

**Применение теории графов
для расчетов систем электроснабжения. Кратчайший остов графа. Сеть с
наименьшей протяженностью линий электропередачи**

В.В. Козырский, Ю.Б. Гнучий, доктора технических наук

А.В. Гай, кандидат технических наук

Проведено обоснование целесообразности применения теории графов для рационализации структуры системы электроснабжения среднего класса напряжения. Осуществлен теоретико-практический поиск кратчайших остовов графа. Поставлены задачи дальнейших исследований.

Система электроснабжения, теория графов, кратчайший остов графа, сеть с наименьшей протяженностью линий электропередачи.

Теория графов является эффективным аппаратом формализации современных инженерных и научных задач, возникающих при изучении больших и сложных систем, а язык теории графов достаточно разработан и удобен. В настоящее время теория графов получила широкое практическое применение. Графы используются при анализе и проектировании систем электро-, водо-, газо-, теплоснабжения, транспортных сетей и пр. При этом особый интерес представляют решения оптимизационных задач на графах.

Можно сказать, что слова «граф» и «сеть» являются родственными, и вместо понятия граф часто используется понятие сеть. Это особенно относится к случаям, когда кроме основных чисто структурных соотношений в графе задаются некоторые количественные характеристики точек и линий, образующих граф. Такой взвешенный граф называют просто сетью.

Цель исследований — Провести анализ целесообразности использования теории графов для минимизации расстояний передачи электрической энергии в системах электроснабжения и сформировать задачи дальнейших исследований.

Материалы и методика исследований.

Введем основные определения и обозначения.

Графом G называется совокупность двух множеств – множества точек или вершин $v_1, v_2, \dots, v_n$ (которое обозначается через V) и множества линий или ребер $e_1, e_2, \dots, e_m$ (которое обозначается символом E), соединяющих между собой все или часть этих точек. Граф G полностью задается парой (V, E) . Подграфом графа $G(V, E)$ называется граф $G'(V', E')$, в котором $E' \subset E$ и $V' \subset V$.

Хотя ребра определяются как неупорядоченные пары различных вершин, удобно ребро, состоящее из вершин v_i и v_j , обозначать $e_{ij} = (v_i, v_j)$. При этом (v_j, v_i) означает то же самое ребро, что и (v_i, v_j) .

Пусть v_i, v_j – вершины, $e_{ij} = (v_i, v_j)$ – соединяющее их ребро. Тогда говорят, что вершина v_i и ребро e_{ij} инцидентны, ребро e_{ij} и вершина v_j также инцидентны. Два ребра, инцидентные одной вершине, называются смежными; две вершины инцидентные одному ребру, также называются смежными.

При решении практических задач ребрам графа G сопоставляются (приписываются) числа – ребру e_{ij} ставится в соответствие некоторое число d_{ij} , называемое весом, или длиной или стоимостью (ценой) ребра. Тогда граф G называется графом с взвешенными ребрами. Иногда веса (числа P_i) приписываются вершинам v_i графа, и тогда получается граф с взвешенными вершинами. Если в графе веса приписаны и ребрам, и вершинам, то он называется просто взвешенным.

Мы будем рассматривать взвешенные графы, где каждое ребро имеет длину d_{ij} , а вершины представляют собой электрические нагрузки P_i . На рис. 1 показана конкретная схема сети электроснабжения, иллюстрирующая таким образом взвешенный граф. Пронумерованные вершины 1,2, ..., 10 символизируют места потребления электрической энергии (потребителей), а вершина 11 соответствует питающей подстанции. В табл. 1 приведены координаты вершин и потребляемая мощность, которая является нагрузкой для подстанции, в табл. 2 длины ребер. Отметим, что общая протяженность сети составляет **42,52** км.

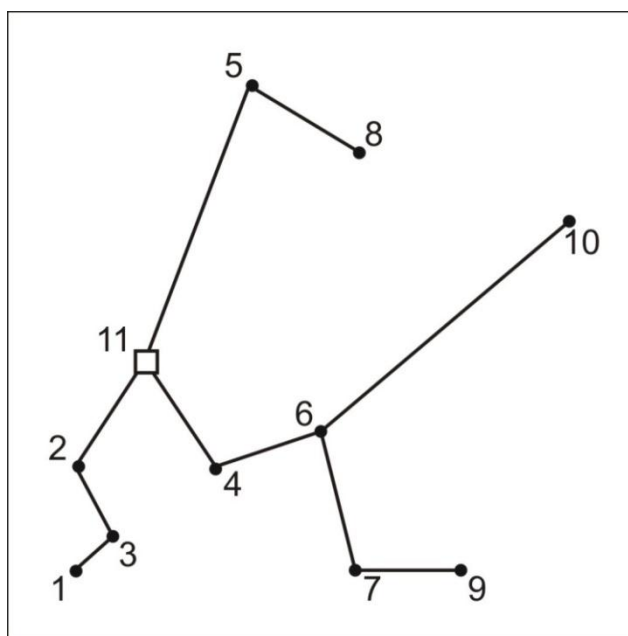


Рис. 1. Схема сети электроснабжения:

● – места потребления электрической энергии;

□ – питающая подстанция

Территориальное размещение подстанции зависит от нагрузки и расположения электропотребителей. Подстанцию необходимо размещать по возможности ближе к центрам сосредоточения нагрузок.

Приближение подстанции к нагрузкам позволяет повысить экономичность и надежность электроснабжения потребителей, так как сокращается протяженность сети, уменьшаются потери электроэнергии и отклонения напряжения, сокращаются зоны возможных аварий и пр.

1. Координаты вершин и потребляемая мощность. Координаты вершины 11 (подстанции): $x_{11} = 4$; $y_{11} = 8$

Вершины v_i	Координаты вершин: x_i ; y_i , км	Потребляемая мощность P_i , кВт	Вершины v_i	Координаты вершин: x_i ; y_i , км	Потребляемая мощность P_i , кВт
1	2; 2	750	6	9; 6	700
2	2; 5	1000	7	10; 2	800
3	3; 3	500	8	10; 14	1000
4	6; 5	250	9	13; 2	430
5	7; 16	630	10	16; 12	500

2. Длины ребер в данной электросети

Ребра (v_i, v_j)	Длины ребер d_{ij} , км	Ребра (v_i, v_j)	Длины ребер d_{ij} , км
(11,2)	3,61	(11,4)	3,61
(2,3)	2,24	(4,6)	3,16
(3,1)	1,41	(6,10)	9,22
(11,5)	8,54	(6,7)	4,12
(5,8)	3,61	(7,9)	3,00

Обычно центр электрических нагрузок определяют по таким формулам [12, 13]:

$$x_o = \frac{\sum_{i=1}^n P_i x_i}{\sum_{i=1}^n P_i} ; \quad y_o = \frac{\sum_{i=1}^n P_i y_i}{\sum_{i=1}^n P_i} , \quad (1)$$

где x_i , y_i – координаты потребителей; P_i – потребляемые мощности (электрические нагрузки); n – количество потребителей.

Для данного примера

$$x_o = \frac{750 \cdot 2 + 1000 \cdot 2 + 500 \cdot 3 + 250 \cdot 6 + 630 \cdot 7 + 700 \cdot 9 + 800 \cdot 10 + 1000 \cdot 10 + 430 \cdot 13 + 500 \cdot 16}{750 + 1000 + 500 + 250 + 630 + 700 + 800 + 1000 + 430 + 500} = 7,44;$$

$$y_0 = \frac{750 \cdot 2 + 1000 \cdot 5 + 500 \cdot 3 + 250 \cdot 5 + 630 \cdot 16 + 700 \cdot 6 + 800 \cdot 2 + 1000 \cdot 14 + 430 \cdot 2 + 500 \cdot 12}{750 + 1000 + 500 + 250 + 630 + 700 + 800 + 1000 + 430 + 500} = 7,01.$$

Если подстанцию разместить в найденном центре электрических нагрузок и провести радиус-векторы от подстанции (как из начала координат) к потребителям, то получим такую схему (рис. 2). При этом формулы (1) превращаются в условие равновесия

$$\sum_{i=1}^{10} P_i \vec{r}_i = 0, \quad (2)$$

где длина каждого радиус-вектора $\vec{r}_i$ является плечом действующей нагрузки.

