозбереження і створення точної системи підтримки температурно-вологісних параметрів мікроклімату дозволять істотно скоротити енерговитрати на одиницю одержуваної сільськогосподарської продукції. У ході дослідження з'ясовано, що потенціал енергозбереження і пов'язане з ним коректування роботи системи регулювання температурно-вологісних параметрів мікроклімату тваринницького приміщення можна визначити за наступними критеріями:

- зниження втрат теплоти через огорожувальні конструкції, виключення інфільтрації;
- використання альтернативних джерел енергії;
- використання низькопотенційних джерел тепла.

При цьому зниження втрат теплоти через огорожувальні конструкції, виключення інфільтрації можна досягти за рахунок будівництва нових або реконструкції старих приміщень шляхом ліквідації всіх наявних тріщин, нерівностей в кладці тощо. Такі заходи є економічно і енергетично витратними, але можливими для застосування.

Стосовно використання альтернативних джерел енергії, то не обхідно враховувати, що кожний з них може застосовуватися для певної кліматичної зони і буде ефективним лише за правильного вибору необхідної технології.

Вважаємо, що використання низькотемпературних джерел теплоти є найдоцільнішим зі всіх вище представлених заходів. Адже підвищення рентабельності тваринницьких комплексів з одночасним зниженням енергоемності одержуваної продукції можна досягти, провівши реконструкції існуючих систем опалення, взявши за основу теплові насоси, які використовують малу кількість електричної енергії для вироблення великої кількості теплової енергії для обігріву тварин (рис.1).

Для проведення експерименту вибрано телятник на 600 голів, віком до 4 місяців, вагою 200 кг (довжина – 92 м, ширина – 24 м, висота – 3,5 м) у ТОВ «Жива земля Потутори» Бережанського району Тернопільської області.

Якщо врахувати, що в даному господарстві вирощуються імпорتنі породи корів, які не пристосовані до кліматичних умов даної зони, то природно період адаптації буде тривалим і виробництво продукції скорочується.

Будь-який живий організм може бути представлений як енергетична система. За проведення дослідження ми врахували, що кожна енергетична

система повинна бути розроблена так, щоб за мінімальної витрати електричної енергії виконувалися необхідні функції. Кількість енергії, споживаної організмом, витрачається на його нормальне функціонування і на виробництво аграрної продукції. Тобто, частину енергії організм витрачає на обігрів. Чим нижче температура навколишнього середовища від необхідного значення, тим більше енергії він витрачає на підтримку її усередині свого тіла на потрібному рівні. Проте, якщо температура буде раціональною, то частину енергії свого організму тварині витратити не доведеться і вона буде перенаправлена на інші процеси [7].

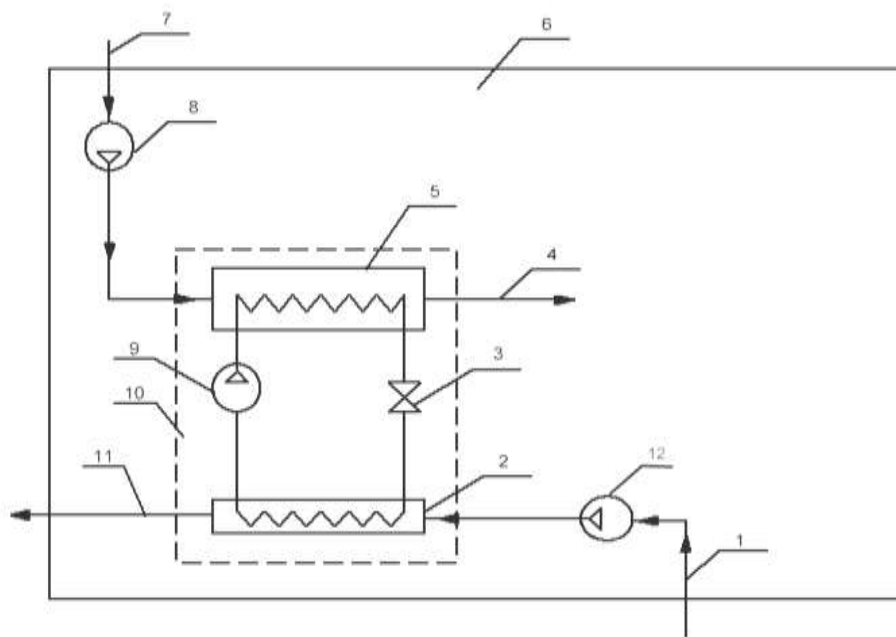


Рис.1. Схема теплового насоса в системі опалення телятника на 600 голів: 1 – подача зовнішнього повітря на випарник теплового насосу; 2 – випарник; 3 – дросельний вентиль; 4 – підігріте повітря, яке надходить в приміщення; 5 – конденсатор; 6 – тваринницьке приміщення; 7 – забір зовнішнього повітря для охолодження конденсатора теплового насосу; 8, 12 – вентилятор; 9 – компресор; 10 – тепловий насос; 11 – охолоджене повітря, що видаляється з випарника

Тепловий баланс ми розраховували, виходячи з умов забезпечення температурного режиму приміщення, з урахуванням обсягу надходження і витрати теплоти згідно відомих методик для найхолодніших місяців року. Тепловий баланс повинен бути позитивним. При цьому витрата теплоти в тваринницьких приміщеннях залежить від виду тварин, теплопровідності матеріалів будівлі і кліматичної зони розташування.

- Сумарні витрати теплоти $Q_{виптр}$ можна виразити рівнянням:

$$Q_{виптр.} = Q_{вент.} + Q_{випр.} + Q_{огор} + Q_{обдув}, \text{ ккал/год}, \quad (1)$$

де $Q_{вент}$ – витрати теплоти на зігрівання вентиляційного повітря;

$Q_{випр.}$ – витрати теплоти на випаровування вологи з поверхні підлоги і інших огорож;

$Q_{огор}$ – витрати теплоти через захисні конструкції;

$Q_{обдув}$, – витрати теплоти на обдування.

Теплоту, що надходить до приміщення описує формула:

$$Q_{припл} = Q_m + Q_{осв} + Q_{рад} - Q_{инф}, \text{ ккал/год}, \quad (2)$$

де Q_m - тепловиділення від тварин;

$Q_{осв}$ - тепловиділення від освітлювальних приладів;

$Q_{рад}$ - тепловиділення від сонячної радіації;

$Q_{инф}$ - тепловиділення від інфільтрації зовнішнього повітря.

За аналізу загального рівняння теплового балансу виявлено, що найбільші тепловтрати виникають через огорожувальні конструкції і вентиляцію залежно від зовнішньої температури. Ця залежність виявилася лінійною: чим нижче зовнішня температура, тим більші тепловтрати і нестача тепла, яке необхідно забезпечити.

У зв'язку з цим розрахунок теплового балансу проводимо у всьому діапазоні низьких (від'ємних) температур за трьома точками: за $t_H = 0^\circ\text{C}$; за $t_H = -22^\circ\text{C}$; (розрахункова температура згідно СНіП); за $t_H = -32^\circ\text{C}$.

Результати розрахунків зводимо у таблицю 2.

2. Результати розрахунку сільськогосподарського приміщення методом теплового балансу

Складові балансу	Тепловтрати за $t_H=15^\circ\text{C}$		
	0°C	-22°C	-32°C
	$\Delta t = 15^\circ\text{C}$	$\Delta t = 37^\circ\text{C}$	$\Delta t = 47^\circ\text{C}$
Втрати через огороження, ккал/год	44989,77	65648,98	77023,661
Втрати на вентиляцію, ккал/год	155388,794	222876,566	273120,452
Втрати на випаровування, ккал/год	9460,5	9460,5	9460,5
Втрати на обдування, ккал/год	1019,68	2039,36	3195
Загальні витрати, ккал/год	210858,744	300025,406	362799,613
Надходження тепла від тварин, ккал/год	238706,48	238706,48	238706,48
Загальне надходження тепла в приміщення, ккал/год	246250,84	246250,84	246250,84
Загальний баланс, ккал/год	35392,096	-53774,566	-116548,79

Зобразимо одержані дані графічно в залежності від температури навколишнього повітря (рис. 2).

Аналізуючи графік (рис. 2) можна оцінити динаміку необхідного введення теплової енергії в приміщення для підтримки необхідного теплового балансу залежно від температури зовнішнього повітря. Лінія 6 загального теплового балансу йде в негативний діапазон координат тільки після мінус 6°C . Виходячи з цього можна стверджувати, що в телятнику вистачає теплоти, яка виділяється тваринами і іншими пристроями, тільки до моменту зниження температури до вказаної величини. За температури зовнішнього повітря нижче мінус 6°C необхідно вводити додаткові теплові потужності.

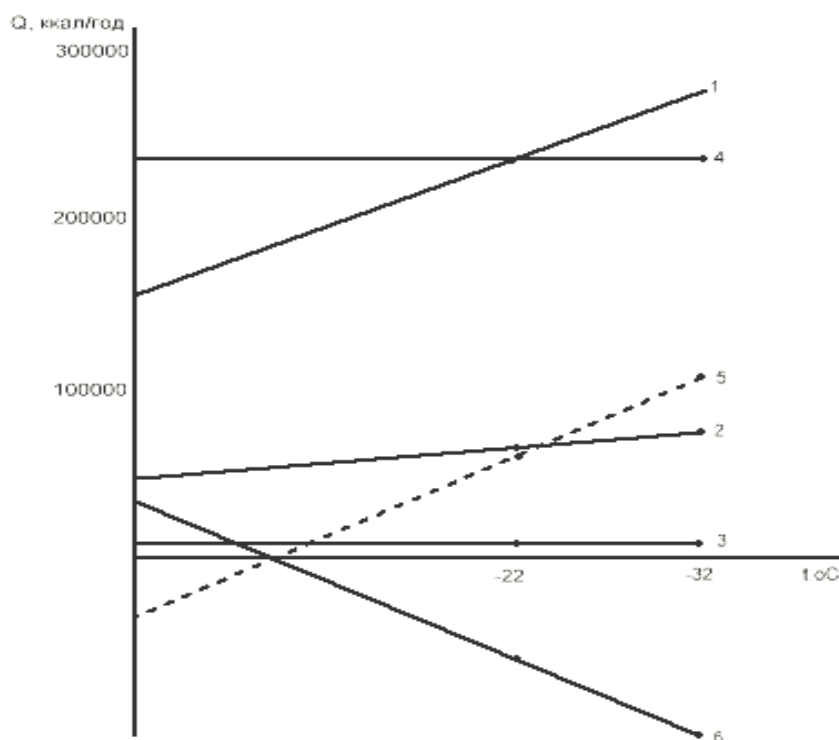


Рис. 2. Графік теплового балансу приміщення в залежності від температури навколишнього середовища: 1 - витрата теплоти на обігрів вентиляційного повітря; 2 – витрата теплоти через огорожувальні конструкції; 3 - витрата на випаровування вологи; 4 - тепловиділення тваринами; 5 – теплота, яка необхідна для опалення приміщення; 6 - загальний тепловий баланс

При цьому кількість теплоти, необхідну для опалення тваринницького приміщення, доцільно визначати з рівняння теплового балансу:

$$Q_{оп.} = Q_{випр} - Q_{припл}, \text{ ккал/год.} \quad (3)$$

Теплову потужність ми визначали за формулою:

$$P_{роз} = 4,18 \cdot Q_{оп.} / (3600 \cdot \eta_{оп}), \quad (4)$$

де $\eta_{оп}$ - к.к.д. опалювальної установки, $\eta_{оп} = 1$.

За визначеною тепловою потужністю можна вибрати 4 опалювально-вентиляційні установки типу СФОЦ -25/0,5-И1, потужністю 23,6 кВт або 4 повітряні теплові насоси типу PUNZ-HRP200YKA (табл.. 3), які легко можна поєднати з існуючою системою опалювання.

3. Технічна характеристика теплового насосу

Модель	Теплова потужність, кВт	Потужність охолодження, кВт	Напруга, В/фаза/Гц	Електрична потужність споживання, кВт	Коефіцієнт перетворення (COP)*	Шум, дБ
PUNZ-HRP200YKA	23	20	380/3/50	6,31	3,65	58

4. Порівняння експлуатаційних затрат за опалювальний сезон 4728 год.

Параметри	Електро-калорифер	Тепловий насос
Вхідна теплова потужність, кВт	4 x 23,6 = 94,4	4 x 23 = 92
Вартість одиниці електроенергії, грн/кВт	1,29	1,29
Електрична потужність споживання, кВт	4 x 23,6 = 94,4	4 x 6,31 = 25,24
Вартість енергії за 1 год роботи, грн	211,78	32,56
Споживання електроенергії за опалювальний сезон, кВт	446323,2	119334,72
Затрати на опалювальний сезон, грн	575756,93	153941,79

Порівняльний аналіз табл. 4 показав, що експлуатаційні затрати за опалювальний сезон в 3,7 раз нижчі за використання повітряного теплового насоса, чим традиційної опалювально-вентиляційної установки.

Висновки і перспективи. Тваринництво є унікальною галуззю, оскільки умови підтримання оптимального мікроклімату не однакові для всіх видів тварин і потрібно вводити додаткові теплові потужності в залежності від температури зовнішнього повітря, виду і віку тварин та їх утримання. Ефективного зниження енерговитрат (в 3,7 рази) в системах мікроклімату тваринницьких приміщень можна досягти за використання повітряного теплового насоса.

Умови функціонування повітряного теплового насоса визначаються з врахуванням одержаних закономірностей, що описують взаємозв'язок електроспоживання з параметрами зовнішнього повітря.

Список використаних джерел

1. Кузык, Б. Н. Россия – 2050: стратегия инновационного прорыва. – 2-е изд., доп./ Б. Н. Кузык, Ю. В. Яковец – Междунар. ин-т. П. Сорокина – Н. Кондратьева. – М.: ЗАО «Экономика», 2005. – 624 с.
2. Драганов, Б. Х. Теплотехника: Підручник / Б. Х. Драганов, А. А. Долінський, А. В. Міщенко, Є. М. Письменний – Київ: «ІНКОС». – 2005. – 504 с.
3. Горшков, В. Г. Тепловые насосы. Аналитический обзор /В. Г. Горшков// Справ. пром. оборудование. – 2004. - № 2. – С. 47-80.
4. Бочкарев, В. Н. Приобретенные иммунодефицитные состояния у КРС в зоне экологического неблагополучия / В. Н. Бочкарев, В. И. Иванов, И. И. Кузьменков, В. Г. Артеменко, Д. И. Яцюк //Ветеринарная патология.- М., 2003.- №2.- С.8-14.
5. Амерханов, Р. А. Решение задачи воздухообмена в животноводческом помещении: Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Тр. 3-й / Р. А. Амерханов, К. А. Гарькавый, И. В. Шевчук// Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной энергетике: материалы международной научно-техн. конф., 14-15 мая 2003 г., Москва, ГНУ ВИЭСХ. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2003. – Ч. 3. – С. 380-385.
6. Мартыновский, В. С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / под ред. В. М. Бродянского. – М.: Энергия, 1979. – 288 с.

7. Любимова, З. П. Оценка естественной резистентности крупного рогатого скота / З. П. Любимова, А. Н. Смирнова //Бюл. ВНИИРГЖ. -1987. №96. - С.29-33.

8. НТП 1-99. Нормы технологического проектирования предприятий крупного рогатого скота [Электронный ресурс] / Режим доступа: www.s-doc.ru/ntp-1-99.

References

1. Kuzyik, B. N., Yakovets, Yu. V. (2005) Rossiya – 2050: strategiya innovatsionnogo proryiva. [Russia – 2050: strategy of innovative breakthrough] – 2-e izd., dop./ – Mezhdunar. in-t. P. Sorokina – N. Kondrateva. ZAO «Ekonomika», 624.

2. Drahanov, B. Kh., Dolinskyi, A. A., Mishchenko, A. V., Pysmennyi, Ie. M. (2005) Teplotekhnika: Pidruchnyk [Heating engineering: Textbook]. «INKOS». 504.

3. Gorshkov, V. G. (2004) Teplovyye nasosy. Analiticheskiy obzor [Heat pumps. Analytical review]. Sprav. Prom. oborudovanie. 47-80.

4. Bochkarev, V. N., Ivanov, V. I., Kuzmenkov, I. I., Artemenko, V. G., Yatsyuk, D. I. (2003) Priobretennyye immunodefitsitnyye sostoyaniya u KRS v zone ekologicheskogo neblagopoluchiya [Acquired immunodeficiency in cattle in the zone of ecological trouble]. Veterinarnaya patologiya.- M., 8-14.

5. Amerhanov R.A., Garkavyy K.A., Shevchuk I.V. (2003) Reshenie zadachi vozduhoobmena v zhivotnovodcheskom pomeschenii: Energoobespechenie i energosberezhenie v selskom hozyaystve. [The solution of the problem of air in the livestock house: energy Supply and energy saving in agriculture]. GNU VIESH, 380-385.

6. Martynovskiy, V. S. (1979) Tsikly, shemy i harakteristiki termotransformatorov [Cycles, schemes and characteristics of thermotransformers]. Energiya, 288.

7. Lyubimova, Z. P., Smirnova, A. N. (1987) Otsenka estestvennoy rezistentnosti krupnogo rohatogo skota [Evaluation of natural resistance of cattle]. Byul. VNIIRGZh. 29-33.

8. НТП 1-99. Normy tehnologicheskogo proektirovaniya predpriyatiy krupnogo rohatogo skota [Norms of the technological planning of enterprises of cattle]. Available at: www.s-doc.ru/ntp-1-99.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЙ

С. В. Гайдукевич, Л. С. Колодийчук, М. В. Потапенко, Н. П. Семёнова

Аннотация. Проанализированы возможности использования тепловых насосов для повышения энергоэффективности систем отопления животноводческих помещений, на примере телятника на 600 голов. Проведен мониторинг затрат и поступления теплоты в зависимости от изменения теплового режима сельскохозяйственного помещения и окружающей среды и установлена зависимость между этими показателями. Составлен тепловой баланс объекта исследования и рассчитана тепловая нагрузка исходя из условий обеспечения температурного режима в зависимости от вида животных, теплопроводности ограждающих конструкций и климатической зоны

расположения. Установлено, что наибольшие теплопотери в телятнике возникают через ограждающие конструкции и вентиляцию в зависимости от внешней температуры. Вычислены основные технические характеристики теплового насоса и проведен их анализ.

Ключевые слова: *тепловой насос, теплонасосная система, система отопления, тепловая нагрузка*

INCREASE OF POWER EFFICIENCY OF THE SYSTEM OF HEATING OF STOCK-RAISING APARTMENTS.

S. V. Gaydukevich, L. S. Kolodiychuk, M. V. Potapenko, N. P. Semenova

Abstract. *Possibilities of the use of thermal pumps are analysed for the increase of power efficiency of the systems of heating of stock-raising apartments, on the example of calf-house on 600 heads. Monitoring of expense and receipt of warmth is conducted depending on the change of the thermal mode of agricultural apartment and environment and set dependence between these indexes. Thermal balance of object of research is made and expected the thermal loading coming the terms of providing of temperature condition from depending on the type of animals, heat conductivity of barriering constructions and climatic area of location. It is set that most thermal losses in a calf-house arise up through barriering constructions and ventilation depending on an external temperature. Basic technical descriptions of thermal are calculated to the pump and conducted their analysis.*

Keywords: *thermal pump, thermal pump system, system of heating, thermal loading*

УДК 621.3.067

ДОСЛІДЖЕННЯ НА МОДЕЛІ В MatLab СПЕКТРА ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ТА СТРУМУ ОДНОФАЗНОГО ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА ЗА РОБОТИ НА RL-НАВАНТАЖЕННЯ

І. М. ГОЛОДНИЙ, кандидат технічних наук, доцент

О. В. САНЧЕНКО, аспірант^{*}

**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**

E-mail: golodnyi@ukr.net

Анотація. *Сучасний асинхронний регульований електропривод базується на використанні напівпровідникових перетворювачів різних типів, дослідженню електромагнітних процесів в яких приділено мало*

^{*} Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент І. М. Голодний

© І. М. Голодний, О. В. Санченко, 2017

расположения. Установлено, что наибольшие теплопотери в телятнике возникают через ограждающие конструкции и вентиляцию в зависимости от внешней температуры. Вычислены основные технические характеристики теплового насоса и проведен их анализ.

Ключевые слова: *тепловой насос, теплонасосная система, система отопления, тепловая нагрузка*

INCREASE OF POWER EFFICIENCY OF THE SYSTEM OF HEATING OF STOCK-RAISING APARTMENTS.

S. V. Gaydukevich, L. S. Kolodiychuk, M. V. Potapenko, N. P. Semenova

Abstract. *Possibilities of the use of thermal pumps are analysed for the increase of power efficiency of the systems of heating of stock-raising apartments, on the example of calf-house on 600 heads. Monitoring of expense and receipt of warmth is conducted depending on the change of the thermal mode of agricultural apartment and environment and set dependence between these indexes. Thermal balance of object of research is made and expected the thermal loading coming the terms of providing of temperature condition from depending on the type of animals, heat conductivity of barriering constructions and climatic area of location. It is set that most thermal losses in a calf-house arise up through barriering constructions and ventilation depending on an external temperature. Basic technical descriptions of thermal are calculated to the pump and conducted their analysis.*

Keywords: *thermal pump, thermal pump system, system of heating, thermal loading*

УДК 621.3.067

ДОСЛІДЖЕННЯ НА МОДЕЛІ В MatLab СПЕКТРА ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ТА СТРУМУ ОДНОФАЗНОГО ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА ЗА РОБОТИ НА RL-НАВАНТАЖЕННЯ

І. М. ГОЛОДНИЙ, кандидат технічних наук, доцент

О. В. САНЧЕНКО, аспірант^{*}

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: golodnyi@ukr.net

Анотація. *Сучасний асинхронний регульований електропривод базується на використанні напівпровідникових перетворювачів різних типів, дослідженню електромагнітних процесів в яких приділено мало*

^{*} Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент І. М. Голодний

уваги. що пояснюється складністю чи високою вартістю їх проведення. З розвитком комп'ютерного моделювання з'явилась можливість поглибити дослідження даних процесів.

У роботі викладено результати досліджень електромагнітних процесів тиристорного регулятора напруги за допомогою комп'ютерного моделювання щодо зменшення часу і витрат.

Аналіз спектрального складу вихідної напруги напівпровідникових перетворювачів за обраного способу керування проводився з вико-
ристанням положень теорії електричних кіл синусоїдального і несинусоїдального періодичного струму та комп'ютерного моделювання в системі MatLab.

Для проведення аналізу характеристик однофазного тиристорного регулятора напруги з фазо-імпульсним керуванням розроблена в MatLab комп'ютерна модель, силове коло якої складається з джерела змінної напруги, двох тиристорів, з'єднаних зустрічно-паралельно та активно-індуктивного навантаження. Результати досліджень візуалізувалися за допомогою віртуальних вимірювальних приладів.

На створеній комп'ютерній моделі проведені дослідження гармонічного складу вихідної напруги та струму, а також отримана регулювальна характеристика регулятора, яка має нелінійну залежність. За зменшення кута відкривання α до 40° вихідна напруга тиристорного регулятора майже не змінюється, після 40° – напруга різко зменшується. Спектр вихідної напруги та струму вміщує всі непарні гармоніки. Коефіцієнт гармонік вихідної напруги та струму різко зростає за зниження вихідної напруги менше 100 В.

Результати досліджень придатні для використання за розробки однофазного тиристорного регулятора напруги для регульованого асинхронного електропривода.

Ключові слова: вищі гармоніки, напівпровідникові перетворювачі напруги, регулювальна характеристика, спектральний аналіз, форма кривої напруги

Актуальність. Для регульованого асинхронного електропривода часто використовують напівпровідникові перетворювачі напруги, зокрема, тиристорні регулятори [1], дослідженню гармонічного складу вихідної напруги і струму, інших робочих характеристик яких приділяється мало уваги в технічній літературі. Це пов'язано зі складністю чи високою вартістю проведення таких досліджень класичними методами. З розвитком комп'ютерного моделювання з'явилась можливість поглибити дослідження електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах напруги. Розробці вказаного напрямку і присвячена дана робота.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для малопотужних асинхронних двигунів з коротко-замкнутим ротором порівняно нескладно регулювати швидкість зміною напруги на статорі, оскільки вони мають м'яку механічну характеристику на робочій частині. Найбільш простими і дешевими для вказаного регулювання є регулятори амплітуди напруги живлення [1, 2].

Мета дослідження – зменшення часу і витрат за досліджень електромагнітних процесів тиристорного регулятора напруги за допомогою комп'ютерного моделювання.

Матеріали і методи дослідження. Аналіз спектрального складу вихідної напруги напівпровідникових перетворювачів за вибраного способу керування проводився з використанням положень теорії електричних кіл синусоїдального і несинусоїдального періодичного струму та комп'ютерного моделювання в системі MatLab [3].

Результати досліджень та їх обговорення. Для проведення аналізу характеристик однофазного тиристорного регулятора напруги із фазо-імпульсним керуванням розроблена його модель (рис. 1). Силowe коло перетворювача складається з джерела змінної напруги AC Voltage Source, двох тиристорів Thyristor і Thyristor 1, з'єднаних зустрічно-паралельно та активно-індуктивного навантаження Series RLC Branch.

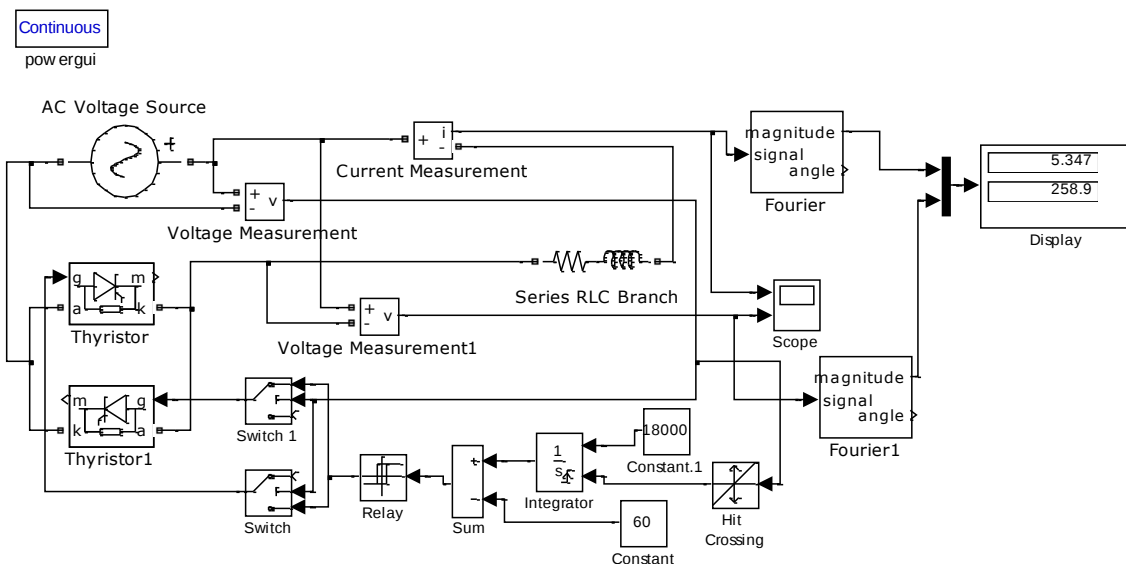


Рис. 1. Модель перетворювача напруги з фазо-імпульсним керуванням

Активний опір в навантаженні складає $R_{HAB} = 48$ Ом, індуктивність – $L_{HAB} = 0,0197$ Гн. Аналогічні значення має асинхронний двигун АИРП80-А6У2 приводу осьового вентилятора ВО-Ф-5,6А. Параметри однофазного джерела синусоїдальної напруги наступні: амплітуда напруги – 310 В; частота струму – 50 Гц.

Схема керування тиристорами складається з блоків Constant 1, Hit Crossing, Integrator, які реалізують генератор синхронізованої пилоподібної напруги. Цей генератор через узгоджуючий блок Voltage Measurement керується від мережі живлення AC Voltage Source. Блоки Sum і Relay реалізують формувач імпульсів, а блоки Switch, Switch 1 – розподільник імпульсів, сигнали яких надходять на керуючий вхід "g" тиристорів. Вказані блоки працюють так. Якщо сигнал керування, що подається на вхід, більший за сигнал порогового значення, то на вихід

блока надходить сигнал з першого (верхнього) входу. Якщо сигнал керування менший порогового значення, то на вихід блока буде надто- дити сигнал з другого (нижнього) входу. Блок Swich керує тиристором Thyristor, що пропускає позитивну півхвилю, блок Swich 1 – тиристором Thyristor 1, що пропускає негативну півхвилю джерела живлення.

Вхідний сигнал керування створюється блоком Constant, величина константи відповідає куту відкривання тиристора α . Від значення кута відкривання тиристорів залежить величина напруги на виході перетворювача.

В схемі керування тиристорами використано інтегруючий блок (Integrator) із зовнішнім скиданням сигналу до нульового значення. Порядок роботи Integrator наступний: вхідний постійний сигнал від блока Constant перетворюється інтегратором у лінійно змінний. За надходження сигналу від блока Hit Crossing (момент, коли синусоїда напруги джерела живлення має нульове значення) на порт зовнішнього скидання f інтегратора відбудеться скидання вихідного сигналу інтегратора до початкового нульового значення. В результаті на виході інтегратора формується пілкоподібний сигнал, синхронізований з синусоїдою напруги джерела живлення

Релейний блок Relay створює релейну нелінійність. Вихідний сигнал блока може приймати два значення. Одне з них відповідає ввімкненому стану реле, інше – вимкненому. Перехід від одного стану в інший відбувається стрибком за досягнення вхідним сигналом порогу вмикання або вимикання реле. Якщо пороги вмикання і вимикання реле мають різні значення, то блок реалізує релейну характеристику з гістерезисом. При цьому значення порогу вмикання більше, ніж значення порогу вимикання. Величина сигналу у ввімкненому стані дорівнює 1, а у вимкненому – 0.

Блоки Fourier і Fourier 1, які під'єднанні відповідно через узгоджуючі блоки Current Measurement і Voltage Measurement 1 призначені для вимірювання складових гармонік струму і напруги на виході регулятора, амплітудні значення яких виведені на Display. У вікні налаштування параметрів блоків Fourier і Fourier 1 вказують одиничну величину для вимірювання амплітуду першої гармоніки.

Блок Score призначений для вимірювання миттєвих значень струму і напруги на навантаженні.

Аналіз спектрального складу струму і напруг проводиться за допомогою блоку Score з використанням блоку Powergui.

На рис. 2 наведені форми кривих струму та напруги на навантаженні.

З рисунка видно, що за подачі керуючого сигналу на Thyristor позитивної півхвилі він відкривається, струм в результаті наявності індуктивності в навантаженні зростає не стрибком, а плавно. Причому, коли напруга фази, що живить тиристор, проходить через нуль, струм не зникає, а під дією ЕРС самоіндукції, яка створюється індуктивністю навантаження $L_{НАВ}$, продовжує протікати ще деякий час, переборюючи від'ємну напругу живлення фази. Тиристор закривається з деяким

запізненням, коли струм через нього досягає нульового значення. Величина ділянки зворотної напруги залежить від величини індуктивності в навантаженні. В результаті на ділянці від кута закривання Thyristor позитивної півхвилі до кута відкривання Thyristor 1 від'ємної півхвилі відбувається розрив струму в колі, або як його називають – переривистий режим. За зменшення кута відкривання α інтервал провідності одного тиристора може перекрити момент відкривання іншого тиристора, тобто настає режим непереривного струму. В такому випадку напруга на виході тиристорного регулятора стає рівною напрузі живлення.

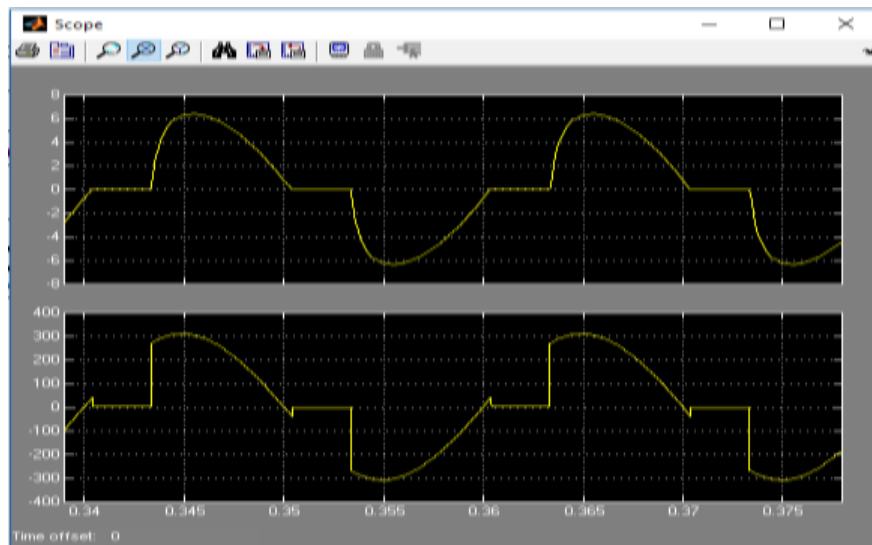


Рис. 2. Миттєві значення струму (верхня крива) і напруги (нижня крива) на навантаженні ($\alpha = 60^\circ$, $R_{HAB} = 48 \text{ Ом}$, $L_{HAB} = 0,0197 \text{ Гн}$)

Однією із важливих особливостей тиристорного регулятора напруги є його властивість регулювати значення вихідної напруги за зміни кута α . Залежність амплітуди основної гармоніки вихідної напруги від кута відкривання α наведена на рис. 3.

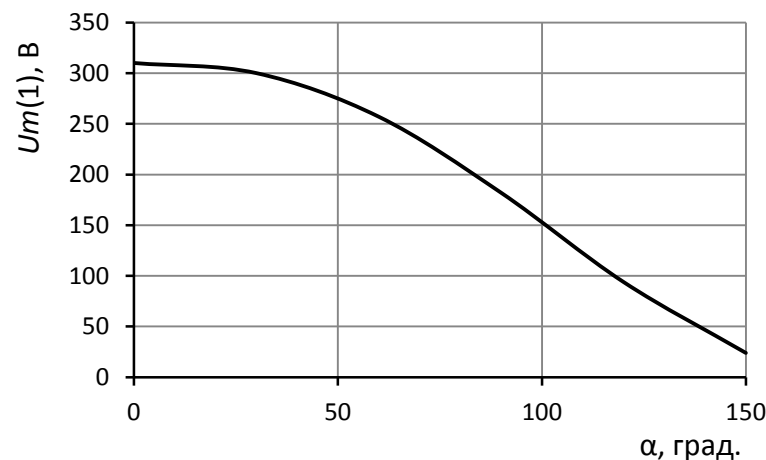


Рис. 3. Регульовальна характеристика тиристорного регулятора напруги

На ділянці за α від 0^0 до γ (γ – кут зяттявання закривання тиристора) вихідна напруга відповідає напрузі мережі, за $\alpha = 90 + \gamma$ вихідна напруга в два рази менша напруги живлення. За $\alpha = 180^0$ вихідна напруга дорівнює нулю.

Спектр вихідної напруги та струму, наведений на рис. 4, вміщує всі непарні гармоніки.

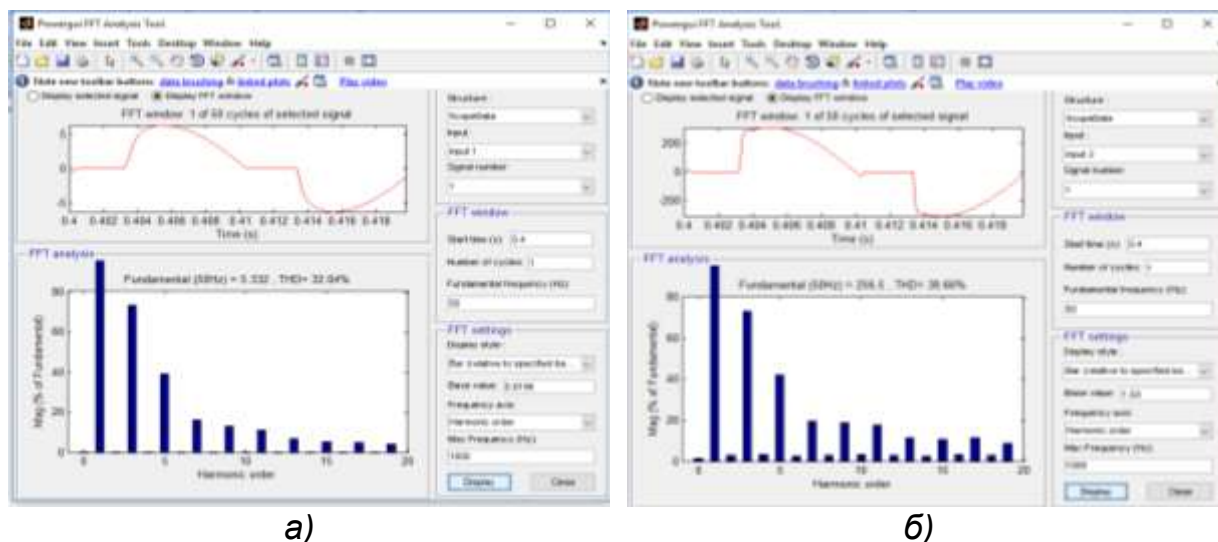


Рис. 4. Спектр струму (а) та напруги (б) однофазного тиристорного регулятора за $\alpha = 60^0$

На рис. 5 наведені залежності відносних амплітуд гармонік від вихідної напруги. З рисунка видно, що в процесі регулювання у разі зменшення вихідної напруги 3 гармоніка наближується до основної, що спотворює форму напруги і струму навантаження.

На рис. 6 наведена залежність коефіцієнта гармонік (THD – Total Harmonic Distorsion) напруги та струму на навантаженні від вихідної напруги. Із залежності видно, що у разі зниження вихідної напруги менше 100 В різко зростає коефіцієнт гармонік.

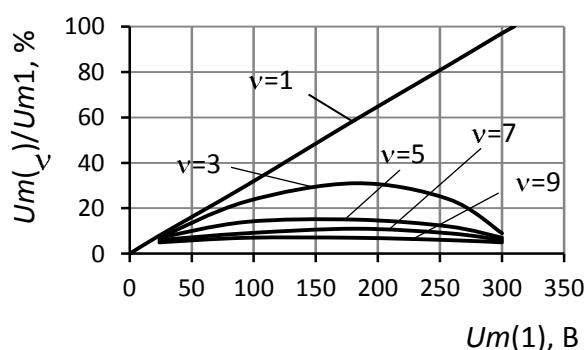


Рис. 5. Гармонічний склад вихідної напруги тиристорного регулятора

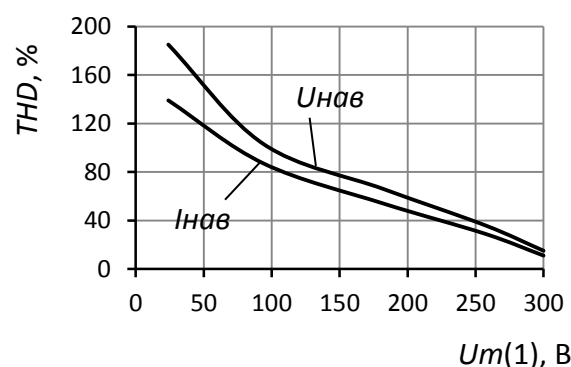


Рис. 6. Залежність THD від вихідної напруги регулятора

Висновки і перспективи. Дослідженнями встановлено, що тиристор закривається з деяким запізненням, коли струм через нього досягає нульового значення. Величина ділянки зворотної напруги залежить від величини індуктивності в навантаженні.

Регульовальна характеристика має нелінійну залежність, у разі зменшення кута відкривання α до 40° вихідна напруга тиристорного регулятора майже не змінюється, після 40° – напруга різко зменшується.

Спектр вихідної напруги та струму вміщує всі непарні гармоніки

Коефіцієнт гармонік вихідної напруги та струму різко зростає у разі зниження вихідної напруги менше 100 В.

Результати досліджень придатні для використання за розробки однофазного тиристорного регулятора напруги для регульованого асинхронного електропривода.

Список використаних джерел

1. Регульований електропривод: підручник для студ. вищ. навч. закладів / за ред. І. М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с.
2. Глазенко, Т. А. Полупроводниковые системы импульсного асинхронного электропривода малой мощности / Т. А. Глазенко, В. И. Хрисанов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. – 170 с.
3. Герман-Галкин, С. Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК: учебное пособие для студ. вузов / С. Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2002. – 304 с.

References

1. Golodnyi, I. M. ed. (2015) Adjustable Electric [Regulovanyi elektropyvod]. "ZP "Kompriynt", 509.
2. Glazenko, T. A., Khrisanov, V. I. (1983) The semiconductor system of low power asynchronous electric pulse [Napivprovodnykovi systemy impulsnoho asynkhronnoho elektropyvodv maloiu potuzhnosti]. Energoatomisdat, Leningrad. dep-tion., 170.
3. German-Galkin, S. G. (2002) Power Electronics: Laboratory work on the PC: [Sylova elektronika: laboratorni roboty na PK]. Petersburg: CROWN print, 304.

ИССЛЕДОВАНИЕ НА МОДЕЛИ В MatLab СПЕКТРА ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА ОДНОФАЗНОГО ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА, РАБОТАЮЩЕГО НА RL-НАГРУЗКУ

И. М. Голодный, О. В. Санченко

Аннотация. Современный асинхронный регулируемый электропривод базируется на использовании полупроводниковых преобразователей различных типов, для которых мало уделено внимания исследованиям электромагнитных процессов. Это связано с сложностью или высокой стоимостью проведения таких исследований.

С развитием компьютерного моделирования появилась возможность углубить исследования данных процессов.

Целью работы является уменьшение времени и расходов на исследования электромагнитных процессов тиристорного регулятора напряжения при помощи компьютерного моделирования.

Анализ спектрального состава выходного напряжения полупроводниковых преобразователей проводился с использованием положений теории электрических цепей синусоидального и несинусоидального периодического тока и компьютерного моделирования в системе MatLab.

Для проведения анализа характеристик однофазного тиристорного регулятора напряжения с фазоимпульсным управлением разработана в MatLab компьютерная модель, силовая часть которой состоит из источника переменного напряжения, двух тиристоров, соединенных встречно-параллельной и активно-индуктивной нагрузки. Результаты исследований визуализировались с помощью виртуальных измерительных приборов.

На созданной компьютерной модели проведены исследования гармонического состава выходного напряжения и тока, а также получена регулировочная характеристика регулятора.

Регулировочная характеристика имеет нелинейную зависимость, при уменьшении угла открывания α до 40° выходное напряжение регулятора изменяется незначительно, после 40° – напряжение резко уменьшается. Спектр выходного напряжения и тока содержит все нечетные гармоники. Коэффициент гармоник выходного напряжения и тока резко возрастает при снижении выходного напряжения ниже 100 В.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке однофазного тиристорного регулятора напряжения для регулируемого асинхронного электропривода.

Ключевые слова: высшие гармоники, полупроводниковые преобразователи напряжения, регулировочная характеристика, спектральный анализ, форма кривой напряжения

STUDY ON SPECTRUM MODEL IN MatLab OUTPUT VOLTAGE AND CURRENT SINGLE PHASE THYRISTOR FUELLED BY RL-LOAD

I. Golodnyi, A. Sanchenko

Abstract. Modern adjustable asynchronous electric drive is based on the use of semiconductor converters of various types, for which little attention is paid to the research of electromagnetic processes. This is due to the complexity or high cost of such research. With the development of computer modeling an opportunity to deepen the study of these processes has appeared.

The aim of this work is to reduce the time and costs for research of electromagnetic processes of thyristor voltage regulator with the help of computer simulation.

The materials and methods of research. Analysis of the spectral composition of the output voltage of semiconductor converters for the selected control method was carried out using the provisions of the theory of electrical circuits with sinusoidal and non-sinusoidal periodic current and computer simulations in MatLab system.

The results of the research. For analysing the characteristics of single-phase thyristor voltage regulator with phase-pulse control of a computer model in MatLab was developed, power circuit of which consists of a source of alternating current, two thyristors connected in anti-parallel and active-inductive load. The results of the research were visualized with the use of virtual instrumentation.

On the created computer model of the investigations of the harmonic composition of output voltage and current were conducted, and regulated characteristic of the regulator was achieved.

Conclusion and perspectives. Control characteristic has a nonlinear dependence, with a decrease of the opening angle α до 40° the output voltage of the thyristor regulator is almost unchanged, after 40° voltage decreases sharply. Spectrum of output voltage and current contains all odd harmonics. Harmonic coefficient of voltage and current increases abruptly with lowering the output voltage less than 100 V.

The results of investigations can be used in the development of single-phase thyristor voltage regulator for the controlled asynchronous electric drive.

*Keywords: the computer model, harmonics, voltage converters semiconductor, **spectral analysis**, waveform voltage*

УДК 37: 004

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА МАТЛАВ ЗА ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ДИСЦИПЛІН

В. Ю. РАМШ, кандидат технічних наук, доцент

М. В. ПОТАПЕНКО, старший викладач

Н .П. СЕМЕНОВА, старший викладач

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

E-mail: m.potapenko@i.ua

О. О .СЕМЕНОВ, викладач

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний коледж»

E-mail: semenov@kolege.bati.ber.te.ua

Анотація. Розглянуто питання удосконалення навчального процесу шляхом впровадження інформаційних технологій. Доцільним є

© В. Ю. Рамш, М. В. Потапенко,
Н .П. Семенова, О. О .Семенов, 2017

The materials and methods of research. Analysis of the spectral composition of the output voltage of semiconductor converters for the selected control method was carried out using the provisions of the theory of electrical circuits with sinusoidal and non-sinusoidal periodic current and computer simulations in MatLab system.

The results of the research. For analysing the characteristics of single-phase thyristor voltage regulator with phase-pulse control of a computer model in MatLab was developed, power circuit of which consists of a source of alternating current, two thyristors connected in anti-parallel and active-inductive load. The results of the research were visualized with the use of virtual instrumentation.

On the created computer model of the investigations of the harmonic composition of output voltage and current were conducted, and regulated characteristic of the regulator was achieved.

Conclusion and perspectives. Control characteristic has a nonlinear dependence, with a decrease of the opening angle α до 40° the output voltage of the thyristor regulator is almost unchanged, after 40° voltage decreases sharply. Spectrum of output voltage and current contains all odd harmonics. Harmonic coefficient of voltage and current increases abruptly with lowering the output voltage less than 100 V.

The results of investigations can be used in the development of single-phase thyristor voltage regulator for the controlled asynchronous electric drive.

*Keywords: the computer model, harmonics, voltage converters semiconductor, **spectral analysis**, waveform voltage*

УДК 37: 004

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА MATLAB ЗА ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ДИСЦИПЛІН

В. Ю. РАМШ, кандидат технічних наук, доцент

М. В. ПОТАПЕНКО, старший викладач

Н .П. СЕМЕНОВА, старший викладач

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

E-mail: m.potapenko@i.ua

О. О .СЕМЕНОВ, викладач

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний коледж»

E-mail: semenov@kolege.bati.ber.te.ua

Анотація. Розглянуто питання удосконалення навчального процесу шляхом впровадження інформаційних технологій. Доцільним є

© В. Ю. Рамш, М. В. Потапенко,
Н .П. Семенова, О. О .Семенов, 2017

використання готових програмних продуктів за вивчення спеціальних електротехнічних дисциплін з розробкою комплексу задач для конкретного навчального предмета.

Обґрунтовано ефективність та результативність виконання програмного пакета MatLab під час проведення лабораторних занять з навчального курсу «Основи автоматики».