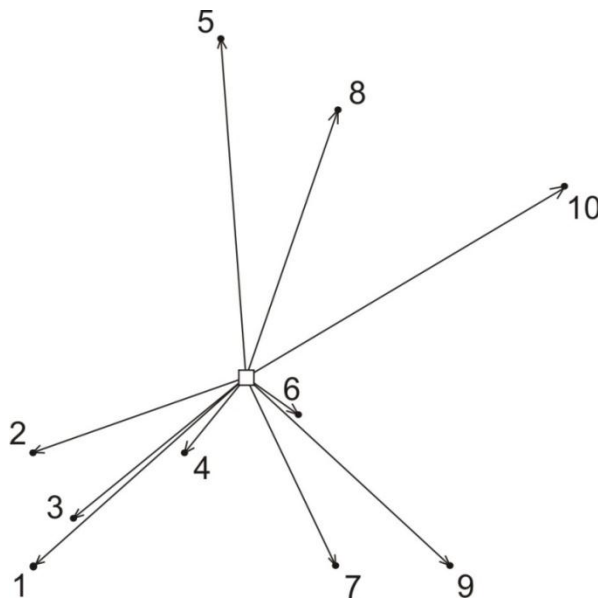


Рис.2. Размещение подстанции в центре электрических нагрузок, соответствующее условию равновесия (2)

Говоря теоретико-графовым языком, мы имеем направленный взвешенный граф, а точнее звездообразное дерево, в котором все ребра имеют одну общую вершину. Или, другими словами, звезда имеет только одну неконцевую вершину.

Такая упрощенная схема, где к каждому потребителю требуется отдельное соединение с подстанцией, на практике применяется редко.

Обычно сеть представляет собой более сложную графовую структуру, и обобщением центра электрических нагрузок будут различные центры графов, учитывающие эту структуру.

В теории графов [1, 2] маршрутом называется чередующаяся последовательность вершин и ребер $v_0, e_1, v_1, e_2, v_2, \dots, e_k, v_k$, в которой любые два соседних элемента инцидентны. Если $v_0 = v_k$, то маршрут замкнут, иначе открыт. Если все ребра различны, то маршрут называется цепью. Если все вершины (а значит, и ребра) различны, то маршрут называется простой цепью или путем. В цепи $v_0, e_1, v_1, e_2, v_2, \dots, e_k, v_k$ вершины v_0 и v_k называются концами цепи. Говорят, что цепь с концами v_i и v_j соединяет вершины v_i и v_j . Очевидно, что если есть цепь, соединяющая вершины v_i и v_j , то есть и простая цепь, соединяющая эти вершины. Замкнутая цепь образует цикл. Граф без циклов называется ациклическим или лесом.

Две вершины в графе связаны, если существует соединяющая их (простая) цепь. Граф, в котором все вершины связаны, называется связным. Любой общий граф можно разбить на подграфы, каждый из которых окажется связным. Такие связные подграфы называются компонентами связности. Связный ациклический граф называется деревом. Таким образом, компонентами связности леса являются деревья. Дерево с n вершинами имеет $m=n-1$ ребер.

Остовным деревом графа G (или просто остовом) называется подмножество ребер множества E , которые создают дерево, содержащее все вершины V . Можно сказать, что остов определяется множеством ребер, поскольку вершины остова суть вершины графа. Связный граф может иметь много остовов.

В случае взвешенных графов особый интерес представляют минимальные остовные деревья, т.е. остовные деревья с минимальной суммой весов ребер. Минимальное остовное дерево графа определяет

подмножество ребер с минимальным весом, которое удерживает граф в одной компоненте связности.

Минимальные остовные деревья (кратчайшие остовы графов) позволяют решить задачу, в которой требуется соединить множество точек (представляющих различные объекты) наименьшим объемом дорожного полотна, проводов, труб и т.п. Задача построения минимального остовного дерева является одной из основных задач проектирования сетей.

В рассматриваемом примере на рис. 1 мы имеем остовное дерево, однако этот остов может не быть кратчайшим.

Любое дерево – это в сущности, наименьший (по количеству ребер) возможный связный граф, в то время как минимальное остовное дерево является наименьшим связным графом по весу ребер. Минимальное остовное дерево имеет наименьшую протяженность из всех возможных остовных деревьев, но граф может содержать несколько минимальных остовных деревьев. Более того, все остовные деревья невзвешенного графа (или графа со всеми ребрами одинакового веса) являются минимальными остовными деревьями, т.к. каждое из них содержит ровно $n-1$ ребер. Такое остовное дерево можно построить с помощью алгоритма обхода в глубину или в ширину. Найти минимальное остовное дерево в взвешенном графе труднее. Тем не менее, задача построения кратчайшего остова графа является одной из немногих задач теории графов, которые можно считать полностью решенными. Известны различные способы построения минимального остовного дерева. Это алгоритмы Прима, Краскала, Борувки и др. [3 – 9].

Результаты исследований. Алгоритм Прима строит минимальное остовное дерево по одному ребру, находя на каждом шаге ребро, которое присоединяется к единственному растущему дереву. Алгоритм Краскала также строит кратчайший остов, добавляя к нему по одному ребру, но в отличие от алгоритма Прима, он отыскивает ребро, которое соединяет два дерева в лесу, образованном растущими поддеревьями кратчайшего остова. Построение начинается с вырожденного леса из V деревьев (каждое

состоящее из одной вершины), а затем выполняется операция объединения двух деревьев (самыми короткими ребрами), пока не останется единственное дерево – кратчайший остов.

На рис. 3 показано пошаговое выполнение алгоритма Краскала для нашего примера. Разобщенный лес поддеревьев кратчайшего остова постепенно объединяется в единственное дерево.

Алгоритм Краскала наращивает связные компоненты вершин, создавая в конечном счете минимальное остовное дерево. Первоначально каждая вершина является отдельной компонентой будущего дерева. Алгоритм последовательно ищет ребро для добавления в изменяющийся лес путем поиска самого короткого ребра среди всех ребер, соединяющих два дерева в лесу. Пусть T_α и T_β – два произвольных дерева, полученных путем добавления ребер при построении кратчайшего остова. Если символ T_α использовать также для обозначения множества вершин данного дерева, то Δ_{ij} может быть определено как кратчайшее из расстояний между вершинами из T_α и вершинами из T_β , т.е.

$$\Delta_{ij} = \min_{v_i \in T_\alpha} \min_{v_j \in T_\beta} d(v_i, v_j), i \neq j. \quad (3)$$

При выполнении алгоритма проверяется, не находятся ли обе конечные точки ребра Δ_{ij} в одной и той же связной компоненте. В случае положительного результата проверки такое ребро отбрасывается, т.к. добавление его создало бы цикл в будущем дереве. Если же конечные точки находятся в разных компонентах, то ребро принимается и соединяет две компоненты в одну. Так как каждая связная компонента всегда является деревом, то выполнять явную проверку на цикл нет необходимости.

Корректность алгоритма Краскала строго доказана и сформулирована в виде соответствующей теоремы [10].

или же матрицей инцидентности

	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9
v_1	1								
v_2		1							
v_3	1	1			1				
v_4				1	1				
v_5						1			
v_6				1			1		1
v_7			1				1		
v_8						1		1	1
v_9			1						
v_{10}								1	

В этой матрице ребра пронумерованы в порядке их образования в алгоритме Краскала.

Длины ребер построенной кратчайшей сети приведены в табл.3. Общая протяженность линий электропередачи составляет **35,53** км.

3. Длины ребер кратчайшей сети

Ребра (v_i, v_j)	Длины ребер d_{ij} , км	Ребра (v_i, v_j)	Длины ребер d_{ij} , км
(6,4)	3,16	(6,8)	8,06
(4,3)	3,61	(8,5)	3,61
(3,1)	1,41	(8,10)	6,32
(3,2)	2,24	(6,7)	4,12
		(7,9)	3,00

Выводы

В результате применения теории графов для рационализации структуры системы электроснабжения при неизменном составе, месторасположения и величинах установленной мощности потребителей, базируясь на теоретико-практическом поиске кратчайших остовов графа, было сокращена протяженность линий электропередачи на 7 км (на 16,5%). Таким образом, используя этот метод можно оптимизировать структуру как

новопроектируемых электрических сетей, так и существующих при необходимости структурной реконструкции.

Список литературы

1. Харари Ф. Теория графов / Харари Ф. –М.: Мир, 1973. – 304 с.
2. Басакер Р. Конечные графы и сети / Басакер Р., Саати Т. –М.: Наука, 1974. – 368 с.
3. Свами М. Графы, сети и алгоритмы / Свами М., Тхуласираман К. –М.: Мир, 1984. – 456 с.
4. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах / Майника Э. –М.: Мир, 1981. – 328 с.
5. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Кристофидес Н. –М.: Мир, 1978. – 432 с.
6. Пападимитриу Х., Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Пападимитриу Х., Стайглиц К. – М.: Мир, 1985. – 512 с.
7. Скиена С. Алгоритмы. Руководство по разработке / Скиена С. – СПб.: БХВ – Петербург, 2011. – 720 с.
8. Алгоритмы: построение и анализ / Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2005. – 1296 с.
9. Седжвик Р. Алгоритмы на C++ / Седжвик Р. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2011. – 1056 с.
10. Андерсон Дж. Дискретная математика и комбинаторика / Андерсон Дж. –М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. – 960 с.
11. Основы электротехники / под ред. К.А. Круга. – М.-Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1952. – 432 с.
12. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: в 2 кн. / под общ. ред. А.А. Федорова и Г.В. Сербиновского. – М.: Энергия, 1973. – Кн. 1. Проектно-расчетные сведения.– 520 с.
13. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: в 2-х кн. / под общ. ред. А.А. Федорова и Г.В. Сербиновского. – М.: Энергия, 1973. – Кн. 2. Проектно-расчетные сведения. – 520 с.

Проведено обґрунтування доцільності застосування теорії графів для раціоналізації структури системи електропостачання середнього класу напруги. Здійснено теоретико-практичний пошук найкоротших остовів графа. Поставлені завдання подальших досліджень.

Система електропостачання, теорія графів, найкоротший остов графа, мережа з найменшою протяжністю ліній електропередачі.

The justification of the usefulness of the graph theory to rationalize the structure of a medium-voltage power supply. Carried out theoretical and practical search shortest cores graph. Set targets for further research.

Power supply system, graph theory, the shortest skeleton graph, the network with the least length of transmission lines.

12. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: в 2-х кн. / под общ. ред. А.А. Федорова и Г.В. Сербиновского. – М.: Энергия, 1973. – Кн. 2. – 584 с.

13. Харари Ф. Теория графов / Харари Ф. – М.: Мир, 1973. – 304 с.

Проведено обґрунтування доцільності застосування теорії графів для раціоналізації структури системи електропостачання середнього класу напруги. Здійснено теоретико-практичний пошук найкоротших остовів графа. Поставлені завдання подальших досліджень.

Система електропостачання, теорія графів, найкоротший остов графа, мережа з найменшою протяжністю ліній електропередачі.

The justification of the usefulness of the graph theory to rationalize the structure of a medium-voltage power supply. Carried out theoretical and practical search shortest cores graph. Set targets for further research.

Power supply system, graph theory, the shortest skeleton graph, the network with the least length of transmission lines.

УДК 536 (075.8)

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭНТРОПИИ

***А.А Долинский, академик, доктор технических наук
Институт технической теплофизики НАН Украины***

***Б.Х. Драганов, доктор технических наук
Национальный университет биоресурсов
и природопользования Украины***

На основе метода статистической физики дана общая характеристика энтропии. Проанализированы вопросы: функция распределения ансамблей; распределение Максвелла-Больцмана; распределение Бозе-Ейнштейна и Ферми-Дирака; Гамильтова теория ансамблей. Рассмотрена связь между микроскопическим поведением среды и макроскопическим законом, соотношение Больцмана и связь энтропии с вероятностью событий. Приведены основы энтропии динамических систем, информационная энтропия; энтропия эволюционных и биологических систем.

Теория ансамблей, функция распределения, информационная энтропия, энтропия флуктуации, энтропия тепловой устойчивости, энтропия эволюции жизни.

Энтропия служит мерой неравновесности, т.е. беспорядка, имеющего место во всех явлениях природы: физико-химических, технических, биологических и т.п. Установив степень генерации энтропии и, тем

© А.А. Долинский, Б.Х. Драганов, 2013

самим, величину потерь энергии, определяют путь их уменьшения. Наибольшую информации энтропии дает метод, основанный на статистической физике.

Цель исследований – анализ энтропии с позиции статистической физики; приведение функциональные зависимости для энтропии: вероятностных, информационных, динамических систем; изложение основы энтропии эволюционных и биологических систем.

Материалы и методика исследований. Изучению энтропии, как меры необратимости реально протекающих явлений посвящены работы Р. Каузуса, У. Томсона, Л. Больцмана, Дж.У. Гиббса и др. Однако, заслуживает внимания всесторонний анализ ряда вопросов, характерных для энтропии (функция распределения; энтропия Колмогорова; информационная энтропия; энтропия эволюции), с позиции статистической физики.

Результаты исследования. С точки зрения статистической физики равновесное состояние соответствует максимальной хаотичности системы, т.е. состоянию, реализуемому наибольшим числом возможных микросостояний. Если система находится в равновесном состоянии, то ее макросостояние не меняется, но микроскопические переменные, характеризующие отдельные частицы, могут меняться, но так, чтобы макроскопические системы оставались неизменными.

Функция распределения – это способ конкретизации статических свойств ситуации, в которой возможны случайные события. Иными словами, функция распределения есть способ конкретизации данного макроскопического состояния системы, в которой происходят случайные события; микросостояния, дающие данное макросостояние. Функция распределения связана с энтропией соотношением Больцмана, которое записано в форме:

$$S = -k \sum_v f_v \ln f_v, \quad (1)$$

где f_v – функция распределения, представляющая собой плотность вероятности v -го квантового состояния системы. Суммирование ведется по всем допустимым квантовым состояниям.

Состояние частицы (молекулы) с определенной энергией ε_i может характеризоваться, помимо этой энергии, также и иными признаками или свойствами, проявляющимися, например, под действием каких-либо внешних полей.

Исходя из терминологии квантовой механики, в молекуле возможно существование нескольких уровней энергии g_i с одной и той же (или почти одной и той же) энергией ε_i .

Максвелловское распределение скоростей при поступательном движении молекул идеального газа вытекает как частный случай из более общего распределения молекул идеального газа по энергиям в равновесной молекулярной системе, известного как закон распределения Максвелла-Больцмана (МБ-распределение):

$$N_i = g_i e^{\frac{\mu - \varepsilon_i}{\Theta}} ; \quad (2)$$

$$N = \sum_i g_i e^{\frac{\mu - \varepsilon_i}{\Theta}} ; \quad (3)$$

$$U = \sum_i \varepsilon_i g_i e^{\frac{\mu - \varepsilon_i}{\Theta}} ; \quad (4)$$

где N_i – число молекул, обладающих энергией ε_i ; N – общее число молекул; Θ – статистическая температура, выраженная в единицах энергии, $\Theta = kT$; μ – химический потенциал газа, отнесенный к одной молекуле – величина, заданная для газа в целом и от значения i не зависящая; g_i – кратность вырождения энергетического уровня ε_i .

МБ-распределение устанавливает важную связь между внутренней энергией идеального МБ-газа и температурой как параметра, усредняющего значение энергии по всем микросостояниям системы. Этот вывод остается справедливым и при переходе от МБ-статистики к «более правильным» квантовым статистикам Бозе-Эйнштейна (БЭ-статистика) и Ферми-Дирака (ФД-статистика).

Температура, ниже которой газ перестает подчиняться МБ-распределению и переходит к распределениям Бозе-Эйнштейна или Ферми-Дирака называется температурой вырождения газа T_B , а сам газ называется вырожденным.

В методе анализа ансамблей вместо одной системы рассматривается совокупность систем, обладающих теми же параметрами, что и заданная система, но отличных от нее по микросостоянию.

При исследовании ансамблей делается допущение, что системы ансамбля статистически независимы. Метод Гиббса заключается в том, что вместо того, чтобы следить за изменением состояния данной системы, следует представить себе множество таких систем, находящихся в различных микросостояниях, но дающих в ансамбле одно макросостояние.

Функция распределения f_v ансамбля систем представляет собой плотность вероятности не для одной системы, как это было ранее, а для ансамбля системы.

Функция f_v выражает вероятность того, что система находится в квантовом состоянии, характеризующемся квантовыми числами $v_1, v_2, \dots, v_\Phi$, где Φ – число степеней свободы каждой частицы, входящей в систему. Каждое квантовое состояние системы есть ее определенное микросостояние. Из функции распределения ансамбля Гиббса вытекает БМ-распределение для идеального газа.

Основное соотношение, связывающее функцию распределения f_v ансамбля систем с термодинамическими свойствами макросостояния, было дано Больцманом. Оно связывает энтропию системы S (а через нее и остальные параметры системы) с функцией распределения f_v посредством уравнения

$$S = -k \sum_v f_v \ln f_v \quad (5)$$

при условии

$$\sum_v f_v = 1; \quad \sum_v f_v E_v = U, \quad (6)$$

где E_v – полная энергия системы в v -ом квантовом состоянии; U – внутренняя энергия системы.

Энтропия W разных микросостояний (W – термодинамическая вероятность) системы имеет вид:

$$S = -k \sum_v \frac{1}{W} \ln \frac{1}{W} = k \ln W. \quad (7)$$

Следовательно, энтропия S системы – это мера степени беспорядка системы.

Можно сделать вывод, что общность микроскопических движений в различных средах заключается не только в том, что они всегда хаотичны, но и в том, что закон, описывающий распределение вероятностей, аналогичен для всех анализируемых тел.

В классической механике состояние системы точечных частиц принято описывать координатами $q_1, \dots, q_s$, и импульсами $p_1, \dots, p_s$. Особо важную роль играет энергия системы, записанная в этих переменных.

Обычно она имеет вид

$$H = E_k(p_1, \dots, p_s) + V_n(q_1, \dots, q_s), \quad (8)$$

где первый член зависит только от импульсов и является кинетической энергией, а второй зависит только от координат и соответствует потенциальной энергии.