Ключові слова: *навчальна дисципліна, лабораторне заняття, пакет прикладних програм*

Актуальність. Стрімке збільшення обсягів матеріалу до вивчення з одночасними тенденціями щодо зменшення аудиторного часу на його опрацювання вимагає пошуку резервів для інтенсифікації навчального процесу, одним із засобів інтенсифікації якого є впровадження сучасних технологій навчання, пов'язаних із використанням комп'ютерної техніки. Широке застосування в навчальному процесі нових інформаційних технологій є характерною рисою сучасної вищої освіти. Динаміка зміни інформаційних технологій вимагає від викладачів і студентів швидкої адаптації до змін, що відбуваються.

Із загальної практики застосування комп'ютерної техніки в навчальному процесі можна виділити найбільш пріоритетні напрями: демонстрація наочного матеріалу та моделювання процесів і явищ.

Останній є найбільш важливим під час проведення лабораторних занять зі спеціальних електротехнічних дисциплін, оскільки дає змогу застосовувати не лише ілюстративну функцію комп'ютерної техніки, але й доповнити заняття віртуальними експериментами, проведення яких у реальних умовах часто є утрудненим у зв'язку з нестачею лабораторного обладнання та приладового забезпечення, а також дасть змогу засвоїти студентам більший обсяг навчального матеріалу.

Однак, для створення спеціалізованих комп'ютерних програм з навчальної дисципліни необхідні висококваліфіковані програмісти, а також значні часові і матеріальні ресурси. Тому доцільним є використання готових програмних продуктів з розробкою комплексу задач для конкретного навчального предмета.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різномасштабному вивченню питання застосування інформаційних технологій у навчальному процесі присвячено праці: В. Беспалька, М. Голованя, А. Єршова, Д. Матрос, І. Роберт та ін.

Однак, не дивлячись на це, необхідно відмітити, що рівень використання інформаційних технологій залишається достатньо низьким і їх можливості використовуються не в повному об'ємі.

Застосування різноманітних математичних пакетів у навчальному процесі вищої школи розглядають С. Дяченко, Є. Кліменко, М. Лапчик, Т. Ніренбург, В. Новіков, А. Черняк та ін. Проте залишається невирішеним питання вибору програмного забезпечення для підтримки навчальних дисциплін певного циклу.

Мета дослідження – обґрунтувати ефективність використання пакета прикладних програм MatLab у процесі проведення лабораторних занять з навчальної дисципліни “Основи автоматики”.

Матеріали і методи дослідження. У вищих навчальних закладах лабораторні заняття призначені для поглибленого вивчення науково-теоретичних основ дисципліни та засвоєння сучасних методів із застосуванням технічних засобів комп’ютерної техніки.

Лабораторне заняття є формою навчального заняття, під час якого студент під керівництвом викладача особисто проводить натурні або імітаційні експерименти чи досліді з метою практичного підтвердження окремих теоретичних положень навчальної дисципліни, набуває практичних навичок роботи з лабораторним устаткуванням, обладнанням, обчислювальною технікою, вимірювальною апаратурою, методикою експериментальних досліджень у конкретній предметній галузі. Завдяки лабораторним роботам студенти краще засвоюють матеріал, водночас, розрахунки і абстрактні вирази стають більш конкретними.

Основними завданнями дисципліни “Основи автоматики” є дослідження статичних і динамічних характеристик елементів і систем автоматики. Лабораторне заняття із даного курсу включає проведення поточного контролю підготовленості студентів до виконання лабораторної роботи, виконання лабораторного дослідження, оформлення індивідуального звіту з виконаної роботи та його захист перед викладачем.

Результати дослідження та їх обговорення. Найбільш ефективно проводяться лабораторні роботи з використанням пакетів прикладних програм, за допомогою яких забезпечується формування завдань для проведення досліджень елементів чи систем автоматики, моделювання та управління процесом, перевірка якості роботи автоматичної системи. За використання засобів моделювання, для студентів створюються умови, за яких вони не хвилюються за можливі невдалі експериментування.

Необхідність застосування прикладних пакетів для моделювання в навчальному процесі визначаються такими факторами [6]:

- високою інтенсивністю навчального процесу;
- вимогами щодо підвищення інформативності занять;
- нестачею аудиторного навчального часу на написання складних програм;
- вимогами варіативності типових задач, що розв’язуються;
- простотою символічного, чисельного чи графічного розв’язування задач.

На основі досвіду проведення занять з використанням комп’ютерної техніки за підготовки студентів можна виділити такі етапи:

- засвоєння студентами основ роботи з програмним продуктом;
- розвиток навичок комп’ютерного моделювання;
- набуття студентами навичок самостійного вибору алгоритму проектування для рішення поставлених завдань.

Алгоритм виконання лабораторних робіт буде різнитися, якщо застосовувати різноманітні математичні пакети у силу специфіки роботи з ними.

Найбільш універсальними засобами для моделювання є пакети прикладних програм MatLab, Mathcad, Mathematica, Eureka, Derive, Maple та ін [1].

Ефективність застосування пакетів для комп'ютерного моделювання оцінюють критеріями обчислювальної математики, основними з яких є універсальність, мова моделювання, зручність застосування та єдність підходу до постановки і розв'язання прикладних задач.

Оцінюючи за допомогою цих критеріїв прикладні програми, що застосовуються для моделювання, однозначно, за вивчення дисципліни "Основи автоматики" пріоритет можна віддати пакету прикладних програм MatLab.

MatLab (скор. від англ. "Matrix Laboratory") – термін, який відноситься до пакета прикладних програм для вирішення інженерно-технічних задач, а також до мови програмування, яка застосовується в цьому прикладному пакеті.

Як мова програмування MatLab був розроблений деканом факультету комп'ютерних наук університету Нью-Мексико Клівом Моулером в кінці 70-х років XX ст. Він, разом з інженером Джоном Літллом та Стівеном Бенгертом переписали бібліотеку MatLab на C та в 1984 р. заснували фірму The MathWorks, яка є розробником програмного продукту MatLab.

Програмний продукт MatLab є об'єднанням математичного ядра, що включає мову програмування високого рівня, бібліотеки стандартних функцій, графічного інтерфейсу користувача і довідникової системи, дозволяє проводити математичні розрахунки, складання алгоритмів і програм, моделювання, аналіз даних, дослідження, візуалізацію, наукову і інженерну графіку [2].

MatLab є високоефективним засобом для розв'язання широкого спектра обчислювальних задач і моделювання технологічних процесів. Водночас, пакет є доступним для студентів, оскільки виконання великого числа операцій потребує лише знань, що відповідають певній дисципліні.

MatLab може застосовуватися для основних платформ: Windows, Mac OS чи Linux/Unix.

У MatLab вбудовані інструментальні пакети (Toolbox) розширень із додатковими функціями для їх використання під час розв'язання спеціалізованих задач. За інсталяції MatLab користувач може вибірково завантажити необхідні йому інструментальні пакети.

Зокрема Simulink – інтерактивний інструмент для моделювання, імітації й аналізу динамічних систем. Він дає можливість будувати графічні блок-діаграми, імітувати динамічні системи, досліджувати працездатність систем й удосконалювати проекти. Simulink повністю інтегрований з MatLab, що забезпечує негайний доступ до широкого спектру інструментів аналізу й проектування. Simulink також інтегрується з

Stateflow для моделювання поведінки системи викликані подіями. Ці переваги роблять Simulink найбільш популярним інструментом для проектування систем керування і комунікації, цифрової обробки й інших додатків моделювання.

Simulink має повний комплект бібліотечних блоків, необхідних для створення моделі: пристрої відображення і генератори сигналів, дискретні, лінійні і нелінійні компоненти і блоки з'єднань [5].

Blocksets – набори спеціалізованих блоків, що розширюють можливості застосування Simulink. Їх використання дає змогу моделювання складні механічні системи, системи гідро-, пневмо- й електроавтоматики. За вивчення даної дисципліни найбільш корисним є спеціалізований інструментальний пакет Power System Blockset, який служить для моделювання енергетичних (силових) систем і пристроїв – від простих електричних кіл постійного і змінного струму до складних ліній електропередач великої потужності, перетворювальних пристроїв на сучасній елементній базі і електричних машин із системами керування.

У разі побудови моделей використовується метод “click and drag” (“клацни і тягни”), який дозволяє легко створювати графічні представлення моделей у вигляді звичних для енергетиків блок-схем.

Можливості інструментального пакета Power System Blockset, перш за все, визначаються компонентами, які входять до його бібліотек.

Бібліотеки пакета Power System Blockset вміщують достатньо представницькі набори компонентів, на основі яких будується графічна модель системи.

До складу Power System Blockset входять наступні бібліотеки:

- Electrical Sources – джерела електричної енергії та сигналів;
- Elements – лінійні і нелінійні компоненти електричних пристроїв;
- Power Electronics – пристрої енергетичної електроніки;
- Machines – електричні машини;
- Connectors – підключаючі пристрої;
- Measurements – вимірювальні і контролюючі пристрої;
- Powering Extras – спеціальні енергетичні пристрої;
- Demos – приклади моделювання енергетичних пристроїв.

Їх застосування дозволяє створювати моделі різноманітних енергетичних установок і виконувати їх моделювання в режимі роботи віртуальних пристроїв, що дає наглядне уявлення про роботу реальних систем.

Навчально-методичне забезпечення лабораторних занять з курсу “Основи автоматики” у ВП НУБіП України “Бережанський агротехнічний інститут” орієнтоване на використання пакета MatLab.

Застосування MatLab та спеціалізованих вбудованих інструментальних пакетів Simulink і Power System Blockset дозволяють частково замінити реальний експеримент та виконувати наступні лабораторні роботи:

1. Дослідження перехідних характеристик типових динамічних ланок.
2. Дослідження частотних характеристик типових динамічних ланок.
3. Дослідження властивостей і визначення характеристик об'єктів керування.
4. Аналіз динамічних характеристик систем автоматичного керування з параметрами технологічних процесів.
5. Дослідження перехідних процесів лінійної автоматичної системи у разі зміни коефіцієнта передачі системи, для об'єктів із запізненням.
6. Дослідження амплітудно-фазочастотної характеристики (АФЧХ) лінійної автоматичної системи за зміни коефіцієнта передачі системи.
7. Дослідження стійкості лінійних автоматичних систем за допомогою АФЧХ. Визначення запасів стійкості.
8. Дослідження якості роботи лінійних автоматичних систем за дії випадкових збурень.
9. Дослідження видів руху нелінійних автоматичних систем.
10. Визначення параметрів автоколивань у нелінійних системах за допомогою методу гармонічної лінеаризації.

Спостереження за студентами показали, що використання MatLab для моделювання під час виконання лабораторних робіт забезпечує розвиток у студентів ініціативи і самостійності, відповідальності та інтересу до навчальної дисципліни в цілому, сприяє формуванню потреб мотиваційної сфери особистості майбутнього інженера-енергетика.

Водночас, слід відмітити, що не існує систем без недоліків. У MatLab погано моделюються деякі нетипові процеси, складно проводити вимірювання за частотного регулювання, оскільки всі вимірники налаштовуються на певні частоти. Тому будь-який математичний пакет, навіть найсучасніший, не може повністю замінити реальний експеримент.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У результаті проведених досліджень виявлено, що використання пакета прикладних програм MatLab під час лабораторних занять дає змогу активізувати навчально-пізнавальну діяльність студентів, сприяє розвитку творчих здібностей і навичок здійснення дослідницької діяльності, а можливість проведення комп'ютерних експериментів дозволяє організувати подання матеріалу з використанням елементів проблемного навчання, дослідницьких підходів у навчанні.

Список використаних джерел

1. Використання інформаційно-комунікаційних технологій при вивченні фахових електротехнічних дисциплін / В. Г. Подобайло, М. В. Потапенко, С. В. Гайдукевич, Н. П. Семенова // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2015. – Вип. 209, ч. 1. – С. 281–287.
2. Дьяконов, В. П. MATLAB: учебный курс / В. П. Дьяконов. – С. Пб.: «Питер», 2000. – 560 с.

3. Лабораторний практикум з дисципліни “Основи автоматики”. Частина II. / П. Б. Клендій, М. В. Потапенко, Г. Я. Клендій, В. Ю. Рамш – Бережани, НВДЦ “Нововведення”, 2016 – 76 с.

4. Машбиц, Е. И. Психолого-педагогические проблемы компьютеризации обучения / Е. И. Машбиц. – М. : Педагогика, 1988. – 192 с

5. Потемкин, В. Г. MATLAB / В. Г. Потемкин. – М: Диалог-МИФИ, 1998. – 452 с.

6. Роберт, И. В. Современные информационные технологии в образовании / И. В. Роберт. – М.: Школа – Пресс, 1994. – 187 с.

References

1. Podobailo, V. H., Potapenko, M. V., Haidukevych, S. V., Semenova, N. P. (2015). Vykorystannia informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii pry vyvchenni fakhovykh elektrotekhnichnykh dystsyplin [The use of information and communication technologies in the study of professional electrical courses] Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriya «Tekhnika ta enerhetyka APK», 209 (1), 281–287.

2. D'yakonov, V. P. (2000). MATLAB: Uchebnyy kurs [MATLAB: Training course]. S. Pb., “Piter”, 560.

3. Klendii, P. B., Potapenko, M. V., Klendii, H. Ia. , Ramsh, V. Iu. (2016). Laboratornyi praktykum z dystsypliny “Osnovy avtomatyky”. Chastyna II. [Laboratory workshop on the subject “Fundamentals of automation.” Part II.]. Berezhany, NVDTs “Novovvedennia”, 76.

4. Mashbits, E. I. (1988). Psikhologo-pedagogicheskiye problemy komp'yuterizatsii obucheniya [Psychological and pedagogical problems of computerization of education]. Moscow, Pedagogika, 192.

5. Potemkin, V. G. (1998). MATLAB. Moscow, Dialog-MIFI, 452.

6. Robert, I. V. (1994). Sovremennyye informatsionnyye tekhnologi v obrazovanii [Modern information technologies in education]. Moscow, Shkola – Press, 187.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ MATLAB ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ

В .Ю. Рамш, Н. В. Потапенко, Н. П. Семенова, А. А. Семенов

Аннотация. *Рассмотрен вопрос усовершенствования учебного процесса путем внедрения информационных технологий. Целесообразным является использование готовых программных продуктов при изучении специальных электротехнических дисциплин с разработкой комплекса задач для конкретного учебного предмета.*

Обоснована эффективность и результативность использования программного пакета MatLab при проведении лабораторных занятий учебного курса “Основы автоматики”.

Ключевые слова: *учебная дисциплина, лабораторное занятие, пакет прикладных программ*

EFFICIENCY OF APPLICATION OF SOFTWARE ENVIRONMENT MATLAB DURING REALIZATION OF LABORATORY WORKS FROM ELECTRICAL ENGINEERING DISCIPLINES

V. Y. Ramsh, M. V. Potapenko, N. P. Semenova, O. O. Semenov

Abstract. *The problems of improving the educational process through the introduction of information technologies. Expedient is using of the prepared software products for the study of the special electrical engineering disciplines with development of complex of tasks for a certain educational object. Efficiency and effectiveness of the use of programmatic package of MatLab are reasonable during realization of laboratory employments after the educational course of "Basis of automation".*

Keywords: *educational discipline, laboratory employment, application package*

УДК 631.3:621.1

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА МІСЦЕВИХ ОПОРІВ ЗА НАПІРНОГО РУХУ РІДИНИ

В. Є. ВАСИЛЕНКОВ, кандидат технічних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: wasil14@ukr.net

Анотація. *В системі водопостачання сільськогосподарських об'єктів розрахунок водопровідної мережі є важливою технологічною операцією. Складність і різноманітність факторів, що обумовлюють рух рідин, у більшості випадків, не дозволяють одержати чіткого теоретичного рішення для різних видів течії в залежності від виду місцевого опору. Тому важливою проблемою є пошук і обґрунтування шляхів підвищення ефективності методів визначення місцевих втрат напору.*

У статті наведено результати дослідження щодо визначення зменшення втрат напору за рахунок змінювання коефіцієнта втрат напору на місцевих опорах.

Теоретична складова досліджень руху рідини в напірному трубопроводі з різними видами місцевих опорів здійснювалась із застосуванням елементів гідродинаміки, які базуються на рівнянні Д. Бернуллі. Експериментальні дослідження проводились на спеціально розробленому стенді.

Результати дослідження показали, що одним із перспективних напрямів розвитку системи водопостачання є визначення

© В. Є. Василенков, 2017

EFFICIENCY OF APPLICATION OF SOFTWARE ENVIRONMENT MATLAB DURING REALIZATION OF LABORATORY WORKS FROM ELECTRICAL ENGINEERING DISCIPLINES

V. Y. Ramsh, M. V. Potapenko, N. P. Semenova, O. O. Semenov

Abstract. *The problems of improving the educational process through the introduction of information technologies. Expedient is using of the prepared software products for the study of the special electrical engineering disciplines with development of complex of tasks for a certain educational object. Efficiency and effectiveness of the use of programmatic package of MatLab are reasonable during realization of laboratory employments after the educational course of "Basis of automation".*

Keywords: *educational discipline, laboratory employment, application package*

УДК 631.3:621.1

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА МІСЦЕВИХ ОПОРІВ ЗА НАПІРНОГО РУХУ РІДИНИ

В. Є. ВАСИЛЕНКОВ, кандидат технічних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: wasil14@ukr.net

Анотація. *В системі водопостачання сільськогосподарських об'єктів розрахунок водопровідної мережі є важливою технологічною операцією. Складність і різноманітність факторів, що обумовлюють рух рідин, у більшості випадків, не дозволяють одержати чіткого теоретичного рішення для різних видів течії в залежності від виду місцевого опору. Тому важливою проблемою є пошук і обґрунтування шляхів підвищення ефективності методів визначення місцевих втрат напору.*

У статті наведено результати дослідження щодо визначення зменшення втрат напору за рахунок змінювання коефіцієнта втрат напору на місцевих опорах.

Теоретична складова досліджень руху рідини в напірному трубопроводі з різними видами місцевих опорів здійснювалась із застосуванням елементів гідродинаміки, які базуються на рівнянні Д. Бернуллі. Експериментальні дослідження проводились на спеціально розробленому стенді.

Результати дослідження показали, що одним із перспективних напрямів розвитку системи водопостачання є визначення

© В. Є. Василенков, 2017

енергетичних характеристик потоку рідини із застосуванням рівняння Д. Бернуллі, проведений аналіз руху рідини на різних видах місцевого опору на експериментальній установці дозволив зв'язувати методичні підходи до визначення коефіцієнтів місцевих опорів. Результати аналітичного дослідження є підґрунтям для розрахунку місцевих втрат напору на кожній ділянці трубопроводу, що має забезпечити підвищення економічної ефективності системи водопостачання на 10 – 15 %.

Ключові слова: *рух рідини, втрати напору, тиск, напірний трубопровід, коефіцієнт місцевих опорів*

Актуальність. Розрахунок водопровідної мережі є важливою технологічною операцією в системі водопостачання сільськогосподарських об'єктів [1-4]. Важливою операцією за розрахунку водопровідної мережі є знаходження втрат напору на кожній ділянці трубопроводу. При цьому дані втрати складаються із втрат напору за довжиною трубопроводу і місцевих втрат напору. На сьогодні для інтенсифікації процесу знаходження повних втрат напору визначають тільки втрати за довжиною трубопроводу, а місцеві втрати визначають за допомогою коефіцієнта, який враховує втрати напору в місцевих опорах трубопроводу за рахунок збільшення на 10 – 15 % втрати за довжиною трубопроводу. Складність і різноманітність факторів, що обумовлюють рух рідин, у більшості випадків не дозволяють одержати чіткого теоретичного рішення для різних видів течії в залежності від виду місцевого опору. Тому важливою проблемою є пошук і обґрунтування шляхів підвищення ефективності методів визначення місцевих втрат напору за рахунок поєднання теоретичних основ гідравліки з постановкою гідравлічних експериментів, що підвищить техніко-економічні показники системи водопостачання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Низька якість проектних і будівельно-монтажних робіт системи водопостачання призводять до перевитрати електроенергії і капіталовкладень на 20-30%. Неправильний підбір і установка насосного обладнання призводять до перевитрати електроенергії до 30%, скорочення терміну служби насосів в 1,5-2 рази. Відсутність технологій і технічних засобів управління та захисту машинних систем для видобутку та транспортування вод, відсутність обліку та контролю подачі та споживання води – до втрат більше 30% води і перевитрати електроенергії [1].

На практиці системи трубопроводів складаються з окремих ділянок, часто різних за діаметрами, з'єднаних поміж собою трійниками, відводами і т. п. Крім того, в систему можуть включатись клапани різних конструкцій, засувки та інша арматура. На ділянках, де змінюється діаметр трубопроводу, різкого повороту, а також встановлення будь-якої арматури відбуваються додаткові втрати напору. Вони обумовлені різкою зміною величини або напрямку середньої швидкості і зветься втратами напору на місцевих опорах [4]. Кількісне визначення втрат напору на місцевих опорах є однією з головних і актуальних задач гідродинаміки.

Мета дослідження – визначення зменшення втрат напору за рахунок процесу змінювання коефіцієнта втрат на місцевих опорах.

Матеріали і методи дослідження. Теоретична складова досліджень руху рідини в напірному трубопроводі з різними видами місцевих опорів здійснювалась із застосуванням елементів гідродинаміки, які базуються на рівнянні Д. Бернуллі. Експериментальні дослідження проводились на спеціально розробленому стенді.

Результати досліджень та їх обговорення. Розрізняють два види втрат напору: втрати за довжиною і втрати на місцевих опорах.

Загальні втрати напору визначаються із залежності:

$$h_v = h_l + h_m, \quad (1)$$

де h_l – втрати напору за довжиною трубопроводу;

h_m – втрати напору на місцевих опорах.

Втрати напору за довжиною трубопроводу обумовлюються роботою сил тертя. За руху рідини вони розподіляються рівномірно за довжиною трубопроводу постійного перерізу й збільшуються пропорційно до довжини труби.

Втрати напору на місцевих опорах обчислюються за формулою Вейсбаха:

$$h_m = \xi \frac{V^2}{2g}, \quad (2)$$

де ξ – коефіцієнт втрат на місцевому опорі (безрозмірний);

V – середня швидкість в перерізі трубопроводу (звично за місцевим опором або ж перед ним).

Значення коефіцієнта ξ залежить від виду місцевого опору, числа Рейнольдса і, в певній мірі, від шорсткості стінок, а для різного роду запірних пристроїв (засувки, затвори, крани та ін.) – від ступеню їх відкриття.

З огляду на складність явища, що відбувається в рідині, яка протікає через місцевий опір, тільки в окремих випадках коефіцієнт ξ може бути обчислений теоретичним шляхом (раптове звуження або раптове розширення трубопроводу). У переважній більшості коефіцієнт ξ визначають експериментальним шляхом і виражають у вигляді емпіричних формул, графіків або таблиць. Звично значення цих коефіцієнтів приводяться у відомих довідниках із гідравліки.

Дані щодо коефіцієнтів місцевих опорів, наведені в довідниковій літературі, відносяться до турбулентного режиму руху із значними числами Re , де прояв ефектів в'язкості рідини незначний. Вважається, що за ламінарного режиму руху або близького до нього коефіцієнт ξ більшою мірою залежить від числа Рейнольдса. У цьому випадку втрати напору пропорційні швидкості в першій степені, а коефіцієнт місцевих опорів пов'язаний з числом Re залежністю:

$$\xi = \frac{A}{Re}, \quad (3)$$

де A – стала величина, що залежить від виду місцевого опору, його форми й ступеню стиснення потоку.

За великих значень числа Рейнольдса (у квадратичній області опору) формуються відривні течії, які і є основною причиною місцевих опорів. У цій області коефіцієнт ξ для певного місцевого опору вважається постійним.

Вельми важливий взаємовплив місцевих опорів за близького їх розташування. Таке розташування місцевих опорів має місце у вентиляційних системах, на насосних станціях і т. п. При цьому сумарний опір може виявитися більшим або меншим, ніж сума втрат напору в окремих місцевих опорах. Якщо відстань між місцевими опорами більше п'яти діаметрів трубопроводу, то їх взаємний вплив не враховується.