Основная идея введения понятия ансамбля состоит в том, чтобы вместо одной динамической системы, как это принято в гамильтоновой системе, рассматривать множество систем, соответствующих одному и тому же гамильтониану. Гиббсовский ансамбль можно представить в виде множества точек в фазовом пространстве. Эволюцию состояния системы в функции времени принято определять с помощью функции Гамильтона $H = p(q, p)$. Отметим, что гамильтонова функция используется в классическом вариационном исчислении для представления эйлеровского уравнения движения механических систем в канонической форме.

Величины p и q удовлетворяют уравнение движения:

$$\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p}; \dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q}. \quad (9)$$

Введем обобщенный вектор тока в фазовом пространстве $\vec{J} = (\dot{q}, \dot{p})$.

Из уравнения (8) следует, что

$$\text{div } \vec{J} = \frac{\partial \dot{q}}{\partial q} + \frac{\partial \dot{p}}{\partial p} \equiv 0, \quad (10)$$

т.е. фазовая жидкость не сжимается.

Дифференциальной формой закона сохранения числа частиц является уравнение непрерывности в фазовом пространстве:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \text{div}(Jf) = 0,$$

или, с учетом условий,

$$\frac{\partial f}{\partial t} + q \frac{\partial f}{\partial q} + p \frac{\partial f}{\partial p} = 0. \quad (11)$$

Уравнение (11) называется уравнением Лиувилля. В нем компоненты тока $\vec{J} = (\dot{q}, \dot{p})$ выражены как функции p, q (и, возможно, t). Следующее замечание существенное: уравнение (11) не содержит никакой другой информации, кроме той, которая следует из уравнения движения (9). Это следует из свойств уравнений в частных производных первого порядка. Решение уравнения (11) может быть записано в виде:

$$f(q, p, t) = q_0(q, p, t), \quad p_0 = p_0(q, p, t), \quad (12)$$

где связь между (q_0, p_0) и (q, p) определяется из (7), а $f_0 = f_0(q_0, p_0) = f(t=0)$ – начальное условие.

Пусть $f(q, p, t)$

$$\frac{dS[f]}{dt} = 0, \quad (13)$$

где

$$S[f] = - \int f \ln f dp dq. \quad (14)$$

Выражение (13) определяется из (14) дифференцированием:

$$\frac{dS[f]}{dt} = \int (1 - \ln f) \frac{df}{dt} dp dq. \quad (15)$$

Поскольку согласно уравнению Лиувилля $\frac{df}{dt} = 0$. Следует, что энтропия, определенная по функции распределения f не меняется со временем.

Анализируя связь между микроскопическим поведением среды и макроскопическими законами термодинамики, Больцман ввел свое знаменитое соотношение, связывающее энтропию и вероятность.

$$S = k \ln W, \quad (16)$$

где W – статическая масса состояния, описываемая функцией распределения f ; k – постоянная Больцмана. Детальное обсуждение и доведение формулы (14) были даны Еренфестом. Дальнейшее развитие различных отраслей науки (статистической физики, теории информации и др.) подтверждают ту глубину познания природы, которая заложена в формуле Больцмана.

Из информационной трактовки энтропии могут быть определены распределения статистической физики: канонические распределения Гиббса, т.е. распределения, которые соответствует максимальному значению информации.

А.Эйнштейн, применяя идею Больцмана наоборот, предложил формулу для оценки вероятности флуктуации термодинамических величин:

$$P(\Delta s) = Z e^{k/\Delta s}, \quad (17)$$

где Δs – изменение энтропии, связанное с флуктуацией относительно состояния равновесия; Z – нормированная постоянная, которая обеспечивает сумму всех вероятностей равной единице.

К вероятностным явлениям следует отнести явления флуктуации термодинамических величин, вызванные случайным движением молекул. Устойчивость термодинамического процесса, например, тепловая устойчивость также подчиняется вероятностным законам.

Для определения вероятности флуктуации необходимо получить значение изменения энтропии. В данном случае изменение энтропии определяется членами второго порядка.

Условие тепловой устойчивости состояния равновесия:

$$\frac{1}{2} \delta^2 S = -\frac{c_v (\delta T)^2}{2T^2} < 0. \quad (18)$$

Это условие требует, чтобы теплоемкость $c_v > 0$. Следует, что состояние равновесия устойчиво к тепловым флуктуациям, если теплоемкость при постоянном объеме положительна. В противном случае, т.е. теплоемкость отрицательна, система не находится в устойчивом равновесии.

Одно из существенных направлений метода энтропийного анализа относится к теории информации и вероятности, разработанной А.М. Колмогоровым, который, используя основные положения теории информации, ввел понятие энтропийной теории динамических систем,

называемую также K -энтропия, которая обозначается через h . Формальное определение типичной для различных физических ситуаций K -системы заключается в следующем: это гаммельтоновая система, в которой

$$h > 0. \quad (19)$$

Приведем основные свойства K -энтропии.

1. Энтропия h определяет скорость изменения энтропии S в динамическом процессе изменения траектории в фазовом пространстве.
2. Энтропия h , инкремент локальной неустойчивости h_0 и временных корреляций h_c являются величинами одного порядка:

$$h \sim h_0 \sim h_c. \quad (20)$$

Тем самым раскрывается физический смысл K -энтропии.

3. Энтропия h является метрическим инвариантом системы, т.е. ее величина не зависит от способа разделения фазового пространства.
4. Системы, имеющие одинаковые значения энтропии h , в определенном смысле изоморфны друг другу, то есть статистические законы движения у таких систем должны быть одинаковыми.

Понятие энтропии можно применить и к термодинамическим неравновесным состояниям, если отклонение от термодинамики равновесия невелики и можно ввести представление о локальном термодинамическом равновесии в малых, но еще макроскопических объемах. В целом энтропия неравновесной системы равна сумме энтропий ее частей, находящихся в локальном равновесии.

Термодинамика неравновесных процессов позволяет более детально исследовать процесс роста энтропии и вычислить количество энтропий, образующихся в единице времени вследствие отклонения от термодинамического равновесия.

Статистическая физика связывает энтропию с вероятностью осуществления этого макроскопического состояния системы. Энтропия определяется через логарифм статистического веса Ω приведенного равновесного состояния:

$$S = k \ln \Omega(E, N), \quad (21)$$

где $\Omega(E, N)$ – число квантомеханических уровней в узком интервале энергии ΔE вблизи значения энергии E системы из N частиц, в классической статистической физике; Ω – величина объемов в фазовом пространстве системы при заданных E и N .

Впервые связь энтропии с вероятностью состояния системы было установлено Больцманом. Эволюция замкнутой системы осуществляется в направлении наиболее вероятного распределения энергии по отдельным подсистемам. Статистическая физика рассматривает особый класс процессов – флуктуации, при которых система переходит в менее вероятное положение, и ее энтропия уменьшается. Наличие флуктуации показывает, что закон возрастания энтропии выполняется только в среднем для большого промежутка времени.

Энтропия в статистической физике тесно связана с информационной энтропией, которая является мерой неопределенности сообщений (сообщения описываются множеством величин $X_1, X_2, \dots, X_n$ и вероятностей $P_1, P_2, \dots, P_n$ появления этих величин в сообщении). Для определенного (дискретного) статистического распределения вероятностей P_k информационной энтропией называют величину

$$S_k = -\sum_{k=1}^n P_k \ln P_k \quad \text{при} \quad \sum_{k=1}^n P_k = 1. \quad (22)$$

$S_k = 0$, если количество из P_k равно единице, а остальные – нулю, т.е., информация достоверная, неопределенность отсутствует. Энтропия принимает наибольшее значение, когда все P_k одинаковы (неопределенность в информации максимальная). Информационная энтропия, как и термодинамическая, обладает свойством адитивности. Из вероятностной трактовки информационной энтропии могут быть выведены основы распределения статистической физики: каноническое распределение Гиббса, соответствующее максимальному значению информационной энтропии.

Энтропия эволюционных процессов. В качестве движущей силы эволюции следует рассматривать энергетическую диссипацию. Несмотря на повышение уровня организации и сложности живых систем, с течением времени происходит ускорение биологической эволюции – каждая новая ступень функциональной организации несет в себе зародыш дальнейшей эволюции.

Рассматриваемые системы являются сложноорганизованными, к тому же обладающими иерархической структурой. Это характерно также для случайных изменений, в том числе и эволюции, которые следует рассматривать как каскад дискретных эпизодов – бифуркаций, каждый из которых приводит к появлению более сложного или более абстрактного иерархического уровня в данной динамической системе.

Информация порождается не только каскадом бифуркаций, приводящих к нарушению симметрии, но и последовательными итерациями, приводящими ко все более тонкому разрешению. Именно такие флуктуации по существу и ответственны за новую информацию, порождаемую эволюционирующей иерархической системой.

Собственно синтез информации реализуется тогда, когда индивидуальным взаимодействиям элементов системы между собой и случайности их поведения можно сопоставить детерминированную однозначную величину – энтропию.

Жизнь принципиально связана с иерархическим синтезом случайностей, причем для каждой последующей ступени иерархии синтезируются свои условия, отличные от условий на предыдущих ступенях. В результате к энтропии, описывающей число возможных состояний системы на предыдущем уровне иерархии, добавляется энтропия, создаваемая новыми состояниями, которые регулируют новые условия. Поэтому возникновение жизни и ее эволюция в сторону более высоко

организованных форм есть процесс иерархического увеличения суммарной энтропии. Иерархия синтеза информации и есть эволюция жизни.

Энтропия эволюции к-го вида существа записывается так:

$$S_k = S_{k,ген} + S_{k,сам}, \quad (23)$$

где $S_{k,ген}$ – сумма меры генетической информации; $S_{k,сам}$ – мера информации о процессах самоорганизации, для которых свойства элементов системы создает величина $S_{k,ген}$.

Для живых существ, развитие которых было обусловлено селекцией, в правой части уравнения следует добавить $S_{k,сел}$ – меру информации вследствие селекционной деятельности.

Для эволюции жизни важно отношение количества генетической информации для двух последовательных ступеней иерархии синтеза информации. Назовем ценностью генетической информации число Z_k , показывающее, во сколько раз уменьшается количество информации при переходе к следующей ступени иерархии синтеза информации:

$$Z_k = S_{(k+1),ген} / S_{k,ген}. \quad (24)$$

Превышение диссипации над производством энергии, если и возможно то, как единичная случайность. Однако на этапах возникновения жизни появляется принцип развития, обеспечивающий избыточность производства энергии по сравнению с потребностями в ней. Происходящая при этом концентрация энергии используется в качестве основы для синтеза генетической информации.

Выводы

Энтропия охватывает все аспекты превращения вещества: изменения энергии, объема и химического потенциала. Следовательно, любая система в природе, живая или неживая, характеризуется энтропией. Все явления являются неравновесными, вероятностными и, следствие этого, их необходимо исследовать с позиции статистической физики.

Список литературы

1. Абрикосов А.А. Методы квантовой теории поля в статистической физике / А.А. Абрикосов, А.П. Горьков, И.Е. Дзялошинский. – М.: Физмат, 1962. – 446 с.
2. Ансельм А.И. Основы статистической физики и термодинамики / А.И. Ансельм. – М.: Физмат, 1973. – 424 с.
3. Арнольд Н.И. Математические методы классической механики / А.И. Арнольд. – М.: Наука, 1974. – 431 с.
4. Atkins P.W. Physical Chemistry. – N. Y.: W. N. Freeman. 1990. – 411 ed.
5. Драганов Б.Х. Иерархические системы и эволюционные процессы / Б.Х. Драганов. // Пром. теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 3. – С. 89 – 91.

6. Glansdorf P., Prigogine I. Thermodynamics of Structure, Stability and Fluktnations – N.Y.: Wiley, 1971.
7. Колмогоров А.Н. ДАН СССР / А.Н. Колмогоров. – М., 1958. – Т.118. – 861с.
8. Колмогоров А.Н. ДАН СССР / А. Н. Колмогоров. – М.,1959. – Т.124. – 754с.
9. Prigogine I. Etude Thermodynamique des Procceses Irreversibles. – Liege Desover, 1947.
10. Никульшин Р.К. Термодинамические основы и методы получения низких температур в холодильной и криогенной технике / Р.К. Никульшин, Т.В. Морознюк. Одесса: «Холодильная техника и технология», 1999. – 140 с.
11. Nicolis G., Prigogine I. Organization in Nohequilibrium Systems. – N.Y.: Wiley, 1977.
12. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до дисепативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди; пер. с англ. Ю.А. Данилова и В.В. Белого. – М.: Мир, 2002. – 460 с.
13. Prigogine I., Stengers I. Order Out of Chuos. – N.Y.: Bantman 1994.
14. Salomon P., Sieniutycz T. Extended Thermodynamics Systems. – N.Y.: Tailor & Francis, 1992.

На основі методу статистичної фізики наведено загальну характеристику ентропії. Проаналізовано питання: функція розподілу ансамблів; розподіл Максвелла-Больцмана; розподіл Бозе-Ейнштейна та Фермі-Дірака; Гамільтова теорія ансамблів. Розглянуто зв'язок між мікроскопічними поведінкою середовища і макроскопічними законом, співвідношення Больцмана і зв'язок ентропії з імовірністю подій. Наведено основи ентропії динамічних систем, інформаційна ентропія; ентропія еволюційних і біологічних систем.

Теорія ансамблів, функція розподілу, інформаційна ентропія, ентропія флуктуації, ентропія теплової стійкості, ентропія еволюції життя.

Based on the method of statistical physics, overviews of entropy. Analyzed issues: the distribution function ensembles, the Maxwell-Boltzmann distribution of Bose-Einstein's and Fermi-Dirac theory Gamiltova ensembles. The connection between the microscopic and the macroscopic behavior of the environment law, the ratio of the Boltzmann entropy and communication with the probability of events. The foundations of the entropy of dynamical systems, information entropy, entropy and evolution of biological systems.

The theory of ensembles, the distribution function, information entropy, entropy fluctuations, the entropy of thermal stability, the entropy evolution of life.

ПЕРВИЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

Л.С. Червинский, доктор технических наук

На основе биофизики проанализированы первичные механизмы действия энергии оптического излучения на структуры биологических объектов.

Энергия, оптическое излучение, биологические структуры, механизм действия.

В современном технотронном развитии человеческого общества все большее влияние оказывают на жизнь биологических организмов различные электромагнитные излучения. Поэтому, изучение и анализ механизмов их воздействия является актуальной задачей.

Цель исследований – изучение первичных механизмов взаимодействия фотонов оптического излучения со структурами биологических объектов, используя законы биофизики и квантовой механики.

Материалы и методика исследований изложены на основе использования положений системного анализа.

Результаты исследований. Взаимодействие электромагнитного излучения (ЭМИ) оптического диапазона с биологическими объектами проявляется как в волновых, так и в квантовых эффектах, вероятность формирования которых изменяется в зависимости от длины волны. При оценке эффективности действия ЭМИ оптического диапазона наряду с такими закономерностями его волнового распространения, как отражение, рассеяние и поглощение, необходимо также учитывать корпускулярные эффекты – фотохимический, фотоэлектрический, фотолитический и др.

Основой механизма фотобиологического действия ЭМИ оптического диапазона является поглощение энергии световых квантов (фотонов) атомами и молекулами биологических структур (*закон Гротгуса—Дрейпера*), в результате которого образуются электронно-возбужденные состояния этих молекул с переносом энергии кванта (внутренний фотоэффект). При этом происходит электролитическая диссоциация и ионизация биологических молекул.

Характер и интенсивность первичных фотобиологических реакций определяется энергией квантов оптического излучения. В инфракрасной области энергии фотонов $[(1,6-2,4) \cdot 10^{-19} \text{ Дж}]$ достаточно только для увеличения энергии колебательных процессов биологических молекул. Видимое излучение, энергия фотонов которого составляет $(3,2-6,4) \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, способно вызвать их электронное возбуждение и фотолитическую

диссоциацию. Наконец, кванты ультрафиолетового излучения с энергией $(6,4-9,6) \cdot 10^{-19}$ Дж вызывают ионизацию молекул и разрушение водородных связей (рис.1).

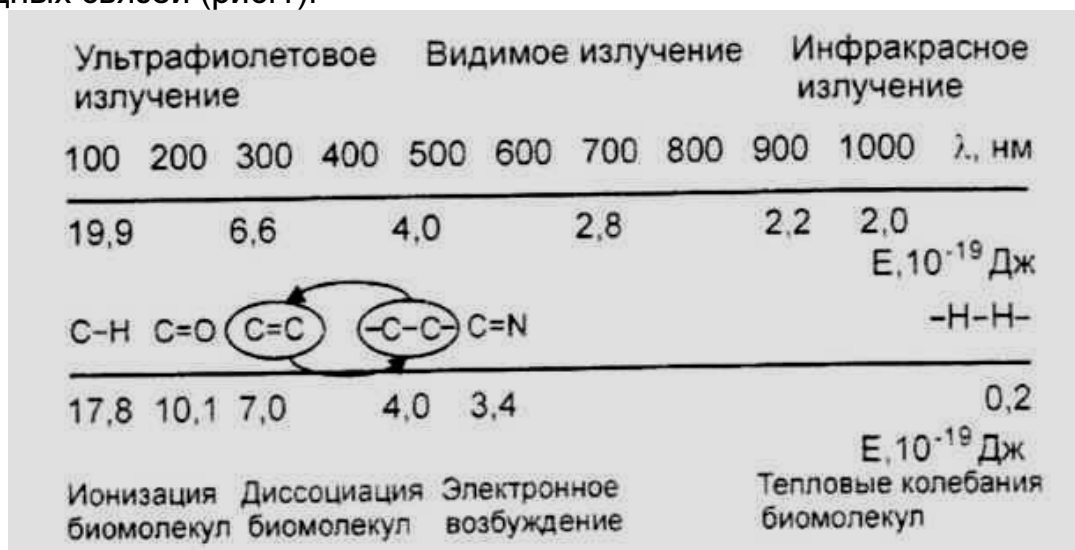


Рис.1. Фотохимические реакции квантов оптического излучения

На следующем этапе энергия оптического излучения трансформируется в тепло или образуются первичные фотопродукты, выступающие пусковым механизмом фотобиологических процессов. Первый тип энергетических превращений присущ в большей степени инфракрасному излучению, а второй — ультрафиолетовому. Анализ природы происходящих процессов позволяет утверждать, что специфичность эффектов различных участков оптического излучения зависит от длины волны.