У лабораторних умовах втрати напору на місцеві опори визначаються згідно рівняння Бернуллі:

$$h_m = \left(z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right). \quad (4)$$

Тобто для визначення втрат напору достатньо знати питому енергію потоку перед місцевим опором і за ним. У тому випадку, коли цей опір розташований на горизонтальному трубопроводі постійного діаметру, вираз 4 суттєво спрощується і втрати напору на такому місцевому опорі визначають за різницею показників п'єзометрів, що розміщені перед місцевим опором і за ним, тобто:

$$h_m = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}. \quad (5)$$

Схема установки для дослідження коефіцієнтів місцевих опорів представлена на рис. 1.

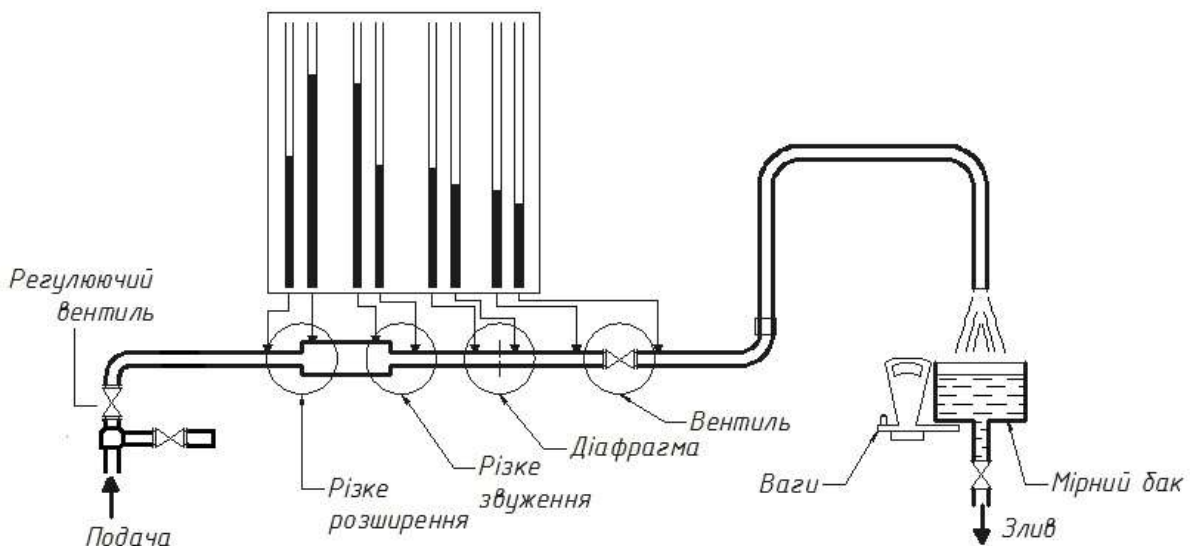


Рис. 1. Схема установки для дослідження місцевих опорів

Подача води здійснюється з напірного баку, а витрата її за робочим трубопроводом регулюється вентилем. Робочий трубопровід складається з двох послідовно з'єднаних ділянок труб, що мають різний діаметр. На трубопроводі встановлені такі місцеві опори: різке розширення, різке

звуження, діафрагма і вентиль. До кожного місцевого опору підключено по два п'єзометра (перед місцевим опором і за ним). Усі п'єзометри для зручності обліку попарно зібрані в батарею п'єзометрів. Для вимірювання витрат води під час проведення дослідів використовується мірний бак з терезами (див. рис.1). До початку виконання дослідів приводять установку в робоче положення, а саме випускають повітря з трубопроводу та п'єзометрів і встановлюють певну витрату води. Після досягнення стійких показників п'єзометрів визначають ваговим способом витрату води (що протікає трубопроводом), для чого засікають час і вагу (а отже і об'єм) наповнення мірного баку. Для кожного місцевого опору знімають показники п'єзометрів. Усі вимірювальні величини (в тому числі й діаметри трубопроводу на ділянках) заносять у відповідні графи журналу дослідницьких робіт. Відповідно заносять і розрахункові дані, а також дані з довідкової літератури.

У тому випадку, коли місцевий опір розташований на трубопроводі однакового діаметра, різниця показів п'єзометрів являє собою втрати напору на даному місцевому опорі. На різкому розширенні та звуженні для одержання втрат напору до різниці показників п'єзометрів треба додати алгебраїчну різницю швидкісних опорів перед місцевим опором і за ним, тобто:

$$h_m = \left(\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} \right) + \left(\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) \quad (6)$$

Для визначення швидкісного напору обчислюють витрату Q , середню швидкість в перерізі знаходять із відношення витрати до живого перерізу. Приймавши коефіцієнт Коріоліса $\alpha = 1,0$, знаходять швидкісний напір.

За обчислення коефіцієнта втрат на місцевому опорі ξ необхідно втрати напору розділити на швидкісний напір (за швидкістю після місцевого опору).

Коефіцієнти втрат напору, одержані дослідним шляхом, порівнюються з коефіцієнтами, що беруться із довідника за гідравлічними розрахунками.

Висновки і перспективи. Одним із перспективним напрямів розвитку системи водопостачання є визначення енергетичних характеристик потоку рідини із застосуванням рівняння Д. Бернуллі.

Проведений аналіз руху рідини на різних видах місцевого опору на експериментальній установці дозволив зв'язувати методичні підходи до визначення коефіцієнтів місцевих опорів.

Результати аналітичного дослідження є підґрунтям для розрахунку місцевих втрат напору на кожній ділянці трубопроводу, що має забезпечити підвищення економічної ефективності системи водопостачання на 10 – 15 %.

Список використаних джерел

1. Гришин, А. П. Создание технических систем управляемого водопользования в сельском хозяйстве: автореф. ... д-ра техн. наук: 05.20.01/ А. П. Гришин. – ГНУ ВИМ. – М., 2011. – 47 с.
2. Запольський, А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води / А. К. Запольський. – К.: Вища школа, 2005. – 671 с.
3. Найманов, А.Я. Водоснабжение / А. Я. Найманов, С. Б. Никиша. – Донецк: Норд – прес, 2004. – 649 с.
4. Дідур, В. А. Гідравліка, сільськогосподарське водопостачання та гідропневмопривід / В. А. Дідур, О. Д. Савченко, С. І. Пастушенко, С. І. Мовчан. – Запоріжжя: Прем'єр, 2005. – 463 с.

References

1. Grishin, A. P. (2011). Sozdaniye tekhnicheskikh sistem upravlyayemogo vodopol'zovaniya v sel'skom khozyaystve [Creation of technical systems managed water use in agriculture]. Moscow, 47.
2. Zapolskyi, A. K. (2005). Vodopostachannia, vodovidvedennia ta yakist vody [Water, sanitation and water quality]. Kyiv, Vyshcha shkola, 671.
3. Naymanov, A. YA., Nikisha, S.B. Vodosnabzheniye [Water supply]. Donetsk: Nord, – pres, 649.
4. Didur, V. A., Savchenko, O. D. Pastushenko, S. I., Movchan, S. I. (2005). Hidravlika, silskohospodarske vodopostachannia ta hidropnemopryvid [Hydraulics, agricultural water supply and hidropnemopryvid]. Zaporizhzhia: Prem'ier, 463.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МЕСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ НАПОРНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ

В. Є. Василенков

Аннотация. В системе водоснабжения сельскохозяйственных объектов расчет водопроводной сети является важной технологической операцией. Сложность и разнообразие факторов, обуславливающих движение жидкостей, в большинстве случаев не позволяют получить четкого теоретического решения для различных видов течения в зависимости от вида местного сопротивления. Поэтому важной проблемой является поиск и обоснование путей повышения эффективности методов подсчета местных потерь напора.

Цель исследования – уменьшение потерь напора за счет исследования процесса изменения коэффициента потерь напора на местных сопротивлениях.

Теоретическая составляющая исследований движения жидкости в напорном трубопроводе с различными видами местных сопротивлений осуществлялась с применением элементов гидродинамики, основанные на уравнении Д. Бернулли. Экспериментальные исследования проводились на специально разработанном стенде.

Результаты исследования показали, что одним из перспективных направлений развития системы водоснабжения является определение энергетических характеристик потока жидкости с применением

уравнения Д. Бернулли, проведен анализ движения жидкости в различных видах местного сопротивления на экспериментальной установке позволил определить методические подходы к определению коэффициентов местных сопротивлений. Результаты аналитического исследования являются основой для расчета местных потерь напора на каждом участке трубопровода, который должен обеспечить повышение экономической эффективности системы водоснабжения на 10-15 %.

Ключевые слова: движение жидкости, потери напора, давления, напорный трубопровод, коэффициент местных сопротивлений

STUDY COEFFICIENT OF LOCAL RESISTANCE WHEN PRESSURIZED FLUID MOTION

V. E. Vasilenkov

Abstract. *In the water supply agricultural facilities calculation of water supply network is an important technological operations. The complexity and diversity of factors contributing to the movement of fluids, in most cases, not present a clear theory solutions for different types of flow depending on the type of local resistance. Therefore, the important issue is finding and study ways to improve methods for calculating the local head loss*

The aim of the study is to reduced head losses due to the research process variation coefficient of head loss in the local piers.

Theoretical research component of the fluid in the pressure pipe with different types of local resistance was carried out with the use of hydrodynamic elements based on the equation of Daniel Bernoulli. Experimental studies conducted on a specially designed stand.

The results showed that one of the prospective areas of the water system is to determine the energy characteristics of fluid flow using Daniel Bernoulli equation, the analysis of the fluid at different types of local resistance to the experimental setup allowed methodical approaches to determining the coefficients of local resistance. The results of analytical research is the basis for calculating the local head loss in each section of the pipeline that will ensure increased economic efficiency of water for 10-15 %.

Keywords: *fluid motion, loss of pressure, pressure, pressure line, the coefficient of local resistance*

ОЦІНКА ОБЛАСТІ СТІЙКОСТІ ПАРАМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ ЗА НАЯВНОСТІ КРАЙОВИХ УМОВ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ФОРМИ

Л. А. ПАНТАЛІЄНКО, кандидат фізико-математичних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: nubip.ea@gmail.com

Анотація. Розглянуто загальні постановки задач практичної стійкості нелінійних параметричних систем звичайних диференціальних рівнянь за наявності крайових умов, що стосуються задач проектування лінійних резонансних прискорювачів. У рамках сформульованих задач досліджено лінійну неоднорідну систему зі збуреннями та крайовими умовами інтегральної форми. Одержано необхідні й достатні умови перевірки відповідних якостей стійкості з областю початкових умов еліпсоїдального вигляду шляхом подання загального розв'язку системи у формі Коші та розв'язання екстремальної задачі. Розроблено алгоритми чисельної побудови областей стійкості за наявності відомих та обмежених за нормою збурень, лінійних і нелінійних динамічних обмежень на фазові координати. При цьому у випадку нелінійних обмежень на вектор станів здійснено попередню апроксимацію замкненої опуклої множини, що містить нульову точку, дотичними гіперплощинами. Як окремий випадок наведені оцінки застосованих для розрахунку областей стійкості однорідних систем диференціальних рівнянь, залежних від параметрів, за наявності крайових умов інтегрального вигляду.

Ключові слова: параметрична система, крайові умови, стійкість, збурення, норма, оператор, фундаментальна матриця

Актуальність. Для аналізу стійкості та пов'язаних з цим прикладних задач істотно з'ясувати питання про можливі межі змінювання початкових і подальших відхилень для реальної динамічної системи та встановити величину допустимого інтервалу її функціонування. Крім того, важливо визначити й можливі екстремальні збурення динамічної системи на реальних режимах. У зв'язку з постановками такого роду задач динаміку системи розглядають на скінченному проміжку часу, а початкові умови та фазові обмеження задають у конкретному вигляді $1-3$. Зазначені особливості стосуються задач практичної (технічної) стійкості та їх прикладань, зв'язаних з проектуванням складних систем, з їх керуванням, адаптацією та чутливістю $1,2$.

На відміну від класичних методів 4 , аналіз параметричних систем з позицій практичної стійкості дозволяє значно розширити коло

досліджуваних задач та розв'язувати їх чисельно. Зокрема, поширені за проектування реальних систем задачі чутливості (розрахунку допусків на параметри, обмеженої та гарантованої чутливості) [4] охоплюються постановками практичної стійкості параметричних систем у відповідному просторі функцій [2,3].

У роботі, на підставі методів практичної стійкості [2,3], досліджуються параметричні системи звичайних диференціальних рівнянь за наявності крайових умов [1]. У рамках сформульованих задач одержано оптимальні оцінки області початкових умов у заданих структурах для лінійних неоднорідних систем зі збуреннями та крайовими умовами інтегрального вигляду. Окремо розглядаються випадки лінійних і нелінійних обмежень на вектор станів у динаміці за наявності відомих або обмежених за нормою постійно діючих збурень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Необхідність розгляду задач, пов'язаних з аналізом стійкості визначається підвищеними вимогами щодо проектування систем і безпосередньо стосується її працездатності в реальних умовах експлуатації [1,4]. З точки зору прикладань, зокрема, у крайових задачах, задачах оптимізації лінійних резонансних прискорювачів основна увага приділяється методам практичної стійкості, що мають алгоритмічну спрямованість [1,2]. Так, у багатьох задачах прикладного характеру необхідно забезпечити стійкість системи за наявності крайових умов різного типу. Часто потрібно дослідити на стійкість систему за фіксованих координат у деякі моменти часу на інтервалах функціонування об'єкту. Наприклад, така ситуація виникає за чисельного розрахунку областей захоплення частинок у процес прискорення за радіальними координатами у несиметричних випадках. Тоді в початковий момент проекції швидкостей на осі ОХ, ОУ вважають нульовими. Крайові умови інтегральної форми фігурують у задачах оптимізації поздовжнього руху, за якими задають різницю потенціалів у зазорі як інтеграл від амплітуди напруги прискорювального поля.

Мета досліджень — розробка чисельних методів розв'язання задач практичної стійкості для параметричних систем диференціальних рівнянь за наявності крайових умов.

Матеріали і методи досліджень. У роботі застосовуються методи теорії стійкості, диференціальних рівнянь та алгоритми оптимізації.

Дослідимо на стійкість незбурений розв'язок $x(0) \equiv 0$ системи

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t, \alpha), \quad f(0, t, 0) \equiv 0, \quad t \in [t_0, T] \quad (1)$$

за додаткових умов:

$$Qx(t, \alpha) = q, \quad (2)$$

де $x = x(t, \alpha)$, α — вектори фазових координат і параметрів вимірності n , m відповідно;

$f(x, t, \alpha) - n$ – вимірна вектор-функція, яка відповідає умовам існування та єдиності розв'язку для будь-яких $\alpha \in G_\alpha$;

Q – деякий оператор, що визначає початкові умови для системи (1);

$q - n$ – вимірний сталий вектор.

Розглянемо випадок, коли співвідношення (2) інтегрального вигляду:

$$\int_{t_0}^T Q \bar{x} \bar{dt} = q, \quad (3)$$

а система (1) з додатковими умовами (3) має єдиний розв'язок для будь-яких $\alpha \in G_\alpha$.

Означення. Розв'язок $x(t, 0) \equiv 0$ системи (1) назовемо $c; B, G_0^\alpha, \Phi_t, t_0, T$ – стійким за правою частиною додаткових умов (2), якщо $x, \alpha \in \Phi_t, t \in t_0, T$ для усіх векторів, що задовольняють співвідношенню $q \in q: q^* B q < c^2$, та довільних $\alpha \in G_0^\alpha \subset G_\alpha$.

У рамках сформульованих задач розглянемо лінійну неоднорідну систему

диференціальних рівнянь зі збуреннями вигляду:

$$\frac{dx}{dt} = A \bar{x} + G \bar{\alpha} + f, \quad t \in t_0, T. \quad (4)$$

Для чисельного оцінювання множини додаткових умов $G_q = q: q^* B q < c^2$, якщо $G_0^\alpha = \alpha: \alpha^* B_\alpha \alpha \leq c_\alpha^2$, конкретизуємо фазові обмеження $\Phi_t, t \in t_0, T$:

$$\Phi_t = \Gamma_t = x: |l_s^* \bar{x}| \leq 1, s = 1, 2, \dots, N, \quad t \in t_0, T, \quad (5)$$

$$\Phi_t = \Psi_t = x: \psi(x, t) \leq 1, \quad t \in [t_0, T], \quad (6)$$

де $l_s, s = 1, 2, \dots, N$ – задані неперервні вектор-функції вимірності n ;

ψ, t – скалярна функція, неперервна за t разом зі своїми частинними похідними за компонентами вектора x ;

Ψ_t , – замкнена опукла множина для будь-якого t , що містить нульову точку.

З урахуванням (5), (6) і структуризації множин G_q, G_0^α , розв'язок $x, 0 \equiv 0$ системи (4) у розумінні означення стійкості будемо називати $c; B, c_\alpha, B_\alpha, \Gamma_t, t_0, T$ – і $c; B, c_\alpha, B_\alpha, \Psi_t, t_0, T$ – стійким відповідно.

Критерій 1. Для того, щоб система (4) була $c; B, c_\alpha, B_\alpha, \Gamma_t, t_0, T$ – стійкими за наявності (3) та відомих збурень, необхідно та достатньо, щоб виконувалась нерівність:

$$c^2 \leq \min_{t \in t_0, T} \min_{s=1, 2, \dots, N} \min_{\alpha \in \alpha: \alpha^* B_\alpha \alpha < c_\alpha^2} \frac{1 - |l_s^* \bar{a}|^2}{|l_s^* \bar{X}(t_0) \bar{R}^{-1} B^{-1} R^{-1} X^*(t_0) \bar{l}_s|}, \quad (7)$$

$$|l_s^* \bar{a}| < 1, \quad t \in t_0, T, \quad s = 1, 2, \dots, N, \quad \alpha \in \alpha: \alpha^* B_\alpha \alpha \leq c_\alpha^2.$$

Тут $\tilde{a} = G_1 \alpha + a - X(t_0) R^{-1} a_1$; $G_1 = \int_{t_0}^t X(\tau) G d\tau$; $a = \int_{t_0}^t X(\tau) f d\tau$;
 $R = \int_{t_0}^T Q X(t_0) d\tau$; $a_1 = \int_{t_0}^T Q G_1 \alpha + a d\tau$; $X(t_0)$ – нормована
 фундаментальна матриця розв'язків однорідної системи (4) за $\alpha = 0$:

$$\frac{dX(t_0)}{dt} = A X(t_0), \quad X(t_0) = E.$$

Для доведення співвідношення (7) запишемо загальний розв'язок системи (4) у формі Коші:

$$x(t, \alpha) = X(t, t_0)x(t_0, \alpha) + G_1(t)\alpha + a = X(t, t_0)R^{-1}q - a_1 + G_1(t)\alpha + a. \quad (8)$$

З урахуванням обмежень (5) параметр c еліпса додаткових умов G_q потрібно вибирати за умовою виконання нерівностей:

$$-1 - l_s^*(t)\tilde{a}(t) \leq l_s^*(t)X(t, t_0)R^{-1}q \leq 1 - l_s^*(t)\tilde{a}(t), s = 1, 2, \dots, N.$$

Позначивши через $p_s^*(t) = l_s^*(t)X(t, t_0)R^{-1}$ та визначаючи екстремуми лінійної форми $p_s^*(t)q$, $s = 1, 2, \dots, N$ на заданій структурі еліпсоїда, приходимо до критерію стійкості (7).

Критерій 2. Для того, щоб системи (4) були $c, B, c_\alpha, B_\alpha, \Psi_t, t_0, T$ – стійкими за наявності (3) за відомих збурень, необхідно та достатньо, щоб справджувалось співвідношення:

$$c^2 \leq \min_{t \in [t_0, T]} \min_{\bar{x} \in \Psi_t'} \min_{\alpha \in G_0^\alpha} \frac{[g^*(\bar{x}, t)(\bar{x} - \tilde{a}(t))]^2}{g^*(\bar{x}, t)X(t, t_0)R^{-1}B^{-1}R^{-1*}X^*(t, t_0)g(\bar{x}, t)}, \quad (9)$$

$$g^*(\bar{x}, t) - \tilde{a} > 0, \quad \bar{x} \in \Psi_t', \quad t \in [t_0, T].$$

Тут $g^*(\bar{x}, t) = \text{grad}_{\bar{x}}^* \psi(\bar{x}, t)$, Ψ_t' – межа замкненої опуклої множини Ψ_t , $t \in [t_0, T]$.

Доведення (9) здійснюється шляхом подання загального розв'язку у формі Коші (8) за умовою виконання нерівності:

$$g^*(\bar{x}, t)X(t, t_0)R^{-1}q \leq g^*(\bar{x}, t) - \tilde{a}.$$

Позначаючи через $p_s^*(t) = g^*(\bar{x}, t)X(t, t_0)R^{-1}$, дістанемо оцінку (9), що є розв'язком аналогічної до (7) екстремальної задачі.

Припустимо тепер, що збурення f невідомі, але обмежені за нормою:

$$\|f\| \leq \left(\int_{t_0}^T \left(\sum_{i=1}^n |f_i|^q \right)^{\frac{q_1}{q}} d\tau \right)^{\frac{1}{q_1}} \leq \bar{R}, \quad 1 \leq q \leq \infty, \quad 1 \leq q_1 < \infty. \quad (10)$$

Критерій 3. Для того, щоб системи (4) були $c, B, c_\alpha, B_\alpha, \Gamma_t, t_0, T$ – або $c, B, c_\alpha, B_\alpha, \Psi_t, t_0, T$ – стійкими за додатковими умовами (3) та наявності збурень (10), необхідно та достатньо, щоб виконувалась відповідно нерівність:

$$c^2 \leq \min_{t \in [t_0, T]} \min_{s=1,2,\dots,N} \min_{\alpha \in \alpha: \alpha^* B_s \alpha < c_\alpha^2} \frac{1 - |l_s^* \bar{G}_1 \bar{\alpha} - X(t_0) \bar{R}^{-1} Q_T G_1 \bar{\alpha}| - a_s}{l_s^* \bar{X}(t_0) \bar{R}^{-1} B^{-1} R^{-1*} X^*(t_0) \bar{l}_s},$$

$$a_s < 1 - |l_s^* \bar{G}_1 \bar{\alpha} - X(t_0) \bar{R}^{-1} Q_T G_1 \bar{\alpha}|, \quad t \in [t_0, T],$$

$$s = 1, 2, \dots, N, \quad \alpha \in \alpha: \alpha^* B_s \alpha < c_\alpha^2; \quad (11)$$

або

$$c^2 \leq \min_{t \in [t_0, T]} \min_{\bar{x} \in \Psi_t} \min_{\alpha \in G_0^\alpha} \frac{[g^*(\bar{x}, t)(\bar{x} - G_1 \bar{\alpha} + X(t_0) \bar{R}^{-1} Q_T G_1(T) \alpha) - a_{\bar{x}}]^2}{g^*(\bar{x}, t) X(t, t_0) R^{-1} B^{-1} R^{-1*} X^*(t, t_0) g(\bar{x}, t)},$$

$$g^*(\bar{x}, t) \bar{x} - G_1 \bar{\alpha} + X(t_0) \bar{R}^{-1} Q_T G_1 \bar{\alpha} \geq a_{\bar{x}}, \quad \bar{x} \in \Psi_t', \quad t \in [t_0, T], \quad (12)$$

$$\text{де } a_s = \max_{\|f\| \leq R} \left| l_s^* \left(\int_{t_0}^t X(t, \tau) f(\tau) d\tau - X(t_0) \bar{R}^{-1} Q_T \int_{t_0}^T X(T, \tau) f(\tau) d\tau \right) \right|,$$

$$a_{\bar{x}} = \max_{\|f\| \leq R} \left| g^*(\bar{x}, t) \left(\int_{t_0}^t X(t, \tau) f(\tau) d\tau - X(t_0) \bar{R}^{-1} Q_T \int_{t_0}^T X(T, \tau) f(\tau) d\tau \right) \right|.$$

Оцінки (7), (9), (11), (12) можна застосовувати для окремого типу лінійної параметричної системи без збурень:

$$\frac{dx}{dt} = A \bar{x} + G \bar{\alpha}, \quad t \in [t_0, T],$$

поклавши у відповідних формулах $f = 0$.