Фотобиологические свойства ультрафиолетового излучения связаны главным образом с фотоионизацией, фотодиссоциацией и фотоизомеризацией нуклеотидов и аминокислот. Бактерицидное действие коротковолнового ультрафиолетового излучения в наибольшей степени связано с димеризацией тимина, однако в присутствии фотосенсибилизатора (бензофенона или ацетофенона) димеризация тимина возможна при облучении длинноволновым ультрафиолетом с длиной волны всего 360 нм.

Молекула бензофенона, поглощая квант с длиной волны 360 нм, переходит в возбужденное синглетное состояние, затем электрон безизлучательно переходит с синглетного на триплетный уровень. Если расстояние между молекулами тимина и бензофенона уменьшается до 1 нм, происходит переход электрона с бензофенона на возбужденный триплетный уровень тимина, а электрон с основного уровня тимина переходит на основной уровень бензофенона, заполняя образовавшуюся там вакансию [4, 6, 7]. Таким образом, в присутствии фотосенсибилизатора возбуждение пиримидиновых оснований возможно без непосредственного возбуждения их синглетных уровней, и поэтому достижимо квантами более «мягкого» длинноволнового ультрафиолетового излучения.

В роли фотосенсибилизатора в медицине, например при лечении псориаза, применяют псорален (PUVA-терапия) [9]. Таким образом, в

клетках биологических структур, содержащих фотосенсибилизаторы, длинноволновое ультрафиолетовое излучение вызывает такие же биологические эффекты, какие в интактных биоструктурах вызывает только «жесткое» коротковолновое ультрафиолетовое излучение с рядом побочных фототоксических и фотоаллергических эффектов для облучаемого организма. Принято считать, что в отличие от обменно-резонансного переноса, эффективного на межмолекулярных расстояниях до 1 нм, индуктивно-резонансный перенос энергии возможен при расстояниях между донором и акцептором до 10 нм [2,8] .

Кроме димеризации, важным компонентом бактерицидного и мутагенного действия ультрафиолетового излучения является фотогидратация пиримидиновых оснований. Продукт такой реакции разрушается только термически, т.е. реакция практически необратима. Главным аспектом механизма действия ультрафиолетового излучения является взаимодействие с белками и аминокислотами. Возбуждение УФ-излучением аминокислоты тирозина лежит в основе последовательности реакций, приводящих к синтезу дигидрофенилаланиновых меланинов (эумеланинов). Максимальная стимуляция меланиногенеза достигается при облучении средневолновым УФ-излучением с длинами волн 260–320 нм. Среди ученых-практиков (физиотерапевтов и косметологов) достаточно широко распространено неверное мнение, что максимальная активность меланиногенеза происходит при облучении длинноволновым ультрафиолетовым излучением с длиной волны 360 нм. Для этой цели применяются солярии с лампами, излучающими преимущественно длинноволновое УФ-излучение, однако оно способствует не синтезу нового меланина в меланоцитах, а только транспорту меланиновых гранул по дендритам из тел меланоцитов в кератиноциты, чем и достигается видимый косметический эффект – загар [9]. Фактически для синтеза меланина необходимо ультрафиолетовое излучение с длиной волны не более 320 нм.

Известно, что средневолновое ультрафиолетовое излучение с длиной волны от 300 нм и меньше может приводить к фотоионизации аминокислот и является канцерогенным, повышая риск развития рака кожи. Самая чувствительная к фотоионизации аминокислота – триптофан – ионизируется при поглощении квантов с длиной волны 297 нм. Вероятнее всего, именно этим фактом обусловлен многократно возрастающий риск развития рака кожи при облучении ультрафиолетовым излучением с длиной волны менее 297 нм.

Таким образом, для стимуляции меланиногенеза целесообразно использовать ультрафиолетовое излучение с длиной волны от 300 до 320 нм, хотя УФ-излучение более коротковолнового диапазона 280-300 нм эффективнее, но оно, к сожалению, опасно (рис. 2).

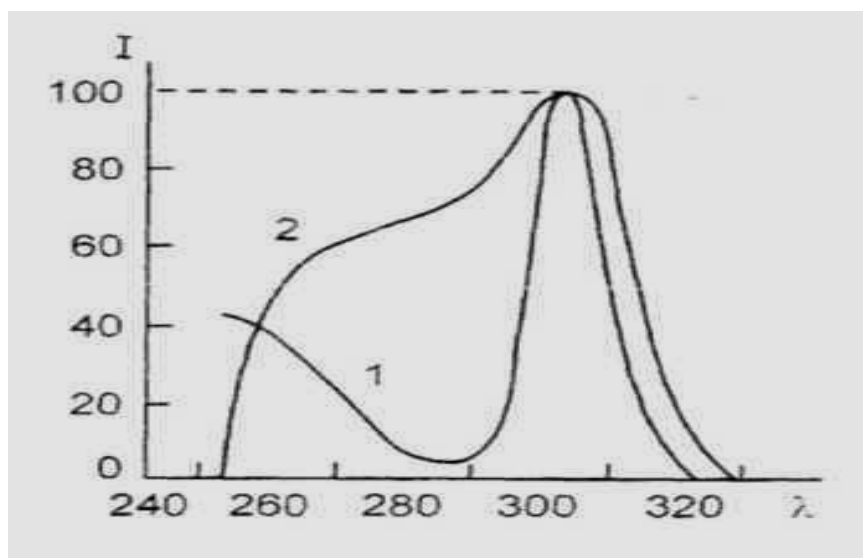
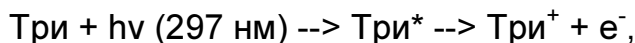


Рис. 2. Зависимость интенсивности образования эритемы (1) и витамина D3 (2) от длины волны ультрафиолетового излучения

По оси абсцисс – длина волны оптического излучения, λ мкм; по оси ординат – интенсивность образования эритемы (1) и витамина D3 (2).

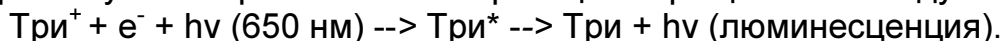
Чрезвычайно важна роль средневолнового ультрафиолетового излучения при синтезе витамина В. Вследствие фотоионизации при облучении УФ с длинами волн 260 нм образуют свободные радикалы аминокислоты фенилаланина, при облучении 270 нм – тирозина, а при 297 нм – триптофана:



где Три* – возбужденное состояние молекулы триптофана; Три⁺ – ионизированное состояние молекулы триптофана; e⁻ – гидратированный электрон.

В ходе реакции образуются катион-радикал аминокислоты и чрезвычайно активный гидратированный электрон. Гидратированный электрон поглощает фотон с длиной волны 650 нм, после чего освобождается из потенциальной ямы пиратного окружения и рекомбинирует с радикалом аминокислоты. Таким образом, КУФ- и СУФ- излучения инициируют образование свободных радикалов, а оптическое излучение с длиной волны около 650 нм «тушит» наработку свободных радикалов [4, 8, 9, 10].

При облучении красным светом реакция обращается в следующую:



Небольшая потенциальная энергия электрона в гидратном окружении (равная примерно 2 эВ) является причиной антирадикальной активности красного излучения. Следует отметить, что энергия связи электрона с молекулами воды зависит от температуры и концентрации ионов в растворе и не строго соответствует фотону с длиной волны 650 нм, а может отклоняться от этого значения на несколько нанометров в ту или иную сторону [3,7]. Активность красного излучения, по уменьшению радикалов вероятно, является важным, если не основным компонентом лечебного действия практической фото- и лазеротерапии. Существенно

облегчает неинвазивное использование красного излучения высокая прозрачность для него биологических тканей относительно других длин волн оптического диапазона. [2, 9].

Фотоны инфракрасного излучения, имеющие энергию, равную или больше энергии окислительно-восстановительных пар в цепи переноса электронов в митохондриях, в принципе могут индуцировать перенос электрона от донора к акцептору. Таким образом, инфракрасным излучением может быть активизировано тканевое (клеточное) дыхание. Значение энергии фотона может быть большим, чем разность энергии окислительно-восстановительной пары – «мишени» излучения, так как молекулы-переносчики электронов находятся в мембранах и гидратном окружении и их энергетические уровни ниже, чем были бы у молекул в свободном состоянии.