У випадку нелінійної параметричної системи (1) необхідно провести попередньо її лінеаризацію в околі розрахункового руху.

Результати дослідження та їх обговорення. Для лінійних параметричних систем диференціальних рівнянь за наявності збурень і крайових умов інтегральної форми здійснено чисельний розрахунок області стійкості у заданих структурах.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Сформульовано постановки задач практичної стійкості параметричних систем звичайних диференціальних рівнянь за наявності крайових умов. Для лінійних неоднорідних систем зі збуреннями та крайовими умовами інтегральної форми одержано оптимальні оцінки областей початкових умов у заданих структурах.

Список використаних джерел

1. Бублик, Б. Н. Структурно-параметрическая оптимизация и устойчивость динамики пучков / Б. Н. Бублик, Ф. Г. Гаращенко, Н. Ф. Кириченко. – К.: Наук. думка, 1985. – 304 с.
2. Гаращенко, Ф. Г. Аналіз та оцінка параметричних систем: навч. посібник / Ф. Г. Гаращенко, Л. А. Панталієнко. – К.: ІСДО, 1995. – 140 с.
3. Панталієнко, Л. А. Розрахунок областей параметричної стійкості за наявності постійно діючих збурень / Л. А. Панталієнко // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2010. – Вип. 150. – С. 126–131.
4. Розенвассер, Е. Н. Чувствительность систем управления / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов. – М.: Наука, 1981. – 464 с.

References

1. Bublyk, B. N., Harashchenko, F. H., Kyrychenko, N. F. (1985). Strukturno-parametrycheskaia optymizatsiia y ustoichyvost dynamyky puchkov [Structural-parametric optimization and stability of beam dynamics]. Kyiv, Ukraine: Scientific thought, 304.
2. Harashchenko, F. H., Pantalienko, L. A. (1995). Analiz ta otsinka parametrychnykh system: Navch. posibnyk [Analysis and evaluation of parametric systems: Teach. Manual]. Kyiv, Ukraine: , 140. / F.H. Harashchenko, L.A. Pantalienko. – K.:ISSE, 1995. – 140 s.
3. Pantalienko, L. A. (2010). Rozrakhunok oblastei parametrychnoi stiikosti za naiavnosti postiino diiuchykh zburen [The calculation of areas parametric stability at presence permanent perturbations]. Scientific Journal NUBaN Ukraine. A series of «Technology and Energy AIC», 150, 126–131.
4. Rozenvasser, E. N., Yusupov, R. M. (1981). Chuvstvytelnost system upravleniya [Sensitivity control systems]. Moscow, Russia: Science, 464.

ОЦЕНКА ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ КРАЕВЫХ УСЛОВИЯХ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЫ

Л. А. Панталиенко

Аннотация. Рассмотрены общие постановки задач практической устойчивости нелинейных параметрических систем обыкновенных дифференциальных уравнений при наличии краевых условий, касающихся задач проектирования линейных резонансных ускорителей. В рамках сформулированных задач исследована линейная неоднородная система с возмущениями и краевыми условиями интегральной формы. Получены необходимые и достаточные условия проверки соответствующих качеств устойчивости с областью начальных условий эллипсоидального вида путем представления общего решения системы в форме Коши и решения экстремальной задачи. Разработаны алгоритмы численного построения областей устойчивости при наличии известных и ограниченных по норме возмущений, линейных и нелинейных динамических ограничений на фазовые координаты. При этом в случае нелинейных ограничений на вектор состояний осуществлена предварительная аппроксимация замкнутого выпуклого множества, которое содержит нулевую точку, касательными гиперплоскостями. Как частный случай приведенные оценки применены для расчета областей устойчивости однородных систем дифференциальных уравнений, зависящих от параметров, при наличии краевых условий интегрального вида.

Ключевые слова: параметрическая система, краевые условия, устойчивость, возмущения, норма, оператор, фундаментальная матрица

ASSESSMENT OF THE STABILITY REGION OF PARAMETRIC SYSTEMS WITH BOUNDARY CONDITIONS OF THE INTEGRAL FORM

Abstract. *The general formulation of the problems of practical stability of nonlinear parametric systems of ordinary differential equations with boundary conditions relating to the problems of designing of linear resonance accelerators. Within the framework of formulated tasks investigated the inhomogeneous linear system by perturbations and boundary conditions of the integral form. We obtain necessary and sufficient conditions for checking of appropriate quality of stability with the area of the initial conditions of the ellipsoidal type by submitting of general solution of system in the form of the Cauchy and solutions of extreme tasks. The algorithms of numerical construction of the regions of stability under known and limited by the perturbations normal, linear and nonlinear dynamical constraints on the phase coordinates. In the case of nonlinear constraints on the state vector it carried out a preliminary approximation of the closed convex set that contains the zero point, the tangent hyperplanes. As a special case the above estimates are applied to calculate the areas of stability of homogeneous systems of differential equations depending on a parameter, with the boundary conditions of an integral type.*

Keywords: *parametric system, boundary conditions, stability, perturbations, norm, operator, fundamental Matrix*

УДК 51-72

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ГРАНИЦІ В'ЯЗКОГО ТІЛА МЕТОДОМ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ

О. П. ЗІНЬКЕВИЧ, кандидат фізико-математичних наук, доцент
Національний університет харчових технологій

О. М. НЕЩАДИМ, кандидат фізико-математичних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

В. М. САФОНОВ, кандидат фізико-математичних наук, доцент
Національний університет харчових технологій
E-mail: oleksandr_neshchadym@mail.ru

Анотація. *У теорії потенціалу будуються інтегральні представлення розв'язку через довільні функції точок контуру області шляхом підстановки цих функцій у формули Гріна замість контурних значень рішень та їх частинних похідних. Умови на границі області призводять до, так званих, граничних інтегральних рівнянь 4 .*

У задачах руху в'язкої рідини виокремлюється практично важливий клас задач наперед невідомою (вільною границею), яка визначається в

Abstract. *The general formulation of the problems of practical stability of nonlinear parametric systems of ordinary differential equations with boundary conditions relating to the problems of designing of linear resonance accelerators. Within the framework of formulated tasks investigated the inhomogeneous linear system by perturbations and boundary conditions of the integral form. We obtain necessary and sufficient conditions for checking of appropriate quality of stability with the area of the initial conditions of the ellipsoidal type by submitting of general solution of system in the form of the Cauchy and solutions of extreme tasks. The algorithms of numerical construction of the regions of stability under known and limited by the perturbations normal, linear and nonlinear dynamical constraints on the phase coordinates. In the case of nonlinear constraints on the state vector it carried out a preliminary approximation of the closed convex set that contains the zero point, the tangent hyperplanes. As a special case the above estimates are applied to calculate the areas of stability of homogeneous systems of differential equations depending on a parameter, with the boundary conditions of an integral type.*

Keywords: *parametric system, boundary conditions, stability, perturbations, norm, operator, fundamental Matrix*

УДК 51-72

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ГРАНИЦІ В'ЯЗКОГО ТІЛА МЕТОДОМ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ

О. П. ЗІНЬКЕВИЧ, кандидат фізико-математичних наук, доцент
Національний університет харчових технологій

О. М. НЕЩАДИМ, кандидат фізико-математичних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

В. М. САФОНОВ, кандидат фізико-математичних наук, доцент
Національний університет харчових технологій
E-mail: oleksandr_neshchadym@mail.ru

Анотація. *У теорії потенціалу будуються інтегральні представлення розв'язку через довільні функції точок контуру області шляхом підстановки цих функцій у формули Гріна замість контурних значень рішень та їх частинних похідних. Умови на границі області призводять до, так званих, граничних інтегральних рівнянь 4 .*

У задачах руху в'язкої рідини виокремлюється практично важливий клас задач наперед невідомою (вільною границею), яка визначається в

процесі самого розв'язання. Одним із можливих підходів до розв'язання даного класу задач гідродинаміки є метод гідродинамічних потенціалів, який переключає основні складності досліджень і числових розрахунків на деякі граничні інтегральні рівняння, які відносяться лише до границі області і враховують граничні умови безпосередньо. Дане перетворення надає можливість відразу визначити невідомі величини на границі, не обчислюючи їх у всій області. Це вигідно відрізняє метод граничних інтегральних рівнянь від інших методів (метод встановлення, кінцево-різницеві методи тощо).

У статті поставлена і розв'язана задача деформації в'язкого тіла під дією сил поверхневого натягу. Будуються граничні інтегральні рівняння, які розглядаються в сукупності з кінематичною контурною умовою. Запропоновано метод кроків за часом для чисельного аналізу деформації рідкого в'язкого тіла під дією сил поверхневого натягу.

Ключові слова: *гідродинамічні потенціали, кінематична контурна умова, сили поверхневого натягу, інтегральне представлення, інтегральне рівняння*

Актуальність. Рівняння Нав'є-Стокса мають ряд специфічних особливостей, які проявляються в чисельній реалізації незалежно про форми їх запису. В першу чергу, це просторово-еліптичний характер рівнянь, обумовлений впливом в'язкості у всьому полі течії. Звідси – пояснення парадоксу, який полягає в тому, що знаходження розв'язку стаціонарної задачі часто виявляється складнішим нестаціонарної. Більш того, за чисельного аналізу стаціонарного руху рідини часто використовується метод встановлення, за якого стаціонарний рух є границею нестаціонарних течій за $t \rightarrow \infty$. Правда, при цьому необхідна впевненість в тому (не завжди очевидний факт), що нестаціонарне рух дійсно переходить в шукане стаціонарне 2 .

Поряд з методом встановлення поширені також кінцево-різницеві методи. Але заміна похідних кінцевими різницями, без аналізу та врахування властивостей аналітичності рішення конкретного класу задач, не завжди дозволяє на основі чисельних розрахунків зробити якісний аналіз отриманих гідродинамічних величин 1 .

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розв'язання крайових задач для рівнянь Нав'є-Стокса за допомогою гідродинамічних потенціалів вивчалися різними авторами 5,6 . Подальший розвиток метода гідродинамічних потенціалів отримано в роботах 3,4 , при цьому істотно (на відміну від інших робіт) є те, що сингулярності в граничних інтегральних рівняннях взаємно компенсуються. Це центральне місце теорії гідродинамічних потенціалів, побудованих на основі формул Гріна, залишило поза увагою інших авторів.

Мета дослідження. Методи розв'язання задач математичної фізики повинні бути різноманітними; необхідно виділяти раціональні класи задач

і для кожного класу розробляти спеціальні методи, що поєднують кількісні оцінки з можливостями якісного аналізу.

Розробка методів розв'язання задач про рух в'язкої рідини становить проблему, яка цікавить як інженерів, так і математиків.

Матеріали і методика досліджень. У роботі 4 встановлено загальне інтегральне представлення розв'язку лінійованих рівнянь Нав'є-Стокса у випадку рухомих границь і в плоскому випадку представлення для вектора швидкості є комбінацією гідродинамічних потенціалів подвійного і простого шару. Ядра потенціалів виражаються через елементарні функції, що дає можливість застосовувати теорію потенціалів до розв'язання прикладних задач.

Результати дослідження та їх обговорення. 1. Постановка задачі деформації рідкого в'язкого тіла під дією сил поверхневого натягу.

Розглянемо в'язку рідину (тіло)?, яка не піддається стисненню (рідке тіло), що заповнює в момент часу $t \leq 0$ область $D \subset E_2$, обмеженої контуром L з координатами $x_1 = x_1(\sigma, 0)$, $x_2 = x_2(\sigma, 0)$, $0 \leq \sigma < a$. Кожному значенню параметра σ відповідає певна елементарна (нескінченно мала) частинка рідини, що знаходиться в момент часу $t = 0$ на кривій L в площині x_1, x_2 . Швидкості $\vec{v}$ частинок рідини за $t \leq 0$ вважаємо нульовими:

$$\vec{v}(\vec{y}, 0) = v_1 \vec{e}_1 + v_2 \vec{e}_2 \equiv 0, \quad \vec{y} \in D.$$

Нехай, починаючи з моменту часу, $t = 0$ до границі рідини L прикладені нормальні сили напруги:

$$\vec{p}_n(\vec{x}, t) = -\alpha \kappa(\sigma, t) \vec{n}(\sigma, t), \quad (1)$$

де α – коефіцієнт поверхневого натягу;

$\kappa(\sigma, t)$ – кривизна кривої $L(t)$;

$\vec{x} = (x_1; x_2)$ – радіус-вектор точок контуру рідини;

$\vec{n}(\sigma, t)$ – зовнішня нормаль до $L(t)$.

Масові сили в області D і дотичні напруги на контурі L вважаємо рівними нулю.

Під дією сил поверхневого натягу частинки рідини приходять в рух, утворюючи рухливий контур $L(t)$, який описується рівняннями $x_k = x_k(\sigma, t)$, $k = 1, 2$.

Необхідно визначити границю $L(t)$ рідкого тіла, а також швидкість $\vec{v}(\vec{y}, t)$ частинок рідкого тіла і гідродинамічний тиск $p(\vec{y}, t)$, що задовольняють в $D(t)$ системі Нав'є-Стокса:

$$\begin{cases} \mu \Delta \vec{v}(\vec{y}, t) - \gamma \frac{\partial \vec{v}(\vec{y}, t)}{\partial t} - \text{grad } p(\vec{y}, t) = 0, \\ \text{div} \vec{v}(\vec{y}, t) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Тут $\mu = \text{const} > 0$ і $\gamma = \text{const} > 0$ – відповідно в'язкість і густина рідини.

Функції $x_1 = x_1(\sigma, t)$, $x_2 = x_2(\sigma, t)$ зв'язані з розв'язком системи (2) кінематичним співвідношенням:

$$\vec{v}(\vec{x}(\sigma, t), t) = \frac{\partial \vec{x}(\sigma, t)}{\partial t} \equiv \vec{v}_0(\sigma, t), \quad (3)$$

де $\vec{v}(\vec{x}, t)$ – вектор швидкості частинок рідини контуру $L(t)$;

$\vec{v}_0(\sigma, t)$ – вектор швидкості точок контуру $L(t)$;

$L(t)$ – вільний контур, і на ньому діють сили поверхневого натягу, які утримують на контурі одні і ті ж самі частинки рідини.

2. Побудова граничних інтегральних рівнянь.

Уведемо позначення: $\vec{n}(\sigma, t)$ і $\vec{s}(\sigma, t)$ – зовнішня нормаль і дотичний вектор до контуру $L(t)$ в точці $\vec{x}(\sigma, t)$;

$\theta_1(\sigma, t) = \vec{v}_0(\sigma, t) \cdot \vec{n}(\sigma, t)$ і $\theta_2(\sigma, t) = \vec{v}_0(\sigma, t) \cdot \vec{s}(\sigma, t)$ – нормальна і дотична складові вектора швидкості точок контуру;

$\vec{x}(\sigma, \tau)$ і $\vec{x}(\sigma_0, t)$ – радіус-вектор змінної і фіксованої точок інтегрування відповідно, $r(\tau) = |\vec{x}(\sigma, \tau) - \vec{x}(\sigma_0, t)|$.

Спрямуємо в інтегральному представленні $\vec{y} \rightarrow \vec{x}(\sigma_0, t)$, $\vec{x}(\sigma_0, t) \in L$, $\vec{y} \in D$ і користуючись властивостями гідродинамічних потенціалів 4 (з врахуванням (3)), зводимо задачу до розв'язання системи нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2}\theta_1(\sigma_0, t) + \int_{L(t)} \theta_1(\sigma, t) \frac{\cos \omega_0(t)}{2\pi r(\tau)} ds + F_1(\sigma_0, t) &= 0, \\ -\frac{1}{2}\theta_2(\sigma_0, t) + \int_{L(t)} \theta_2(\sigma, t) \frac{\sin \omega_0(t)}{2\pi r(\tau)} ds + F_2(\sigma_0, t) &= 0, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial x_1(\sigma, t)}{\partial t} = \theta_1(\sigma, t) n_1(\sigma, t) + \theta_2(\sigma, t) n_2(\sigma, t); \quad \frac{\partial x_2(\sigma, t)}{\partial t} = -\theta_1(\sigma, t) n_2(\sigma, t) + \theta_2(\sigma, t) n_1(\sigma, t),$$

за початкових умов: $\theta_1(\sigma, 0) = \theta_2(\sigma, 0) = 0$, $\vec{x}(\sigma, 0) = \vec{x}_0(\sigma)$.

Тут

$$F_i \sigma_0, t = \int_0^t d\tau \int_{L\tau} \left[\theta_2 \sigma, \tau H_{i2} + \left(\theta_1 \sigma, \tau - \frac{\alpha}{2\mu} \right) H_{i1} + \gamma \sum_{k=1}^2 \theta_1 \sigma, \tau \theta_k \sigma, \tau G_{ik} \right] ds$$

$$H_{11} = A \tau \left[q_1 z \tau \cos 2\omega \tau + \omega_0 \tau + q_2 z \tau \sin 2\omega \tau \sin \omega_0 \tau \right],$$

$$H_{21} = A \tau \left[q_1 z \tau \sin 2\omega \tau + \omega_0 \tau - q_2 z \tau \sin 2\omega \tau \cos \omega_0 \tau \right],$$

$$H_{22} = -H_{11} + A \tau q_2 z \tau \cos 2\omega \tau + \omega_0 \tau,$$

$$H_{12} = H_{21} + A \tau q_2 z \tau \sin 2\omega \tau - \omega_0 \tau;$$

$$G_{11} = B \tau \left[e^{-z\tau} \cos \omega \tau - \omega_0 \tau + q_2 z \tau \cos \omega \tau + \omega_0 \tau \right],$$

$$G_{21} = B \tau \left[q_1 z \tau \sin \omega \tau + \omega_0 \tau - e^{-z\tau} \sin \omega \tau - \omega_0 \tau \right],$$

$$G_{22} = -G_{11} + 2B \tau e^{-z\tau} \cos \omega \tau - \omega_0 \tau,$$

$$G_{12} = G_{21} + 2B \tau e^{-z\tau} \sin \omega \tau - \omega_0 \tau;$$

$$A \tau = \frac{1}{2\pi r \tau t - \tau}, B \tau = \frac{1}{8\pi\mu t - \tau}, z \tau = \frac{\gamma r^2 \tau}{2\pi\mu t - \tau};$$

$$q_1 = z^{-1} - e^{-z} 1 + z^{-1}, q_2 = ze^{-z}, r \tau = |\vec{r} \tau|, \vec{r} \tau = \vec{x} \sigma, \tau - \vec{x} \sigma_0, t,$$

$$\omega_0 \tau = \left(\vec{r} \tau, \vec{n} \sigma_0, \tau \right), \omega \tau = \left(\vec{r} \tau, \vec{n} \sigma, \tau \right),$$

$$\vec{s} = s_1; s_2, s_i = \frac{\partial x_i}{\partial s} = \frac{\partial x_i}{\partial \sigma} \frac{d\sigma}{ds} \quad (i=1,2), \quad \vec{n} = n_1; n_2 = s_2; -s_1.$$

$$\text{Позначимо } \frac{\partial x_i}{\partial \sigma} = x'_i \quad (i=1,2), \text{ тоді } ds = \sqrt{x'_1 \sigma, \tau^2 + x'_2 \sigma, \tau^2} d\sigma,$$

$$s_1 \sigma, t = \frac{x'_1 \sigma, t}{\sqrt{x'_1 \sigma, t^2 + x'_2 \sigma, t^2}}, s_2 \sigma, t = \frac{x'_2 \sigma, t}{\sqrt{x'_1 \sigma, t^2 + x'_2 \sigma, t^2}}.$$

(4)

Якщо вектор нормалі і вектор дотичної розглядаються в фіксованій точці інтегрування, то необхідно в формулах (4) σ замінити на σ_0 .

Використовуючи (4), а також

$$\vec{r} = x_1 \sigma, t - x_1 \sigma_0, t; x_2 \sigma, t - x_2 \sigma_0, t = r_1; r_2,$$

$$\text{Маємо } \sin \omega_0 t = \frac{\vec{r} t \cdot \vec{s} \sigma_0, t}{|\vec{r} t|} = \frac{r_1 x'_1 \sigma_0, t - r_2 x'_2 \sigma_0, t}{x'_1 \sigma_0, t^2 + x'_2 \sigma_0, t^2},$$

$$\cos \omega_0 t = \frac{\vec{r} t \cdot \vec{n} \sigma_0, t}{|\vec{r} t|} = \frac{r_1 x'_2 \sigma_0, t - r_2 x'_1 \sigma_0, t}{x'_1 \sigma_0, t^2 + x'_2 \sigma_0, t^2}.$$

Формули обчислення $\sin \omega t$ і $\cos \omega t$ мають аналогічний вигляд, тільки необхідно аргумент в x'_i замінити: σ_0 на σ .

3. Алгоритм розв'язання задачі деформації рідкого в'язкого тіла під дією сил поверхневого натягу.

Розглянемо послідовність моментів часу $t_0, t_1 = h, \dots, t_k = k \cdot h, \dots$, де $h > 0$ – крок по часу (задане мале число).

Розіб'ємо процес розв'язання задачі для кожного моменту часу на етапи:

1) припустимо, що функції $\theta_i \sigma, t$ і $x_i \sigma, t$, $i=1,2$ відомі для усіх $t \leq t_{k-1}$ і $t \leq t_k$ відповідно.

Функцію $\theta_1 \sigma, t_k$ визначаємо із рівняння:

$$-\frac{1}{2}\theta_1 \sigma_0, t_k + \int_{L t_k} \theta_1 \sigma, t_k \frac{\cos \omega_0 t_k}{2\pi r t_k} ds = F_1 \sigma_0, t_k ; \quad (5)$$

2) використовуючи обчислену функцію $\theta_1 \sigma, t_k$, а також відомі функції $x_i \sigma, t$ (для усіх $t \leq t_k$) і $\theta_2 \sigma, t$ (для усіх $t \leq t_{k-1}$), функцію $\theta_2 \sigma, t_k$ визначаємо за формулою:

$$\frac{1}{2}\theta_2 \sigma_0, t_k = \int_{L t_k} \theta_1 \sigma, t_k \frac{\sin \omega_0 t_k}{2\pi r t_k} ds + F_2 \sigma_0, t_k ; \quad (6)$$

3) знаючи функції $\theta_i \sigma, t_k$ і $x_i \sigma, t_k$ знаходимо для моменту часу $t = t_{k+1}$ функції $x_i \sigma, t_{k+1}$ за наближеними формулами:

$$x_i \sigma, t_{k+1} \approx x_i \sigma, t_k + t_{k+1} - t_k \left(\vec{e}_i \cdot \sum_{j=1}^2 \theta_j \sigma, t_k \vec{a}_0^j \right),$$

де $\vec{a}_0^1 = \vec{n} \sigma, t_k$, $\vec{a}_0^2 = \vec{s} \sigma, t_k$.

Після визначення контуру $x_i \sigma, t_{k+1}$ за умови $|x_i \sigma, t_{k+1} - x_i \sigma, t_k| > \varepsilon$, можна повторити пункти 1) – 3) і обчислити функції $x_i \sigma, t_{k+2}$.

В інтегральне рівняння (5) і в рівність (6) входять $F_1 \sigma_0, t_k$ і $F_2 \sigma_0, t_k$, які обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} F_1 \sigma_0, t_k = & - \int_0^{t_k-1} d\tau \int_{L \tau} \left[\theta_2 \sigma, \tau H_{12} \sigma_0, \sigma, t_k, \tau + \left(\theta_1 \sigma, \tau - \frac{\alpha}{2\mu} \right) H_{11} \sigma_0, \sigma, t_k, \tau + \right. \\ & \left. + \gamma \sum_{j=1}^2 \theta_1 \sigma, \tau \theta_j \sigma, \tau G_{1j} \sigma_0, \sigma, t_k, \tau \right] ds - \int_{L t_k} \left[\theta_2 \sigma, t_{k-1} H_{12}^k \sigma_0, \sigma + \right. \\ & \left. + \left(\theta_1 \sigma, t_{k-1} - \frac{\alpha}{2\mu} \right) H_{11}^k \sigma_0, \sigma + \gamma \sum_{j=1}^2 \theta_1 \sigma, t_{k-1} \theta_j \sigma, t_{k-1} G_{1j}^k \sigma_0, \sigma \right] ds; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_2 \sigma_0, t_k = & \int_0^{t_k-1} d\tau \int_{L \tau} \left[\theta_2 \sigma, \tau H_{22} + \left(\theta_1 \sigma, \tau - \frac{\alpha}{2\mu} \right) H_{21} + \right. \\
& + \gamma \sum_{j=1}^2 \theta_1 \sigma, \tau \theta_j \sigma, \tau G_{2j} \left. \right] ds + \int_{L t_k} \left[\theta_2 \sigma, t_{k-1} H_{22}^k + \right. \\
& + \left. \left(\theta_1 \sigma, t_k - \frac{\alpha}{2\mu} \right) H_{21}^k + \gamma \sum_{j=1}^2 \theta_1 \sigma, t_k \theta_j \sigma, t_{k-1} G_{2j}^k \right] ds.
\end{aligned}$$

Ядра H_{ij}^k і G_{ij}^k $i, j = 1, 2$ знаходяться в результаті інтегрування H_{ij} і G_{ij} в межах від t_{k-1} до t_k :

$$\begin{aligned}
H_{11}^k &= \tilde{q}_1 \frac{\cos 2\omega + \omega_0}{2\pi r_0} + e^{-z_k} \frac{\sin 2\omega \sin \omega_0}{2\pi r_0}, \\
H_{12}^k &= \tilde{q}_1 \frac{\sin 2\omega + \omega_0}{2\pi r_0} - e^{-z_k} \frac{\cos 2\omega \sin \omega_0}{2\pi r_0}, \\
H_{21}^k &= \tilde{q}_1 \frac{\sin 2\omega + \omega_0}{2\pi r_0} - e^{-z_k} \frac{\sin 2\omega \cos \omega_0}{2\pi r_0}, \\
H_{22}^k &= -\tilde{q}_1 \frac{\cos 2\omega + \omega_0}{2\pi r_0} + e^{-z_k} \frac{\cos 2\omega \cos \omega_0}{2\pi r_0}, \\
G_{11}^k &= \frac{e^{-z_k} \cos \omega + \omega_0}{8\pi\mu} - \frac{\cos \omega - \omega_0 \operatorname{li} x}{8\pi\mu}, \\
G_{21}^k &= \frac{\tilde{q}_1 \sin \omega + \omega_0}{8\pi\mu} - \frac{\sin \omega - \omega_0 \operatorname{li} x}{8\pi\mu}, \\
G_{12}^k &= G_{21}^k - \frac{\sin \omega - \omega_0 \operatorname{li} x}{4\pi\mu}, \quad G_{22}^k = G_{11}^k - \frac{\cos \omega - \omega_0 \operatorname{li} x}{4\pi\mu}; \\
z_k &= \frac{\gamma r_0^2}{4\mu h_k}, \quad h_k = t_k - t_{k-1}, \quad \tilde{q}_1 = \frac{1 - e^{-z_k}}{z_k}, \quad r_0 = \left| \vec{x} \sigma, t_k - \vec{x} \sigma_0, t_k \right|.
\end{aligned}$$

Визначений інтеграл $\int_0^x \frac{dt}{\ln t}$, де $x = e^{-z_k}$, називається інтегральним

логарифмом і позначається $\operatorname{li} x$: $\operatorname{li} x = \int_0^x \frac{dt}{\ln t}$.

Висновки і перспективи. Задача деформації в'язкого тіла звелась до розв'язку інтегрального рівняння, яке відноситься тільки до границі області і враховує краєві умови безпосередньо. Перевага такого перетворення полягає в тому, що представляється можливим відразу визначити невідомі величини на границі, не обчислюючи їх у всій області.

Якщо необхідно знайти рішення в довільній внутрішній точці області, то для цього достатньо виконати інтегрування.

Це вигідно відрізняє метод граничних інтегральних рівнянь від інших методів.

Список використаних джерел

1. Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов задач математической физики / под. ред. К. И. Бабенко. – М.: Наука, 1979. – 295 с.
2. Бабенко, К. И. Основы численного анализа / К. И. Бабенко. – М.: Наука, 1986. – 744 с.
3. Белоносов, С. М. Гидродинамические и тепловые потенциалы в областях с подвижными границами / С. М. Белоносов, К. А. Черноус. // Аналитические, численные и аналоговые методы в задачах теплопроводности. – Киев: Наукова думка, 1977. – С. 126-136.
4. Белоносов, С. М. Краевые задачи для уравнений Навье-Стокса / С. М. Белоносов, К. А. Черноус. – М.: Наука, 1985. – 312 с.
5. Долидзе, Н. Е. Некоторые вопросы нестационарного течения вязкой несжимаемой жидкости / Н. Е. Долидзе. – Тбилиси: Изд-во АН Груз. ССР, 1960. – 332 с.
6. Odqvist, F. K. G. Beitrage zur Theorie der nichtstationaren zihen Flussigkeitsbewegungen/ F. K. G. Odqvist // Archiv fur Mat.Astr.Fysik.-1930/32.- Bd.22 A, N 28. – S. 1–22.

References

1. Babenko, K. I. (1979). Teoreticheskiye osnovy i konstruirovaniye chislennykh algoritmov zadach matematicheskoy fiziki [Theoretical Foundations and Design of Numerical Algorithms for Problems in Mathematical Physics]. Moskow, Nauka, 295.
2. Babenko, K. I. (1986). Osnovy chislennogo analiza [Fundamentals of numerical analysis]. Moskow, Nauka, 744.
3. Belonosov, S. M. , Chernous, K. A. (1977). Gidrodinamicheskiye i teplovyye potentsialy v oblastiakh s podvizhnymi granitsami [Hydrodynamic and thermal potentials in the fields with moving boundaries]. V kn.: Analiticheskiye, chislennyye i analogovyye metody v zadachakh teploprovodnosti. Kyiv, Naukova dumka, 126-136.
4. Belonosov, S. M., Chernous, K. A. (1985). Krayevyye zadachi dlya uravneniy Nav'ye-Stoksa [Boundary value problems for the Navier-Stokes equations]. Moskow, Nauka, 312.
5. Dolidze, N. E. (1960). Nekotoryye voprosy nestatsionarnogo techeniya vyazkoy neszhimayemoy zhidkosti [Some questions of the nonstationary flow of a viscous incompressible fluid]. Tbilisi, Izd-vo AN Gruz. SSR, 332.
6. Odqvist, F. K. G. (1930-32). Beitrage zur Theorie der nichtstationaren zihen Flussigkeitsbewegungen. Archiv fur Mat.Astr.Fysik, 22 (28), 1–22.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ГРАНИЦЫ ВЯЗКОГО ТЕЛА МЕТОДОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ

А. П. Зинькевич, А. М. Нецадим, В. М. Сафонов

Аннотация. В теории потенциала строятся интегральные представления решения через произвольные функции точек контура области путем подстановки этих функций в формулы Грина вместо контурных значений решений и их частных производных. Условия на границе области приводят к, так называемым, граничным интегральным уравнениям. В задачах вязкой жидкости выделяется практически важный класс задач с заранее неизвестной (свободной границей), которая определяется в процессе самого решения. Одним из возможных подходов к решению данного класса задач гидродинамики является метод гидродинамических потенциалов, переключающий основные трудности исследований и численных расчетов на некоторые граничные интегральные уравнения, которые относятся лишь к границе области и учитывают граничные условия непосредственно. Это преобразование позволяет сразу определить неизвестные величины на границе, не вычисляя их по всей области. Это выгодно отличает метод граничных интегральных уравнений от других методов.

В статье поставлена и решена задача деформации вязкого тела под действием сил поверхностного натяжения. Строятся граничные интегральные уравнения, которые рассматриваются в совокупности с кинематическим контурным условием. Предложен метод шагов по времени для численного анализа деформации жидкого вязкого тела под действием сил поверхностного натяжения.

Ключевые слова: гидродинамические потенциалы, кинематическое соотношение, силы поверхностного натяжения, интегральное представление, интегральное уравнение

MATHEMATICAL MODELING OF DEFORMATION BORDER VISCOELASTIC BODY HYDRODYNAMIC POTENTIALS METHOD

A. Zinkevych, A. Neshchadym, V. Safonov

Abstract. In the theory of potential, integral representations of a solution in terms of arbitrary functions of points of the contour of a domain are constructed by substituting these functions into Green's formulas instead of the contour values of the solutions and their partial derivatives. The conditions on the boundary of the region lead to the so-called boundary integral equations. The viscous fluid theory stands practically important class of problems with pre-unknown (free boundary), which is determined in the process of resolving. One approach to solving this class of hydrodynamics problems is the method of hydrodynamic potentials, switch the main challenges of research and numerical calculations of some boundary integral equations, which relate only to the border area and take into account the boundary conditions directly. This conversion allows you to immediately identify unknown quantities at the border, without calculating them throughout the region. This distinguishes the method of boundary integral equations of the other methods.

The article posed and solved the problem of viscous deformation of the body under the action of surface tension forces. We construct boundary integral equations, which are considered in conjunction with the kinematic boundary conditions. The method of time steps for the numerical analysis of liquid viscous deformation of the body under the action of surface tension forces.

Keywords: *hydrodynamic potentials kinematic ratio, surface tension, integral representation, integral equation*

УДК 372.851

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ВИКЛАДАННІ ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ СТУДЕНТАМ ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

О. Ю. ДЮЖЕНКОВА, кандидат фізико-математичних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: oduzen@yandex.ua

Анотація. Важливою складовою якісної підготовки майбутніх інженерів є підвищення їх рівня математичної освіти. Це передбачає розуміння суті основних понять і тверджень, що вивчаються в курсі вищої математики, їх тлумачення в різних науках, уміння будувати математичні моделі та застосовувати математичні методи за розв'язання прикладних задач. У статті розглянуто загальний підхід та особливості використання математичного моделювання у процесі викладання вищої математики студентам інженерних спеціальностей. Підкреслено важливість використання задач, які ілюструють необхідність введення основних математичних понять, що дає мотивацію та стимулює вивчення математики. Для реалізації професійного спрямування курсу вищої математики велику увагу слід приділити прикладним задачам, які сприяють розвитку дослідницьких навичок майбутніх фахівців. Крім того, математичне моделювання є важливим для встановлення міжпредметних зв'язків та формування науково-цілісного сприйняття світу.

У статті розглянуто приклади використання математичних моделей за вивчення похідної функції, визначеного інтеграла, диференціальних рівнянь. Підкреслено доцільність використання комбінованих задач, які пов'язують між собою різні розділи вищої математики. Зокрема, наведено приклади, у яких використовується матеріал з лінійної алгебри, аналітичної геометрії та математичного аналізу.

Ключові слова: *математична модель, професійна спрямованість, прикладні задачі*

The article posed and solved the problem of viscous deformation of the body under the action of surface tension forces. We construct boundary integral equations, which are considered in conjunction with the kinematic boundary conditions. The method of time steps for the numerical analysis of liquid viscous deformation of the body under the action of surface tension forces.

Keywords: *hydrodynamic potentials kinematic ratio, surface tension, integral representation, integral equation*

УДК 372.851

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ВИКЛАДАННІ ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ СТУДЕНТАМ ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

О. Ю. ДЮЖЕНКОВА, кандидат фізико-математичних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: oduzen@yandex.ua

Анотація. Важливою складовою якісної підготовки майбутніх інженерів є підвищення їх рівня математичної освіти. Це передбачає розуміння суті основних понять і тверджень, що вивчаються в курсі вищої математики, їх тлумачення в різних науках, уміння будувати математичні моделі та застосовувати математичні методи за розв'язання прикладних задач. У статті розглянуто загальний підхід та особливості використання математичного моделювання у процесі викладання вищої математики студентам інженерних спеціальностей. Підкреслено важливість використання задач, які ілюструють необхідність введення основних математичних понять, що дає мотивацію та стимулює вивчення математики. Для реалізації професійного спрямування курсу вищої математики велику увагу слід приділити прикладним задачам, які сприяють розвитку дослідницьких навичок майбутніх фахівців. Крім того, математичне моделювання є важливим для встановлення міжпредметних зв'язків та формування науково-цілісного сприйняття світу.

У статті розглянуто приклади використання математичних моделей за вивчення похідної функції, визначеного інтеграла, диференціальних рівнянь. Підкреслено доцільність використання комбінованих задач, які пов'язують між собою різні розділи вищої математики. Зокрема, наведено приклади, у яких використовується матеріал з лінійної алгебри, аналітичної геометрії та математичного аналізу.

Ключові слова: *математична модель, професійна спрямованість, прикладні задачі*

Актуальність. Підготовка фахівців в сучасних умовах вимагає нових підходів до викладання дисциплін у вищих навчальних закладах. Для студентів інженерних спеціальностей актуальним є питання про підвищення їх рівня математичної освіти. Майбутні фахівці повинні вміти аналізувати фізичні процеси, виділяти основне і вміти використовувати математичні методи для розв'язання прикладних задач. Моделювання є одним з найважливіших аспектів якісної математичної підготовки. Навчаючись моделювати реальні процеси, студенти отримують не тільки мотивацію вивчення математики, а й можливість застосовувати марематичні знання для розв'язання задач у своїй професійній діяльності, зокрема, у сфері енергетики.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Видатний сучасний математик Л. Д. Кудрявцев підкреслював: «Людство сьогодні як ніколи зрозуміло, що знання в галузі природничих наук стає точним тільки тоді, коли для його опису використовують математичну модель».

Математичне моделювання є одним з основних методів наукового пізнання світу, і його успішно застосовують у всіх сферах людської діяльності. Вагомий внесок у розробку математичних моделей в енергетиці зробили В. А. Веніков, В. С. Перхач, О. В. Кириленко, М. С.Сегеда [4] та інші. У своїх роботах вони розглядали математичні основи аналізу електроенергетичних систем, наводили численні приклади моделювання об'єктів і процесів при вирішенні задач електроенергетики. У цьому сенсі використання математичних моделей при викладанні вищої математики майбутнім енергетикам сприяє формуванню у них дослідницьких навичок, необхідних у подальшій роботі. Багато цікавих прикладних задач запропонував відомий математик І. І. Баврін [1], який за допомогою марематичного моделювання ілюстрував застосування основних математичних понять у природничих науках.

Мета дослідження – оптимізувати процес викладання вищої математики із врахуванням професійної спрямованості курсу для майбутніх фахівців–інженерів, зокрема, в енергетичній сфері. Більшість основних математичних понять можна ілюструвати завданнями практичного змісту, які навчають студентів будувати математичні моделі реальних фізичних процесів. Крім того, прикладні задачі є необхідними для мотивації і стимулювання вивчення вищої математики.

Матеріали і методи дослідження. Різні науки описують різні сторони оточуючого світу, а зв'язки між науками відображають його єдність, формуючи науково–цілісну картину світу. Викладаючи вищу математику студентам інженерних спеціальностей, слід особливу увагу звертати на професійну спрямованість курсу. Для висвітлення міжпредметних зв'язків з іншими дисциплінами доцільно використовувати математичні моделі при вивченні основних математичних понять.

Кожне нове поняття доцільно вводити лише після розгляду різноманітних задач, які й приводять до необхідності введення цього поняття. Зокрема, розглядаючи поняття функції, різні способи її задання та класифікацію функцій, можна навести такі приклади: лінійна функція

$s = v \cdot t$, яка описує шлях, пройдений тілом зі сталою швидкістю v за час t ; квадратична $S = \pi R^2$ (площа круга); тригонометричні функції $y = \sin x$ та $y = \cos x$, які описують не лише механічні коливання, а й багато біологічних явищ (слух, зір, сприйняття ультразвуку тощо), пов'язаних з коливними процесами. Доцільно звернути увагу на роль експоненціальної функції, яка описує різноманітні закони неперервного (органічного) росту (розпад радіоактивної речовини, ріст грошових вкладів, розмноження бактерій, ріст народонаселення тощо).

Серед задач, які розглядаються перед введенням поняття похідної (крім класичних задач про миттєву швидкість та про дотичну до кривої) можна розглянути задачі про швидкість хімічної реакції, про швидкість зростання популяції, про продуктивність праці. Всі ці задачі після введення поняття похідної дають змогу характеризувати похідну як швидкість зміни певного процесу, що описується заданою функцією.

Математичне моделювання можна використовувати при вивченні всіх розділів вищої математики. Велику кількість задач практичного змісту для тлумачення суті основних математичних понять наведено в посібнику [2]. Для студентів інженерних спеціальностей є багато цікавих прикладних задач, у яких застосовуються диференціальні рівняння [3]. Наведемо одну з них.

Задача 1. Визначити залежність струму I від часу t в електричному колі, яке складається із послідовно ввімкнених джерела постійного струму, що має напругу U , опору R , самоіндукції L та вимикача, якщо в початковий момент часу $I(0) = 0$.

Сила струму в електричному колі згідно заданих умов визначається рівнянням $L \frac{dI}{dt} + RI = U$. Тому задача зводиться до розв'язання диференційного рівняння з відокремлюваними змінними. Враховуючи початкову умову $I(0) = 0$, дістаємо, що сила струму в заданому електричному колі визначається функцією $I(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$.

Для формування дослідницьких навичок доцільно розглядати різні способи розв'язання задач. Розв'язуючи одну й ту саму задачу різними способами, студент вчиться аналізувати, моделювати та використовувати різні математичні методи для розв'язання побудованої моделі.

Задача 2. Знайти найменшу відстань від озера, берегова лінія якого описується функцією $y = x^2 - 4x + 6$, до шосе, яке визначається прямою $x + y - 2 = 0$.

Очевидно, що визначення відстані між кривою і прямою зводиться до знаходження відстані від точки кривої $M(x; y)$ до прямої $l: Ax + By + C = 0$,

яку обчислюють за формулою
$$\rho(M; l) = \frac{|Ax + By + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}.$$

Таким чином, розв'язування задачі передбачає визначення мінімуму функції двох змінних $f(x, y) = \frac{x+y-2}{\sqrt{2}}$ за умови, що $y = x^2 - 4x + 6$.

Можна розглянути три способи розв'язання цієї задачі.

1-й спосіб. Розв'яжемо задачу на умовний екстремум. Склавши функцію Лагранжа $F(x, y, \lambda) = \frac{x+y-2}{\sqrt{2}} + \lambda(y - x^2 + 4x - 6)$, знайдемо єдину стаціонарну точку $M\left(\frac{3}{2}; \frac{9}{4}\right)$, у якій функція має мінімум $f_{\min} = \frac{7}{4\sqrt{2}}$. Це і є шукана відстань між кривою та прямою.

2-й спосіб. Якщо крива задається функцією в явному вигляді, то зручно застосувати такий спосіб. Підставивши у функцію $f(x, y)$ вираз $y = x^2 - 4x + 6$, одержимо функцію однієї змінної $g(x) = f(x; x^2 - 4x + 6) = \frac{1}{\sqrt{2}}(x^2 - 3x + 4)$.

Досліджуючи функцію $g(x)$ на екстремум, знаходимо $g_{\min} = g\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{9}{4}$. Отже, $M\left(\frac{3}{2}; \frac{9}{4}\right)$ – шукана точка кривої, відстань якої до прямої дорівнює $\frac{7}{4\sqrt{2}}$.

3-й спосіб. На кривій $y = x^2 - 4x + 6$ знаходимо точки, в яких дотичні паралельні заданій прямій $x + y - 2 = 0$. Визначаємо відстань від цих точок до прямої, після чого вибираємо з них найменшу. Оскільки дана пряма має кутовий коефіцієнт $k_l = -1$, то паралельні їй дотичні мають той самий кутовий коефіцієнт $y' = 2x - 4 = -1$, звідки маємо $x = \frac{3}{2}$, $y\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{9}{4}$. Маємо точку $M\left(\frac{3}{2}; \frac{9}{4}\right)$, тому відстань $\rho(M; l) = \frac{7}{4\sqrt{2}}$ і буде шуканою відстанню між кривою та прямою.

Цей спосіб дає змогу знайти не тільки відстань між кривою і прямою, а й точку K на прямій, для якої $MK = \rho(M; l)$. Для цього розв'язуємо систему, складену з рівняння нормалі до заданої кривої в точці M і рівняння прямої l .

Для встановлення зв'язків між різними розділами курсу вищої математики доцільно розглядати комбіновані задачі, розв'язання яких передбачає володіння матеріалом з вищої алгебри, аналітичної геометрії та математичного аналізу.

Задача 3. Знайти інтеграл $\int \frac{rx+p}{x^2+4x+5} dx$, де r — ранг матриці $\begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 3 & -2 & 4 \\ 4 & 7 & -4 & 7 \end{pmatrix}$, p — скалярний добуток векторів $\vec{a} = (2; 3; 1)$, $\vec{b} = (3; -2; 4)$.

Результати дослідження та їх обговорення. У статті розглянуто загальний підхід та особливості використання математичного моделювання при викладанні вищої математики студентам інженерних

спеціальностей. Наведено приклади математичних моделей при вивченні основних математичних понять. Розглянуто різноманітні задачі, що встановлюють зв'язки з іншими дисциплінами, які вивчають студенти інженерних спеціальностей. Застосування прикладних задач за викладання вищої математики сприяють засвоєнню суті основних понять та формуванню навичок моделювання для подальшого використання їх у майбутній професійній діяльності фахівців-інженерів.

Висновки і перспективи. Математизація є характерною рисою розвитку сучасної науки і техніки. При цьому математичне моделювання заслуговує особливої уваги, оскільки воно є потужним засобом для проведення наукових досліджень. Тому використання математичних моделей за викладання вищої математики є необхідною складовою для підвищення рівня математичної освіти та якісної професійної підготовки майбутніх інженерів-енергетиків.

Список використаних джерел

1. Баврин, И. И. Начала анализа и математические модели в естествознании и экономике. / И. И. Баврин – М.: Просвещение, 1999. – 80с.
2. Дюженкова, Л. І. Вища математика. Приклади і задачі. / Л. І. Дюженкова, О. Ю. Дюженкова, Г. О. Михалін. – К.: Академія, 2003. – 624 с.
3. Ковтун, І. І. Вища математика. Побудова математичних моделей фізичних процесів. / І. І. Ковтун, Т. А. Скороход. – К: Центр інформаційних технологій. – 2010. – 60 с.
4. Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник. / О. В. Кириленко, М. С. Сегеда, О.Ф. Буткевич, Т. А. Мазур; за ред. М.С. Сегеди; – Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2013. – 608 с.

References

1. Bavrin, I. I. (1999). Nachala analiza i matematicheskie modeli v estestvoznanii i ekonomike. [The beginnings of analysis and mathematical models in natural science and economics]. Moskva: Prosveschenie, 80.
2. Dyuzhenkova, L. I., Dyuzhenkova, O. Yu., & Mikhalin, G. O. (2003). Vyscha matematika. Priklady i zadachi. [Higher mathematics. Examples and problems]. Kyiv: Akademiya, 624.
3. Kovtun, I. I., Skorokhod, T. A., (2010). Vyscha matematyka. Pobudova matematichnih modeley fizichnih protsesiv [Higher mathematics. Construction of mathematical models of physical processes]. Kyiv: Tsentr informatsiynyh tehnologiy, 60.
4. Kirilenko, O. V., Segeda, M.S., & Butkevich, T. A. (2013). Matematichne modelyuvannya v elektroenergetitsi: pidruchnik. [Mathematical modeling in power engineering. Textbook]. Segeda, M.S. (Ed.) Lviv: vyd. Lviv. politekhniky, 608.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРЕПОДАВАНИИ ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКИ СТУДЕНТАМ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

О. Ю. Дюженкова

Аннотация. Важной составляющей качественной подготовки будущих инженеров является повышение их уровня математического образования. Это предполагает понимание сути основных понятий и утверждений, изучаемых в курсе высшей математики, их толкование в различных науках, умение строить математические модели и применять математические методы при решении прикладных задач. В статье рассмотрен общий подход и особенности использования математического моделирования при преподавании высшей математики студентам инженерных специальностей. Подчеркнута важность использования задач, которые иллюстрируют необходимость введения основных математических понятий, дает мотивацию и стимулирует изучение математики. Для реализации профессионального направления курса высшей математики большое внимание следует уделить прикладным задачам, которые способствуют развитию исследовательских навыков будущих специалистов. Кроме того, математическое моделирование является важным для установления межпредметных связей и формирования научно-целостного восприятия мира.