Отметим, что в последнее время в лазеротерапии сложилась практика применения красного излучения именно с длинами волн 632 и 650 нм как биологически и клинически наиболее эффективных. Упомянутые длины волн были выбраны эмпирически и практика их применения сложилась без глубокой предварительной аргументации. Механизмы действия ближнего инфракрасного излучения связаны с активацией переноса электронов по дыхательной цепи митохондрий. Активация тканевого дыхания наряду с повышением интенсивности метаболизма приводит также к избыточному накоплению активных форм кислорода: O_2^- , $OH^\cdot$, H_2O_2 и ряда других. Генерация активных форм кислорода есть неизбежная плата за высокую метаболическую активность аэробного дыхания живого организма: кислород является элементом не только дающим жизнь, но и приносящим преждевременное старение и гибель клеток.

Степень проявления фотобиологических эффектов в организме зависит от интенсивности оптического излучения, которая обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до облучаемой поверхности. Исходя из этого, на практике определяют не интенсивность, а дозу облучения на определенном расстоянии от источника путем выдержки времени облучения.

В итоге можно констатировать, что взаимодействию ЭМИ оптического диапазона с биологическими тканями живых организмов трансформируется в другие виды энергии (механическую, химическую, тепловую и др.). Процессы, вызванные возбуждением или нагреванием молекулярных структур тканей организма, служат пусковым звеном физико-химических и биологических реакций, формирующих конечный терапевтический эффект. При этом каждый из типов рассмотренных оптических излучений вызывает присущие только ему физико-химические процессы, которые определяют специфичность их лечебных эффектов и практического применения.

Выводы

Феномен избирательного поглощения энергии оптического излучения различными типами воспринимающих клеток и биологических струк-

тур свидетельствует о разных механизмах их воздействия и формируемых ими терапевтических эффектов. Этот эффект определяется сочетанием развивающихся под действием излучения взаимосвязанных процессов. Вероятность их формирования и развития определяется особенностями распределения энергии оптического излучения во времени и пространстве, физическими (электрическими, магнитными, механическими, теплофизическими) свойствами биологических тканей – «мишеней», избирательной чувствительностью к нему и функциональными резервами адаптации и реактивности организма. В формирование лечебных эффектов от воздействия энергии оптического излучения существенный вклад вносят процессы различных уровней организации живого организма, начиная с первичных биофизических и заканчивая сложными, адаптационными.

Список литературы

1. Биофизика / Ю.А. Владимиров, Д.И. Рощупкин, А.Я. Потапенко, А.И. Леев. – М.: Медицина, 1983. – 272 с.
2. Вестерхофф Х. Термодинамика и регуляция превращений свободной энергии в биосистемах / Х.Вестерхофф, К. Ван Дам; пер. с англ. – М.: Мир, 1992. – 686 с.
3. Вихман Э. Квантовая физика / Э. Вихман; пер. с англ. – [3-е изд. испр]. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1986. – 392 с.
4. Владимиров Ю.А. Физико-химические основы фотобиологических процессов / Ю.А. Владимиров, А.Я. Потапенко. – М.: Высш. шк., 1989. – 199 с.
5. Волькенштейн М.В. Биофизика / М.В. Волькенштейн. – М.: Наука, 1981. – 575 с.
6. Кузнецов А.Н. Биофизика электромагнитных воздействий (Основы дозиметрии) / А.Н. Кузнецов. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 256 с.
7. Рубин А.Б. Биофизика: Теоретическая биофизика / А.Б. Рубин. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 448 с.
8. Рубин А.Б. Биофизика: Биофизика клеточных процессов / А.Б. Рубин. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 469 с.
9. Самойлов В.О. Медицинская биофизика / В.О. Самойлов. – СПб.: Спец-Лит, 2004. – 496 с.
10. Самойлов В.О. Элементы квантовой биофизики / В.О. Самойлов. – СПб: Изд-во СПб ГТУ, 2001. – 44 с.

На основі біофізики проаналізовано первинні механізми дії енергії оптичного випромінювання на структури біологічних об'єктів.

Енергія, оптичне випромінювання, біологічні структури, механізм дії.

Based of Biophysics on analyzed the primary mechanisms of action energy optical radiation on the structure of biological objects.

Energy, optical radiation, biological structures, mechanism of action.

АНАЛИЗ МЕТОДАМИ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕДАХ

Б.Х. Драганов, доктор технических наук

Приведен метод исследования теплообменных процессов и гидродинамики многокомпонентных систем на основе положений неравновесной термодинамики.

Многофазная среда, диффузия, генерация энтропии, тензорные функции, термодинамическая сила, термодинамические потоки, турбулентное движение.

Любая техническая система имеет определенную технологическую структуру, т.е. состоит из ряда взаимосвязанных элементов. Каждая структура на определенном j -м уровне может характеризоваться некоторым набором переменных [1]. При этом существует определенная коррекция между структурами и характерными особенностями процессов, их образующих.

Эволюционные изменения, происходящие в элементах системы, как и эволюции системы в целом, составляют предмет исследований многих разделов науки. В технических устройствах эволюционные явления рассматриваются как правило с позиций двух аспектов: термодинамического и кинетического.

Существенный интерес заслуживают вопросы, посвященные анализу гидродинамики многокомпонентных сред, когда один из компонентов может изменить свое фазовое состояние [2–4].

Цель исследований – разработка метода расчета теплообмена и гидродинамики для многокомпонентных сред.

Материалы и методика исследований. До настоящего времени процессы тепломассообмена для многокомпонентных сред исследовались на основе классической термодинамики [1, 3, 4]. В этой статье указанные выше явления анализируются методом неравновесной термодинамики.

При формировании многофазного движения в рамках многоскоростного континуума задаются условия совместного движения фаз и величины, описывающие внутрифазовые силовые, энергетические и межфазные (массовое, силовое, энергетическое) взаимодействия.

В тех случаях, когда инерционные эффекты относительно движения фаз незначительны, для описания движения многофазных сред обращаются к диффузному, т.е. одножидкостному, приближению.

При анализе технической системы необходимо учитывать проблему взаимодействия целого и его частей. При этом результаты, получаемые в различных направлениях исследований, могут оказаться неоднозначными. Теорема Белла показывает, что корреляции, возникающие между пространственными разделенными, но взаимосвязанными системами, нельзя учесть в рамках ни одной из теорий, описывающих определенные состояния индивидуальных систем [5]. Однако, с другой стороны, Онзагер показал, что в двумерной модели происходят фазовые переходы, т.е. в бесконечной системе может существовать порядок структуры [6]. Изучение взаимосвязей различных физических явлений не отменяет феноменологических законов, существующих в рамках каждого явления, но позволяет нам эвристически оценить возможности уточнения и обобщения этих законов, а также глубже понять их значение.

Наиболее полное обоснование феноменологических определяющих соотношений для неидеальных многокомпонентных сплошных сред приведено в работе [4], которое согласуется с соотношениями взаимности Онзагера-Казимира в неравновесной термодинамике [7, 8]. Это эмпирически установленный принцип «взаимности» носит фундаментальный характер и может быть назван четвертым законом термодинамики [2] (напомним, что третий закон термодинамики сформулирован теоремой Нернста). Следует подчеркнуть, что принцип взаимности Онзагера-Казимира приобретает особое значение при моделировании реальных многоатомных газовых смесей, в которых между компонентами осуществляются переходы между состояниями с различными внутренними степенями свободы.

Более полный феноменологический подход определения соотношений (включая соотношения Стефана-Максвелла для многокомпонентной диффузии) для неидеальных многокомпонентных сплошных сред предпринят в работе [9].

Прежде чем применять принципы неравновесной термодинамики сплошных сред к описанию процессов тепломассопереноса в потоке многокомпонентной смеси, рассмотрим сущность постулатов, которые могут применяться при анализе любого необратимого процесса, в том числе протекающего в турбулизированном континиуме.

В качестве определяющих (реологических) соотношений, которые дополняют систему уравнений, описывающих процессы тепломассобмена, применяют феноменологические соотношения необратимых процессов (соотношения Онзагера):

$$I_k \sum_{l=1}^N L_{kl} X_l, \quad k=1,2,\dots,N, \quad (1)$$

где N – число независимых физических процессов; L_{kl} – матрица феноменологических (кинетических) коэффициентов, связывающих между собой потоки I_k и термодинамические силы X_l .