В статье рассмотрены примеры использования математических моделей при изучении производной функции, определенного интеграла, дифференциальных уравнений. Подчеркнута целесообразность использования комбинированных задач, которые связывают между собой различные разделы высшей математики. В частности, приведены примеры, в которых используется материал по линейной алгебре, аналитической геометрии и математическому анализу.

Ключевые слова: математическая модель, профессиональная направленность, прикладные задачи

MATHEMATICAL MODELING APPLYING IN TEACHING OF ENGINEERING SPECIALTIES STUDENTS

O. Yu. Dyuzhenkova

Abstract. An important component of quality training of future engineers is to increase their level of mathematical education. This approach includes understanding of the basic concepts and statements that are studied in the course of higher mathematics, their interpretation in various sciences, the ability to construct mathematical models and apply mathematical methods for solving of applied problems. In the article we describe the general approach and features of mathematical modeling in teaching of higher mathematics for students of engineering specialties. It's emphasized the importance of the problems using which illustrates the need to introduce basic mathematical concepts for motivation and stimulating learning of mathematics. Great attention should be given to applied problems that contribute to the development of research skills of future specialists for the implementation of the professional direction of the course of higher mathematics. In addition,

mathematical modeling is important to establish interdisciplinary connections and the formation of scientific and holistic perception of the world.

In the article we consider the examples of the use of mathematical models in the study of the derivative function, definite integral, differential equations. It emphasized the advisability of combined tasks, which connect different sections of higher mathematics. In particular, we consider the problems, which solving needs the material from linear algebra, analytical geometry and mathematical analysis.

Keywords: *mathematical model, professional orientation, applied problems*

УДК 535.3

АНАЛІТИЧНИЙ ПІДХІД ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ СФЕРИЧНИХ ЧАСТИНОК

С. В. СТЕЦЕНКО, старший викладач
**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: sstetsenko@i.ua

Анотація. Розглядається аналітичний підхід дослідження системи сферичних частинок, оточених певним діелектричним середовищем з різною діелектричною проникністю. Система знаходиться між двома паралельними пластинами – електродами, рознесеними на певну відстань, і на які подається змінна напруга низької частоти. Отримано крайову задачу для рівнянь Максвелла, яку розв'язано методом функцій Гріна. Ці функції є основою для точних мультипольних частинок і точного електричного поля, які виражаються через прикладене поле і матрицю, що залежить від конфігурації системи. Точне електричне поле має вклади від прикладеного поля, поля частинок і поля зображення частинок. Зовнішнє поле, яке є суперпозицією прикладеного поля за відсутності частинок та поля зображення частинок в загальному випадку, є неоднорідним та залежить від властивостей і конфігурації системи. Визначено середню діелектричну проникність шляхом прямого усереднення її величини по всьому образу. Ефективна діелектрична проникність залежить лише від індукованих дипольних моментів, які, в свою чергу, залежать від всіх мультипольних моментів частинок та їх зображень.

Ключові слова: *сферична частинка, діелектрична система, мультипольний момент*

mathematical modeling is important to establish interdisciplinary connections and the formation of scientific and holistic perception of the world.

In the article we consider the examples of the use of mathematical models in the study of the derivative function, definite integral, differential equations. It emphasized the advisability of combined tasks, which connect different sections of higher mathematics. In particular, we consider the problems, which solving needs the material from linear algebra, analytical geometry and mathematical analysis.

Keywords: *mathematical model, professional orientation, applied problems*

УДК 535.3

АНАЛІТИЧНИЙ ПІДХІД ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ СФЕРИЧНИХ ЧАСТИНОК

С. В. СТЕЦЕНКО, старший викладач
**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: sstetsenko@i.ua

Анотація. Розглядається аналітичний підхід дослідження системи сферичних частинок, оточених певним діелектричним середовищем з різною діелектричною проникністю. Система знаходиться між двома паралельними пластинами – електродами, рознесеними на певну відстань, і на які подається змінна напруга низької частоти. Отримано крайову задачу для рівнянь Максвелла, яку розв'язано методом функцій Гріна. Ці функції є основою для точних мультипольних частинок і точного електричного поля, які виражаються через прикладене поле і матрицю, що залежить від конфігурації системи. Точне електричне поле має вклади від прикладеного поля, поля частинок і поля зображення частинок. Зовнішнє поле, яке є суперпозицією прикладеного поля за відсутності частинок та поля зображення частинок в загальному випадку, є неоднорідним та залежить від властивостей і конфігурації системи. Визначено середню діелектричну проникність шляхом прямого усереднення її величини по всьому образу. Ефективна діелектрична проникність залежить лише від індукованих дипольних моментів, які, в свою чергу, залежать від всіх мультипольних моментів частинок та їх зображень.

Ключові слова: *сферична частинка, діелектрична система, мультипольний момент*

Актуальність теоретичного дослідження діелектричних характеристик гетеросистем з дисперсними включеннями обумовлена їх використанням в сучасних технологіях для вирішення задач діелектричної спектроскопії поверхні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій щодо вивчення електричного відгуку гетерогенних середовищ має довгу історію, починаючи із робіт Пуассона, Моссотті, Клаузіуса, Лоренца, Максвелла, Гарнетта, Вагнера. У статті [2] О. Ю. Грищука, Н. Г. Шкоди, С. В. Стеценко, наведено результати досліджень відгуку двошарових малих частинок на дію електромагнітного поля з точки зору їх можливого практичного використання. Частотні залежності діелектричної проникності дали можливість отримати практично повну інформацію про відгук частинок на дію електромагнітного випромінювання. У статті [3] О. Ю. Грищука, С. В. Стеценко розглянуто сучасний стан досліджень взаємодії електромагнітного випромінювання з металевими наночастинками та дисперсними системами на їх основі. Наведено результати досліджень впливу адсорбційного шару металевої частинки сферичної форми на її поляризованість та посилення комбінаційного розсіяння світла молекулами в зовнішньому електричному полі.

Мета дослідження полягала у розробці теоретичної методики розрахунку процесів поглинання електромагнітного випромінювання дисперсними системами на основі двошарових частинок сферичної форми, оточених певним середовищем з різною діелектричною проникністю.

Матеріали та методи дослідження. Розглянуто гетерогенну систему, яка складається із сферичних частинок, розміщених у деякому середовищі, яке описується залежною від частоти комплексною діелектричною проникністю ϵ_m . i -та частинка центрована в $\vec{r}_i$, має радіус a_i та частотно-залежну комплексну діелектричну проникність ϵ_i . Вся система розміщена між двома плоскими електродами $z = \pm \frac{d}{2}$. До електродів прикладено синусоїдальну напругу з амплітудою V_0 . Електричний потенціал має вигляд:

$$u(\vec{r}, t) = u(\vec{r})e^{j\omega t}. \quad (1)$$

$u(\vec{r})$ задовольняє рівнянню Лапласа:

$$\Delta u(\vec{r}) = 0 \quad (2)$$

з крайовими умовами:

$$u(\vec{r})|_{z=-d/2} = V_0, \quad u(\vec{r})|_{z=+d/2} = 0, \quad (3)$$

$$u_{\text{зовн}}(\vec{r})|_{s_i} = u_{\text{внут}}(\vec{r})|_{s_i}, \quad (4)$$

$$\epsilon_m \frac{\partial u_{\text{зовн}}(\vec{r})}{\partial n_i} \bigg|_{s_i} = \epsilon_i \frac{\partial u_{\text{внут}}(\vec{r})}{\partial n_i} \bigg|_{s_i}, \quad (5)$$

де s_i – поверхня i -ї частинки;

n_i – напрямок її нормалі;

$u_{\text{зовн}}$, $u_{\text{внут}}$ – потенціали зовні та всередині частинки відповідно.

Потенціал $u(\vec{r})$ можна записати у вигляді суперпозиції:

$$u(\vec{r}) = u^0(\vec{r}) + u^1(\vec{r}), \quad (6)$$

де $u^1(\vec{r})$ – потенціал, що створюється всіма частинками, а також наведеними ними зарядами на електродах;

$u^0(\vec{r})$ – прикладений потенціал:

$$u^0(\vec{r}) = V_0/2 - \vec{E}_0 \vec{r} = V_0/2 - \vec{E}_0 \vec{r}_i - \vec{E}_0 (\vec{r} - \vec{r}_i), \quad (7)$$

де $\vec{E}_0 = \vec{e}_z \frac{V_0}{d}$ – прикладене електричне поле,

Потенціал u^1 задовольняє:

$$\begin{aligned} \Delta u^1(\vec{r}) &= 0; \\ u^1(\vec{r})|_{z=\pm d/2} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Формула Гріна для крайових умов Діріхле на електродах:

$$G(\vec{r}, \vec{r}') = \sum_k \frac{\epsilon_1^k}{|\vec{r} - \vec{r}'_k|}, \quad (9)$$

$$\text{де } \vec{r}'_k = \{x', y', kd + (-1)^k z'\}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2. \quad (10)$$

Оскільки заряди зосереджуються лише на границях, маємо:

$$u^1(\vec{r}) = \sum_{ik} \epsilon_1^k \int_{s_i} \frac{\delta_i \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'_k|} ds', \quad (11)$$

де $\delta_i \vec{r}'$ – поверхнева щільність повного заряду i -ї частинки, оскільки інтеграл по поверхні електродів зникає в силу крайових умов (6).

Отримано загальний потенціал:

$$\begin{aligned} u_{\text{внут}} \vec{r} = & V_0/2 - E_0 \vec{r}_i - E_0 \vec{r} + 4\pi \sum_{lm} \frac{q_{ilm}}{(2l+1)a_i^{2l+1}} |\vec{r} - \vec{r}_i|^l Y_{l,m} \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^{l+1}} + \\ & + 4\pi \sum_{i'l'm'k} (-1)^{(l'+m'+1)k} \delta_i^{i'} \delta_k^0 \frac{q_{i'l'm'}}{(2l'+1)} \frac{Y_{l',m'} \frac{\vec{r} - \vec{r}_{i'k}}{|\vec{r} - \vec{r}_{i'k}|^{l'+1}}}{|\vec{r} - \vec{r}_{i'k}|^{l'+1}}, \quad |\vec{r} - \vec{r}_i| \leq a_i \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} u_{\text{зовн}} \vec{r} = & V_0/2 - E_0 \vec{r}_i - E_0 \vec{r} + 4\pi \sum_{lm} \frac{q_{ilm}}{(2l+1)} \frac{Y_{l,m} \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^{l+1}}}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^{l+1}} + \\ & + 4\pi \sum_{i'l'm'k} (-1)^{(l'+m'+1)k} \delta_i^{i'} \delta_k^0 \frac{q_{i'l'm'}}{(2l'+1)} \frac{Y_{l',m'} \frac{\vec{r} - \vec{r}_{i'k}}{|\vec{r} - \vec{r}_{i'k}|^{l'+1}}}{|\vec{r} - \vec{r}_{i'k}|^{l'+1}}, \quad a_i \leq |\vec{r} - \vec{r}_i| \leq |\vec{r}_{i'} - \vec{r}_i| - a_{i'}, \quad i' \neq i, \end{aligned} \quad (13)$$

де q_{ilm} – мультипольні моменти i -ї частинки відносно її центра;

$\delta_i^{i'} \delta_k^0$ – множник, введений для виключення подвоєного підрахунку i -ї частинки.

Кожен із трьох доданків в (12) і (13) ідентифікується як прикладений потенціал i -ї частинки, потенціал всіх інших частинок ($k=0$) та всіх зображень ($k \neq 0$).

Рівняння (12) і (13) показують, що поле, створене зображеннями, залежить від властивостей системи, тому зовнішнє поле, яке є сумою прикладеного поля та поля зображень, у загальному випадку не є ні однорідним, ні експериментально контрольованим. Вирази (12) і (13) для

потенціалів справедливий для частинок будь-якої форми та орієнтації, крім виразу для потенціалу, який створює сама i -та частинка. Потенціали (12) і (13) задовольняють рівнянню Лапласа та крайовим умовам (3), (4).

Для сферичних частинок отримуємо:

$$\sum_{lm} \frac{l\epsilon_i + (l+1)\epsilon_m}{(2l+1)a_i^{l+2}} q_{ilm} Y_{l,m}(\vec{r} - \vec{r}_i) =$$

$$= (\epsilon_i - \epsilon_m) \left\{ \frac{E_0}{\sqrt{12\pi}} Y_{1,0}(\vec{r} - \vec{r}_i) - \sum_{lm} \left[la_i^{l-1} \sum_{i'l'm'} C_{lm}^{l'm'}(\vec{r} - \vec{r}_i) q_{i'l'm'} \right] Y_{l,m}(\vec{r} - \vec{r}_i) \right\}. \quad (14)$$

Порівнюючи коефіцієнти за відповідних сферичних гармонік, отримуємо:

$$q_{ilm} = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \beta_{il} E_0 \delta_l^1 \delta_m^0 - (2l+1) \beta_{il} \sum_{i'l'm'} C_{lm}^{l'm'}(\vec{r} - \vec{r}_i) q_{i'l'm'}, \quad (15)$$

$$\text{де } \beta_{il} = \frac{(\epsilon_i - \epsilon_m) la_i^{2l+1}}{l\epsilon_i + (l+1)\epsilon_m}. \quad (16)$$

Оскільки, $\beta_{i0} = 0$, $q_{i00} = 0$, то будемо вважати $l, l' \geq 1$. Збираючи всі q_{ilm} у лівій частині (18), можемо записати в матричній формі:

$$Gq = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} h E_0, \quad (17)$$

де q – матриця-стовпчик, що складається із всіх q_{ilm} ;

$G_{ilm}^{i'l'm'}$ – матриця конфігурації системи:

$$G_{ilm}^{i'l'm'} = \delta_i^{i'} \delta_l^{l'} \delta_m^{m'} + (2l+1) \beta_{il} C_{lm}^{l'm'}(\vec{r} - \vec{r}_i); \quad (18)$$

$$h_{ilm} = \beta_{il} \delta_l^1 \delta_m^0. \quad (19)$$

Після перетворення матриць маємо:

$$q = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} G^{-1} h E_0 \quad (20)$$

або в явному вигляді:

$$q_{ilm} = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \sum_{i'l'} (G^{-1})_{ilm}^{i'l'} \beta_{i'l'} E_0. \quad (21)$$

Таким чином, всі мультипольні моменти виражаються в явному вигляді через прикладене поле і конфігураційну матрицю системи.

Результати досліджень для ефективної діелектричної проникності є точними без жодного припущення про конфігурацію системи. Результат є справедливим і для випадків, коли зовнішнє поле неоднорідне. У таких випадках система нееквівалентна нескінченній системі: зображення відіграють вирішальну роль і повинні враховуватись точно. Зовнішнє поле неоднорідне і невизначене та залежить від самої системи через її зображення. Тому не можна розглядати зовнішнє поле як збурення, в яке поміщена система: його необхідно трактувати як частину відгуку системи. В таких випадках суттєвим для розв'язку фізичної крайової задачі є розгляд лише прикладеного поля як збурення.

Висновки та перспективи. Отримано точні вирази для полів і всіх мультипольних моментів у термінах поля, прикладеного до плоских

електродів, і конфігурації системи. Ефективна діелектрична проникність залежить лише від індукованих дипольних моментів, які, в свою чергу, залежать від усіх мультипольних моментів частинок та їх зображень. Знання точних полів в системі є дуже цінним за вивчення складних систем і розподілів.

Список використаних джерел

1. Ефективна діелектрична проникність матричних дисперсних систем з багат шаровими включеннями: пряма та обернена задачі / Л. Г. Гречко, Л. Б. Лерман, Н. Г. Шкода // Вісник Київ. ун-ту. Серія: фіз.-мат. науки. – 2004. – №2. – С. 181–186.
2. Електродинамічний відгук малих частинок на електромагнітне випромінювання / О. Ю. Грищук, Н. Г. Шкода, С. В. Стеценко // Наук. вісник НУБіП України. Серія: техніка та енергетика в АПК. – 2014. – №194. – Ч2.–С. 235–243.
3. Вплив адсорбційного шару металевих частинок на їх поляризованість та розсіяння світла / О. Ю. Грищук, С. В. Стеценко // Металофізика: новітні технології. – 2014. – Т. 36, № 3. –С. 391–397.

References

1. Hrechko, L. H., Lerman, L. B., Shkoda, N. H. (2004). Efektyvna dielektrychna pronyknist matrychnykh dyspersnykh system z bahatosharovymy vkluchenniamy: priama ta obernena zadachi [The effective permittivity matrix dispersed systems with multilayered inclusions: direct and inverse problems]. Visnyk Kyiv. un-tu. Seriya: fiz.-mat. Nauky, 2, 181–186.
2. Hryshchuk, O. u., Shkoda, N. H., Stetsenko, S. V. (2014). Elektrodynamichniy vidhuk malykh chastynok na elektromahnitne vyprominiuvannya [The effective permittivity matrix dispersed systems with multilayered inclusions: direct and inverse problems]. Nauk. visnyk NUBiP Ukrainy. Seriya: tekhnika ta enerhetyka v APK, 194 (2), 235–243.
3. Hryshchuk, O. lu., Stetsenko, S. V. (2014). Vplyv adsorbtsiinoho sharu metalevykh chastynok na yikh poliarizovanist ta rozsiannia svitla [Influence of the adsorptive layer of metal particles on their polarizability and light scattering]. Metalofizyka: novitni tekhnolohii, 36 (3), 391–397.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

С. В. Стеценко

Аннотация. *Рассматривается аналитический подход исследования системы сферических частиц, окруженных определенной диэлектрической средой с разной диэлектрической проницаемостью. Система находится между двумя параллельными пластинами - электродами, разнесенными на определенное расстояние, и на которые подается переменное напряжение низкой частоты. Получена краевая задача для уравнений Максвелла, которая решена методом функций Грина. Эти функции являются основой для точных мульти-*

польных частиц и точного электрического поля, которые выражаются через прилагаемое поле и матрицу, которая зависит от конфигурации системы. Точное электрическое поле имеет вклады от приложенного поля, поля частиц и поля изображения частиц. Внешнее поле, которое является суперпозицией приложенного поля при отсутствии частиц и поля изображения частиц в общем случае, является неоднородным и зависит от свойств и конфигурации системы.

Определена средняя диэлектрическая проницаемость путем прямого усреднения ее величины по всему образу. Эффективная диэлектрическая проницаемость зависит только от индуцированных дипольных моментов, которые, в свою очередь, зависят от всех мультипольных моментов частиц и их изображений.

Ключевые слова: сферическая частица, диэлектрическая система, мультипольный момент

ANALYTICAL APPROACH OF RESEARCH DIELECTRIC SYSTEM OF SPHERICAL PARTICLES

S. V. Stetsenko

Abstract. *An analytical approach to the study of a system of spherical particles surrounded by a certain dielectric medium with different permittivity is considered. The system is located between two parallel plates - electrodes spaced by a certain distance, and to which an alternating low-frequency voltage is applied. A boundary-value problem is obtained for the Maxwell equations, which is solved by the Green's function method. These functions are the basis for exact multipole particles and an exact electric field, which are expressed through the applied field and the matrix, which depends on the configuration of the system. The exact electric field has contributions from the applied field, the particle field and the image field of the particles. The external field, which is the superposition of the applied field in the absence of particles and the image field of the particles in the general case, is inhomogeneous and depends on the properties and configuration of the system. The average permittivity is determined by direct averaging over the entire image. The effective dielectric constant depends only on the induced dipole moments, which in turn depend on all the multipole moments of the particles and their images.*

Keywords: *spherical particle, dielectric system, multipole moment*

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЕФОРМУВАННЯ ТОНКОЇ В'ЯЗКОПРУЖНОЇ ПЛАТІВКИ

О. М. НЕЩАДИМ, кандидат фізико-математичних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

О. П. ЗІНЬКЕВИЧ, кандидат фізико-математичних наук, доцент
В. М. САФОНОВ, кандидат фізико-математичних наук, доцент
Національний університет харчових технологій
E-mail: oleksandr_neshchadym@mail.ru

Анотація. Розглядається методика розв'язування плоскої квазістатичної задачі для тонкої в'язкопружної платівки. В'язкопружне середовище підпадає під математичну модель Максвелла. Суть методики полягає у зведенні крайової задачі для квазістатичного рівняння руху в'язкопружної платівки до системи гранично-часових інтегральних рівнянь відносно деяких довільних функцій – щільностей потенціалів. Такі інтегральні рівняння містять інтеграли як за межею області, яку займає платівка так і за часовою змінною [1].

Для реалізації цієї методики використано фундаментальний розв'язок інтегро-диференціального рівняння плоскої рівноваги і виписано інтегральне представлення шуканого розв'язку крайової задачі через в'язкопружні потенціали. Такі інтеграли містять добутки фундаментального розв'язку (функцій, залежних від змінних інтегрування і параметрів – часу і координат в заданій області) на щільності потенціалів. Важливо, що зазначена інтегральна залежність зв'язує інтеграли за досліджуваною областю з потенціалами за межею цієї області. Підстановка такого інтегрального представлення шуканого розв'язку в граничну умову з урахуванням властивостей в'язкопружних потенціалів приводить до гранично-часових інтегральних рівнянь другого роду.

На практиці невідомі щільності потенціалів визначаються із системи лінійних алгебраїчних рівнянь, якою наближено замінюють одержані інтегральні рівняння. Запропоновано алгоритм розв'язування такої системи і знаходження координат точок рухомої межі області.

Ключові слова: в'язкопружність, ядро релаксації, ядро повзучості, модель Максвелла, в'язкопружний потенціал, фундаментальний розв'язок, щільність потенціалу, граничне інтегральне рівняння, ядро інтегрального рівняння

Актуальність. Необхідність розробки ефективних методів розв'язування крайових задач в'язкопружності продиктована багатьма практичними застосуваннями таких задач в техніці і фізиці. Інженери і дослідники

зацікавлені в зручних математичних методах, які дозволяють шляхом числових розрахунків моделювати прості закономірності. Серед таких методів вигідно виділяється метод потенціалів (граничних інтегральних рівнянь).

Математичні моделі багатьох прикладних задач математичної фізики зводяться до граничних інтегральних рівнянь [2-3]. При цьому межа області вважається незмінною або такою, що змінюється мало. В даній роботі розвивається метод граничних інтегральних рівнянь для розв'язування плоскої крайової задачі лінійної в'язкопружності з рухомою межею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботі [4] були отримані граничні інтегральні рівняння для початково-крайової задачі про плоскі деформації в'язкопружного циліндричного тіла максвелівського типу. Там розглядалось квазістатичне рівняння руху в'язкопружного середовища, відмінне від так званого узагальненого плоского напруженого стану.

Мета дослідження – отримати граничні інтегральні рівняння для крайової задачі про в'язкопружні деформації тонкої платівки з рухомою межею.

Матеріали та методи дослідження. Використовувались теоретичні положення математичної фізики і методи теорії потенціалів. Розглядались в'язкопружні матеріали із ядрами релаксації експонентціального виду.

Результати дослідження та їх обговорення. Розглянемо тонку в'язкопружну платівку, яка займає область $D(0)$ в площині Oy_1y_2 . Вважаємо, що матеріал платівки є однорідним, ізотропним. Довільна точка M плоскої області $D(0)$ в момент часу $\tau > 0$ визначається радіус-вектором $\vec{y}(\tau) = \vec{e}^k y_k(\tau)$, де $\{\vec{e}^1, \vec{e}^2\}$ – декартів базис. За проміжок часу $d\tau$ дана матеріальна частинка набуде деформації, що спричинить появу тензора напружень:

$$d \overset{\tau}{\Pi} = [2\lambda \overset{\tau}{E} \text{div } \vec{v}(\vec{y}(\tau), \tau) + 2 \left(k + \frac{4}{3} \mu \right) \text{Def } \vec{v}(\vec{y}(\tau), \tau)] d\tau, \quad (1)$$

де μ – миттєво-пружний модуль зсуву;

$\lambda = k - \frac{2}{3} \mu$ – миттєво-пружна стала Ламе;

k – миттєвий модуль об'ємної деформації;

$\overset{\tau}{E}$ – одиничний тензор;

$\text{Def } \vec{v}(\vec{y}(\tau), \tau) = \frac{1}{2} \left(\overset{\tau}{\nabla} \vec{v} + (\overset{\tau}{\nabla} \vec{v})^T \right)$ – тензор швидкості деформації;

$\vec{v} \equiv \vec{v}(\vec{y}(\tau), \tau)$ – вектор швидкості частинки M в момент часу τ ;

$\overset{\tau}{\nabla} = \vec{e}^k \frac{\partial}{\partial y_k}$ – оператор Гамільтона.

Внаслідок релаксації напружень в момент спостереження $t > \tau + d\tau$ тензор напружень (1) набуває вигляду:

$$d \overset{\tau}{\Pi}(t - \tau) = [2\overset{\tau}{E} \left(kh(t - \tau) - \frac{2}{3} \mu q(t - \tau) \right) \text{div } \vec{v}(\vec{y}(\tau), \tau) + \\ + 2 \left(kh(t - \tau) + \frac{4}{3} \mu q(t - \tau) \right) \text{Def } \vec{v}(\vec{y}(\tau), \tau)] d\tau. \quad (2)$$

Тут функції $q(t)$ і $h(t)$ характеризують реологічні властивості матеріалу і називаються ядрами релаксації; вони визначені за $t \geq 0$, є невід'ємними і монотонно спадними. В'язкопружним матеріалам, зазвичай, не притаманна суттєва об'ємна релаксація; тому приймається $h(t) = 0$. Вважаємо, що в'язкопружні властивості платівки узгоджуються з моделлю Максвелла:

$$q(t) = \frac{c}{\kappa} \exp\left(-\frac{t}{\kappa}\right), \quad (3)$$

де κ – час релаксації у разі зсуву, параметр $c \in [0; 1]$.

Загальне напруження в матеріальній точці M за час $0 < \tau < t$ виражається тензором:

$$\Pi(\vec{y}(t), t) = 2 \int_0^t \left\{ \overset{\tau}{E} \left[k - \frac{2}{3} \mu q(t - \tau) \right] \text{div } \vec{v}(\vec{y}(\tau), \tau) + \right. \\ \left. + \left[k + \frac{4}{3} \mu q(t - \tau) \right] \text{Def } \vec{v}(\vec{y}(\tau), \tau) \right\} d\tau. \quad (5)$$

Швидкості і зміщення частинок, що відбуваються в матеріальному тілі за період релаксації, а також похідні за координатами від зміщень до другого порядку включно вважаємо малими величинами (це можливо або у випадку малих швидкостей, або за швидких коливань із малою амплітудою). В початковий момент часу $t = 0$ тіло вважаємо вільним від напружень. Тому можемо прийняти:

$$\vec{v}(M, \tau) \approx \vec{v}(\vec{y}, \tau) \approx \frac{\partial u(\vec{y}, \tau)}{\partial \tau}, \quad \overset{\tau}{\nabla} \approx \nabla,$$

де $\vec{y} \equiv \vec{y}(t)$, $\vec{u}(\vec{y}, \tau) = \vec{e}^k u_k$ – вектор зміщення;

$(y_1, y_2; t)$ – основні незалежні змінні (змінні Ейлера).

Квазістатичне рівняння руху такого в'язкопружного середовища

$$\text{div} \Pi(\vec{y}, t) + \rho(\vec{y}, t) \vec{F}(\vec{y}, t) = \vec{0}$$

набуває наступного вигляду:

$$\left(k + \frac{4}{3} \mu \right) \Delta \vec{u}(\vec{y}, t) + 3k \cdot \text{grad} \text{div} \vec{u}(\vec{y}, t) - \frac{4}{3} \int_0^t \mu q(t - \tau) \Delta \vec{u}(\vec{y}, \tau) d\tau + \vec{f}^0(\vec{y}, t; \vec{u}) = \vec{0}, \quad (6)$$

Тут

$$\begin{aligned}\vec{f}^0(\vec{y}, t; \vec{u}) = & \left(k + \frac{4}{3} \mu \right) \rho_0 \vec{F}(\vec{y}, t) [1 - \operatorname{div} \vec{u}(\vec{y}, t)] + \\ & + k \rho_0 \int_0^t q^*(t - \tau) \vec{F}(\vec{y}, \tau) [1 - \operatorname{div} \vec{u}(\vec{y}, \tau)] d\tau,\end{aligned}\quad (7)$$

де $\vec{F}(\vec{y}, t)$ – інтенсивність масових сил;

$\rho_0 = \rho(\vec{y}, 0)$ – густина речовини;

$q^*(t) = \frac{c}{\kappa} \exp\left(\frac{c-1}{\kappa} t\right)$ – ядро зсувної повзучості.

В точках контуру $L(t)$ задано вектор напружень $\vec{p}_n(\vec{x}, t)$:

$$\vec{n} \cdot \Pi(\vec{x}, t) = \vec{p}_n(\vec{x}, t), \quad \vec{x} \in L(t), \quad t \geq 0,$$

де $\vec{n}$ – нормаль до контуру $L(t)$ в його точці $\vec{x}$.

Дану граничну умову, яка доповнює рівняння (6), запишемо в іншій формі:

$$\begin{aligned}2\left(k + \frac{4}{3} \mu\right) \operatorname{Def} \vec{u}(\vec{x}, t) + 2\lambda \vec{n} \operatorname{div} \vec{u}(\vec{x}, t) - \\ - \frac{4}{3} \mu \int_0^t q(t - \tau) \{2 \operatorname{Def} \vec{u}(\vec{x}, \tau) - \vec{n} \operatorname{div} \vec{u}(\vec{x}, \tau)\} d\tau = \vec{p}_n^*(\vec{x}, t),\end{aligned}\quad (8)$$

$$\text{де } \vec{p}_n^*(\vec{x}, t) = \left(k + \frac{4}{3} \mu\right) \vec{p}_n(\vec{x}, t) + k \int_0^t q^*(t - \tau) \vec{p}_n(\vec{x}, \tau) d\tau.$$

Із зростанням часу $t > 0$ межа $L(t)$ області $D(t)$, яку займає платівка, зміщується. Закон зміни контура $L(t)$ будемо описувати векторним рівнянням

$$\vec{x} = \vec{x}(l, t), \quad (9)$$

причому $\vec{x}(l, 0) = \vec{x}^\circ(l)$,

де $\vec{x}^\circ(l)$ – задана неперервна функція;

l – довжина контуру $L(t)$ в початковий момент часу $t = 0$ ($0 < l \leq a = \text{const}$).

При цьому довжина дуги $s(l, t)$ кривої $L(t)$ обчислюється за формулою:

$$s(l, t) = \int_0^l \left| \frac{\partial \vec{x}(l, t)}{\partial l} \right| dl.$$

Нехай $\vec{v}(l, t)$ – довільна неперервна векторна функція довжини дуги l і часу t . Розв'язок задачі (6), (8) будемо шукати у вигляді в'язкопружних потенціалів:

$$\vec{u}(\vec{y}, t) = \vec{u}[\vec{f}^0] + \sum_{k=1}^2 \vec{e}^k \int_0^t d\tau \int_{L(\tau)} \vec{v}(l, \tau) \cdot \vec{v}^{(k)}(\vec{y} - \vec{x}; t - \tau) dl, \quad (10)$$

тут

$$\vec{u}[\vec{f}^0] = \sum_{k=1}^2 \vec{e}^k \int_0^t d\tau \iint_{D(\tau)} \vec{v}^{(k)}(\vec{y} - \vec{x}; t - \tau) \cdot \vec{f}^0(\vec{x}, \tau; u) ds. \quad (11)$$

Контур $L(\tau)$ визначається поки що невідомою функцією (9). Символами $\vec{v}^{(k)}(\vec{y} - \vec{x}; t - \tau)$ позначено фундаментальний розв'язок рівняння (6), який визначається за умови $\vec{f}^0(\vec{y}, t; u) = \vec{e}^k \delta(t - \tau) \delta(\vec{y} - \vec{x})$. Скориставшись результатами [5], фундаментальний розв'язок у випадку ядра релаксації (3) можна виразити через дві скалярні функції $\omega(\vec{x}, t)$ і $\varphi(\vec{x}, t)$:

$$4\pi \vec{v}^{(1)}(\vec{x} - \vec{y}, t - \tau) = \text{rot } \vec{e}^3 \frac{\partial \omega^*(\vec{x} - \vec{y}, t - \tau)}{\partial x_2} + \text{grad } \frac{\partial \varphi^*(\vec{x} - \vec{y}, t - \tau)}{\partial x_1},$$

$$4\pi \vec{v}^{(2)}(\vec{x} - \vec{y}, t - \tau) = -\text{rot } \vec{e}^3 \frac{\partial \omega^*(\vec{x} - \vec{y}, t - \tau)}{\partial x_1} + \text{grad } \frac{\partial \varphi^*(\vec{x} - \vec{y}, t - \tau)}{\partial x_2}.$$

Ці функції мають такий вигляд:

$$4\pi \varphi^*(\vec{x}, t) = \frac{r^2(1 - \ln r)}{8\mu} \left[(1 + 3m)\delta(t) + \frac{c}{\kappa} \exp\left(\frac{c-1}{\kappa} t\right) + \frac{3cm^2}{\kappa} \exp\left(\frac{mc-1}{\kappa} t\right) \right] - \psi_0(\vec{x}, t);$$

$$4\pi \omega^*(\vec{x}, t) = \frac{r^2(1 - \ln r)}{2\mu} \left[\delta(t) + \frac{c}{\kappa} \exp\left(\frac{c-1}{\kappa} t\right) \right] - \psi_0(\vec{x}, t),$$

де

$$\psi_0(\vec{x}, t) = \frac{3r^2}{32\mu} \left[(1 - m)\delta(t) + \frac{c}{\kappa} \exp\left(\frac{c-1}{\kappa} t\right) - \frac{cm^2}{\kappa} \exp\left(\frac{mc-1}{\kappa} t\right) \right];$$

$$r = |\vec{x}|, \quad m = \mu/(3\kappa + \mu).$$

Окрім основної нерухомої декартової системи $\{\vec{e}^1, \vec{e}^2\}$ прийемо ще дві місцеві координатні системи $\{\vec{n}, \vec{s}\}$ і $\{\vec{n}_0, \vec{s}_0\}$, пов'язані відповідно із змінною $\vec{x}$ і фіксованою $\vec{x}^0$ точками гладкого контуру $L(t)$ (рис.1). Покладемо $\vec{v}(l, t) = \vec{n}v_1(l, t) + \vec{s}v_2(l, t)$ і підставимо вираз (10) в граничну умову (8); приходимо до системи інтегральних рівнянь відносно компонент шуканої векторної щільності $\vec{v}(l, t)$ потенціалу:

$$\pi v_1(l_0, t) + \int_{L(t)} \sum_{i=1}^2 v_i(l, t) K_{1i}^*(l, l_0) \left| \frac{\partial \vec{x}(l, t)}{\partial l} \right| dl +$$

$$\begin{aligned}
& + \int_0^t k^*(t-\tau) d\tau \int_{L(\tau)} \sum_{i=1}^2 \nu_i(l, \tau) k_{1i}^*(l, l_0) \left| \frac{\partial \vec{x}(l, \tau)}{\partial l} \right| dl = \psi_1^*(l_0, t), \\
& \pi \nu_2(l_0, t) + \int_{L(t)} \sum_{i=1}^2 \nu_i(l, t) K_{2i}^*(l, l_0) \left| \frac{\partial \vec{x}(l, t)}{\partial l} \right| dl + \\
& + \int_0^t k^*(t-\tau) d\tau \int_{L(\tau)} \sum_{i=1}^2 \nu_i(l, \tau) k_{2i}^*(l, l_0) \left| \frac{\partial \vec{x}(l, \tau)}{\partial l} \right| dl = \psi_2^*(l_0, t).
\end{aligned} \tag{12}$$

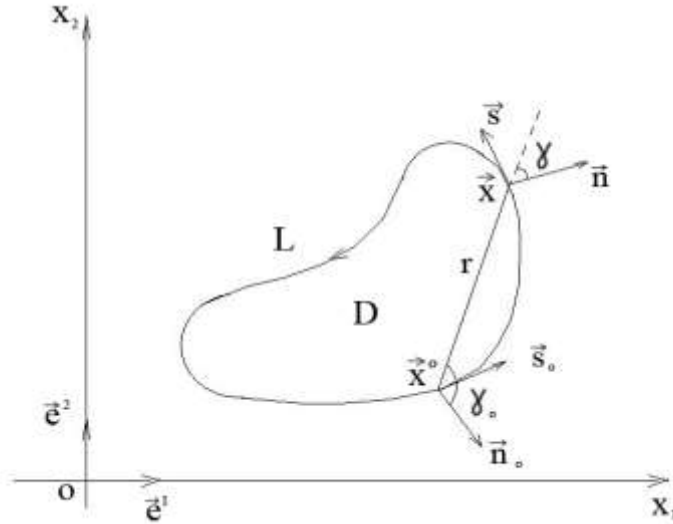


Рис. 1. Місцеві координатні системи

Ядра $K_{ij}^*(l, l_0)$ і $k_{ij}^*(l, l_0)$ в цих рівняннях та функція $k^*(t)$ мають вигляд:

$$K_{11}^*(l, l_0) = \frac{1}{r(t)} \left[\frac{3}{4}(1 - \mu^*) \cos \gamma + \cos \gamma \cos 2\gamma_0 + \frac{1}{4}(1 + 3\mu^*) \sin \gamma \sin 2\gamma_0 \right],$$

$$K_{12}^*(l, l_0) = \frac{1}{r(t)} \left[\frac{3}{4}(1 - \mu^*) \sin \gamma + \sin \gamma \cos 2\gamma_0 - \frac{1}{4}(1 + 3\mu^*) \cos \gamma \sin 2\gamma_0 \right],$$

$$K_{21}^*(l, l_0) = \frac{1}{r(t)} \left[\cos \gamma \sin 2\gamma_0 - \frac{1}{4}(1 + 3\mu^*) \sin \gamma \cos 2\gamma_0 \right],$$

$$K_{22}^*(l, l_0) = \frac{1}{r(t)} \left[\sin \gamma \sin 2\gamma_0 + \frac{1}{4}(1 + 3\mu^*) \cos \gamma \cos 2\gamma_0 \right];$$

$$k_{11}^*(l, l_0) = \frac{3\mu^*}{4r(\tau)} \cos \gamma - \sin \gamma \sin 2\gamma_0,$$

$$k_{12}^*(l, l_0) = \frac{3\mu^*}{4r(\tau)} \sin \gamma + \cos \gamma \sin 2\gamma_0,$$

$$k_{21}^*(l, l_0) = \frac{3\mu^*}{4r(\tau)} \sin \gamma \cos 2\gamma_0,$$

$$k_{22}^*(l, l_0) = -\frac{3\mu^*}{4r(\tau)} \cos \gamma \cos 2\gamma_0;$$

$$k^*(t) = \frac{3kc}{\kappa(3k + \mu)} \exp(-\beta t).$$

Тут $\mu^* = \frac{\mu}{3k + \mu}$, $\beta = \frac{3k + \mu(1-c)}{\kappa(3k + \mu)}$, $r = r(t) = |\vec{x}(l, t) - \vec{x}(l_0, t)|$, $\gamma = (\vec{r}, \hat{n})$,
 $\gamma_0 = (\vec{r}, \hat{n}_0)$.

Праві частини $\psi_1^*(l_0, t)$ та $\psi_2^*(l_0, t)$ системи рівнянь (12) є відповідно нормальною та дотичною компонентами функції:

$$\vec{\psi}^*(l_0, t) \equiv \vec{n}_0 \psi_1^*(l_0, t) + \vec{s}_0 \psi_2^*(l_0, t) = 2\pi \vec{p}_n^*(l_0, t) + \vec{g}[\vec{f}],$$

де вираз $\vec{g}[\vec{f}]$ одержується із лівої частини співвідношення (8), якщо туди підставити замість $\vec{u}$ функцію (11).

Алгоритм чисельного розв'язування одержаної системи інтегральних рівнянь другого роду (12) ґрунтується на методі “кроків за часом”. Згідно з цим методом, в кожен момент часу послідовно розв'язуються два рівняння Фредгольма другого роду відносно компонент векторної щільності $\vec{v}(l, t)$. За знайденими щільностями в момент часу $t = t_k$ обчислюються переміщення $\vec{u}(\vec{x}, t_k)$ точок межі області $D(t)$. Знаючи ці переміщення, за наближеною формулою

$$\vec{x}(l, t_{k+1}) \approx \vec{u}(\vec{x}, t_k) + \vec{x}^0(l), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

визначаються координати точок рухомої межі $L(t)$ платівки в наступний момент часу $t = t_{k+1}$. На кожному наступному кроці обчислень замість функції $\vec{u}(\vec{x}, t)$, яка міститься у виразі (7) функції $\vec{f}(\vec{x}, t; \vec{u})$, потрібно підставляти значення, обчислені в попередній момент часу.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Побудовано систему гранично-часових інтегральних рівнянь другого роду для задачі про деформування тонкої в'язкопружної платівки. Наведено вигляд ядер цих рівнянь у випадку реологічної моделі з експоненціальним ядром релаксації. Одержана система допускає покрокове (за часом) чисельне розв'язування з використанням ПК для моделювання руху межі області, яку займає платівка.

Список використаних джерел

1. Белоносов, С. М. Применение интегральных представлений к решению задач теплопроводности и динамики вязком жидкости / С. М. Белоносов, В. Г. Овсиенко, В. Я. Карачун. – К.: Выща шк., 1989. – 163 с.
2. Бенерджи, П. Методы граничных элементов в прикладных науках / П. Бенерджи, Р. Баттерфилд. – М.: Мир, 1984. – 494 с.
3. Теллес, Д. Применение метода граничных элементов для решения неупругих задач / Д. Теллес. – М.: Стройиздат, 1987. – 159 с.

4. Нещадим О. М. Граничні інтегральні рівняння для задач про плоскі деформації в'язкопружного циліндричного тіла. / О. М. Нещадим, Ю. Б. Гнучій // Науковий вісник НУБіП України. Серія "Техніка та енергетика АПК". – 2011. – Вип.166, ч. 3. – С.235–242.

5. Белоносов, С. М. Фундаментальное решение системы дифференциальных уравнений динамики вязкоупругой среды, характеризуемой моделью Максвелла. – В кн: Нелинейные дифференциальные уравнения в прикладных задачах / С. М. Белоносов, А. М. Нещадим, Ю. Н. Редкобородый. – К.: Ин-т математики АН УССР, 1984. – С.48–52.

References

1. Belonosov, S.M., Ovsienko, V. G., Karachun, V.Y. (1989). Primeneniye integral'nykh predstavleniy k resheniyam zadach teploprovodnosti i dinamiki v'yazkom zhidkosti [Application of integral representations to solutions of heat conduction problems and the dynamics of a viscous fluid]. Kyiv.: Vyshcha shkola, 163.

2. Benerdzhii, P., Batterfield R. (1984). Metody granichnikh elementov v prikladnykh naukakh [Methods of boundary elements in applied sciences]. Moscow, Mir, 494.

3. Telles, D. (1987). Primeneniye metoda granichnikh elementov dlya resheniya neuprugikh zadach [Application of the method of boundary elements to solve inelastic problems]. Moscow, Stroyizdat, 159.

4. Neshchadym, O.M., Hnuchii Y. B. (2011). Hranychni intebralni rivniannia dlia zadach pro ploski deformatsii v'iazkopruzhnoho tsylindrychnoho tila. [Boundary integral equations for problems of flat viscoelastic deformation of the cylindrical body.]. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy. Seriya "Tekhnika ta enerhetyka APK", 166 (3), 235–242.

5. Belonosov, S.M., Neshchadim, A. M., Redkoborodyy, Y. N. (1984). Fundamental'noye resheniye sistemy differentsial'nykh uravneniy dinamiki vyazkouprugoy sredy, kharakterizuyemoy model'yu Maksvela [A fundamental solution of the system of differential equations for the dynamics of a viscoelastic medium characterized by the Maxwell model.]. V kn: Nelineynyye differentsial'nyye uravneniya v prikladnykh zadachakh . Kyiv, In-t matematiki AN USSR, 48–52.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОЙ ВЯЗКОУПРУГОЙ ПЛАСТИНКИ

А. М. Нещадим, А. П. Зинькевич, В. М. Сафонов

Аннотация. Рассматривается методика решения плоской квазистатической задачи для тонкой вязкоупругой пластинки. Вязкоупругая среда подпадает под математическую модель Максвелла. Суть методики заключается в приведении краевой задачи для квазистатического уравнения движения вязкоупругой пластинки к системе предельно-часовых интегральных уравнений относительно некоторых произвольных функций – плотностей потенциалов. Такие интегральные уравнения содержат интегралы как по границе области, которую занимает пластинка, так и по переменной времени.

Для реализации этой методики используется фундаментальное решение интегро-дифференциального уравнения плоского равновесия и выписано интегральное представление искомого решения краевой задачи через вязкоупругие потенциалы. Такие интегралы содержат произведения фундаментального решения (функций, зависящих от переменных интегрирования и параметров – времени и координат в заданной области) на плотности потенциалов. Важно, что упомянутая интегральная зависимость связывает интегралы по исследуемой области с потенциалами по границе этой области. Подстановка такого интегрального представления искомого решения в граничное условие с учетом свойств вязкоупругих потенциалов приводит к предельно-часовым интегральным уравнениям второго рода.

На практике неизвестные плотности потенциалов определяются из системы линейных алгебраических уравнений, которой приближенно заменяют полученные интегральные уравнения. Предложен алгоритм решения такой системы и нахождения координат точек подвижной границы области.

Ключевые слова: *вязкоупругость, ядро релаксации, ядро ползучести, модель Максвелла, вязкоупругий потенциал, фундаментальное решение, плотность потенциала, граничное интегральное уравнение, ядро интегрального уравнения*

MATHEMATICAL MODEL OF DEFORMATION THIN VISCOELASTIC PLATE

A. Neshchadym, A. Zinkevych, V. Safonov

Abstract. *We consider the method of solving the plane problem for quasi-static viscoelastic thin plate. Viscoelastic medium is subject to the mathematical model of Maxwell. The technique consists in the construction of boundary value problem for quasi-static equations of motion of viscoelastic plate system is extremely time-integral equations for some random functions - density potential. Such integral equations containing integrals over the boundary of the domain occupied by the plate, and by the time variable.*

To implement this technique uses fundamental solution of integral-differential equation of equilibrium plane and discharged integral representation of the desired solution of the boundary problem through viscoelastic potentials. Such integrals containing products of fundamental solution (functions dependent variables and integration parameters - time and coordinates in a given area) at the potential density. It is important that the above integral dependence relates the integrals over the study area with the potential on the boundary of this region. The substitution of the integral representation of the desired solution of the boundary conditions based viscoelastic properties of potential leads to extremely time-integral equations of the second kind.

In practice, the unknown potential density determined from a system of linear algebraic equations, which replaces approximately obtained integral equations. The proposed algorithm for solving this system and finding the coordinates of points on the moving boundary.

Keywords: *viscoelasticity, kernel of relaxation, kernel of creep, model of Maxwell, viscoelastic potential, fundamental solution, density of potential, boundary integral equations, kernel of integral equation*