Потоки и термодинамические силы являются, в общем случае, тензорными величинами любого ранга. Физический смысл кинетических

коэффициентов может быть выяснен в рамках молекулярно-кинетической теории [10]. Число отличных от нуля кинетических коэффициентов в (1) ограничивается принципом Кюри [6], согласно которому компоненты (имеются в виду составляющие векторов вдоль осей координат) потоков будут зависеть не от всех компонентов термодинамических сил. Так, в случае изолированной системы процессы разной тензорной размерности не взаимодействуют друг с другом. Кроме того, в рамках соотношений Онзагера принимаются в качестве независимого постулата соотношения симметрии Онзагера-Казимира, так называемый принцип взаимности:

$$L_{kl}(B, \Omega) = \varepsilon_k \varepsilon_l L_{lk}(-B, -\Omega), \quad (2)$$

где B – магнитная индукция; Ω – угловая скорость вращения системы; $\varepsilon_{kl} = 1$ для четных (энергия, концентрация) и $\varepsilon_{kl} = -1$ для нечетных (плотность импульса) микроскопических параметров (четных или нечетных функций скоростей частиц).

Для изотропной невращающейся системы при отсутствии внешнего магнитного поля соотношение симметрии (2) приобретает более простой вид:

$$L_{kl} = L_{lk}, \quad (3)$$

где L_{kl} – скалярные величины.

Существенным показателем необратимости процесса является степень генерации энтропии. Конкретное представление скорости производства энтропии $\sigma_{(s)}$ внутри системы может быть выражено так:

$$T\sigma_{(s)} = \sum_{k=1}^N I_k X_k \geq 0. \quad (4)$$

Следует принять во внимание, что после определения потоков I_k сопряженные им силы X_k находятся однозначным образом.

Для случая локального равновесия среды можно записать соотношение Гиббса-Дюгема, имеющее фундаментальное значение для термодинамики многокомпонентных систем:

$$\rho \sum_k N_k d\mu_k = -\rho S dT + dp, \quad (5)$$

где N_k – удельное значение молей (на единицу массы суммарного континуума); μ_k – химический потенциал компонента α ; S – энтропия; ρ – плотность; T – температура; p – давление.

Уравнение генерации энтропии многокомпонентной газовой смеси имеет вид:

$$\rho \frac{ds}{dt} = -\frac{dq}{dt} \cdot \frac{1}{T} + \frac{1}{T} \left(\pi_{ij} \frac{dv_{ij}}{dt} + \sum_{\alpha=1}^N I_{\alpha j} F_{\alpha j} - \sum_{\alpha=1}^N \mu_{\alpha} \sigma_{\alpha} \right) + \frac{1}{T} \sum_{\alpha=1}^N \mu_{\alpha} \frac{dj_{\alpha j}}{dt}, \quad (6)$$

где $i, j (i, j = 1, 2, 3)$ – индексы указывающие на декартовы координаты точки r ; $q(r, t)$ – молекулярный поток тепла; $\pi_{ij}(r, t)$ – тензор j вязких напряжений, связанный с процессами молекулярного переноса количества дви-

жения всех компонентов смеси; v_{ij} – составляющая вектора гидродинамической скорости смеси; $j_{aj}(r, t)$ – диффузионный (молекулярный) поток вещества σ в системе; $F_{aj}(r, t)$ – суммарная внешняя сила, действующая на одну частицу α – компоненты; $\mu_\alpha(r, t)$ – локальные химические потенциалы; σ_α – параметр, характеризующий изменение (увеличение, уменьшение) общего числа частиц компонента в единице объема за единицу времени за счет химических реакций. При отсутствии химических реакций, естественно, член $\mu_\alpha(r, t)$ равняется нулю.

В соответствии с основным постулатом термодинамики необратимых процессов, в состояниях, близких к состоянию термодинамического равновесия термодинамические потоки можно представить в виде линейных функций от термодинамических сил:

$$I_{qj} = L_{00}^{jk} X_{0k} - \sum_{\beta=1}^N L_{0\beta}^{jk} X_{\beta k};$$

$$I_{\alpha j} = L_{\alpha 0}^{jk} X_{0k} - \sum_{\beta=1}^N L_{\alpha\beta}^{jk} X_{\beta k}. \quad (7)$$

Кинетические коэффициенты $L_{\alpha\beta}^{jk}(\alpha, \beta = 0, 1, \dots, N)$ представляют собой тензоры, зависящие от переменных состояния и параметров, характеризующих геометрическую симметрию среды.

Согласно общей теории тензорных функций [10] свойства симметрии изотропных сред вполне характеризуются метрическим тензором q^{jk} ; все тензоры будут тензорными функциями только метрического тензора:

$$L_{\alpha\beta}^{jk} = L_{\alpha\beta} q^{jk}, \quad (8)$$

где q^{jk} – скалярные величины.

В прямоугольной системе координат определяющие соотношения примут вид:

$$I_{qj} = L_{00} X_{00} - \sum_{\beta=1}^N L_{0\beta} X_{\beta j};$$

$$I_{\alpha j} = L_{\alpha 0} X_{0j} - \sum_{\beta=1}^N L_{\alpha\beta} X_{\beta j}. \quad (9)$$

Из условия симметрии Онзагера-Казимира следует:

$$L_{\alpha\beta} = L_{\beta\alpha}(\alpha, \beta = 0, 1, 2, \dots, N), \quad (10)$$

что уменьшает число фенологических коэффициентов $L_{\alpha\beta}$.

Результаты исследований. Приведем соотношения неравновесной термодинамики для молекулярных потоков диффузии и тепла. Коэффициенты диффузии ($D_{\alpha\beta} = D_{\beta\alpha}$) и коэффициенты термодиффузии для многокомпонентной среды не являются линейно независимыми:

$$\sum_{\alpha=1}^N M_{\alpha} Z_{\alpha} D_{T\alpha}(\xi) = 0; \quad \sum_{\alpha=1}^N M_{\alpha} I_{\alpha} D_{\alpha\beta} = 0; \\ (\beta = 1, 2, \dots, N), \quad (11)$$

где $M_{\bar{\alpha}}$ – молекулярная масса частицы компонента $\bar{\alpha}$; $\xi(r, t)$ – скорость протекания соответствующей химической реакции.

Для турбулентных потоков диффузии $I_{\alpha, j}^T$ ($\alpha = 1, 2, \dots, N$) и тепла I_{qj}^T , а также для потока энтропии турбулизации $I_{(S_F)_j}$, существуют такие кинетические конститутивные соотношения:

$$I_{qj}^T = L_{00}^T X_{0j}^T - \sum_{\beta=1}^N L_{0\beta}^T X_{\beta j}^T; \\ I_{\alpha j}^T = L_{\alpha 0}^T X_{0j}^T - \sum_{\beta=1}^N L_{\alpha\beta}^T X_{\beta j}^T; \quad (12)$$

$$I_{(S_F)_j} = -L_{FF}^T T_{Fj}, \quad (13)$$

где L^T – скалярные феноменологические коэффициенты диффузии, зависящие от осредненных параметров состояния $\bar{\rho}, \bar{T}, \bar{Z}_{\alpha}$ ($\alpha = 1, 2, \dots, N$) и параметра турбулизационной энергии $\bar{e}$, характеризующего физическую природу турбулентной среды, удовлетворяют условиям симметрии Онзагера-Казимира ($L_{\alpha\beta}^{\Sigma} = L_{\beta\alpha}^{\Sigma}$) и условиям (11).

Определяющие соотношения для турбулентных потоков диффузии и тепла удобно привести к виду обобщенных соотношений Стефана-Максвелла, включающих бинарные коэффициенты турбулентной диффузии.

Для турбулентных многокомпонентных смесей запишем соотношения термодинамических сил через потоки I_{qj}^T и $I_{\alpha, j}^T$ ($\alpha = 1, 2, \dots, N$):

$$I_{qj}^T - L_{00}^T X_{0j}^T = \sum_{\beta=1}^{N-1} L_{0\beta}^T \left[X_{\beta j}^T - \frac{M_{\beta}}{M_N} X_{Nj}^T \right]; \quad (14)$$

$$I_{\alpha j}^T - L_{\alpha 0}^T X_{0j}^T = \sum_{\beta=1}^{N-1} L_{\alpha\beta}^T \left[X_{\beta j}^T - \frac{M_{\beta}}{M_N} X_{Nj}^T \right]; \quad (15)$$

$$(\alpha = 1, 2, \dots, N-1),$$

где $X_{\beta j}^T$ ($\beta = 1, 2, \dots, N$) – термодинамические силы, определяемые выражением:

$$X_{\beta j}^T = -(\bar{P} / \bar{n}_{\beta}) d_{\beta j}^T \quad \text{и} \quad \sum_{\beta=1}^N \bar{Z}_{\beta} X_{\beta j}^T = 0, \quad (16)$$

где $\bar{n}_\beta(r, t)$ – среднее значение плотности (за единицу объема) молекул компонента β ; $d_{\beta j}^T$ – линейно зависимые векторы процесса $\left(\sum_{\beta=1}^N d_{\beta j}^T = 0 \right)$.

После ряда преобразований [9] получим выражение для турбулентных потоков диффузии $I_{\alpha j}^T$:

$$I_{\alpha j}^T = -\bar{n}_\alpha \sum_{\beta=1}^N D_{\alpha\beta} \left[d_{\beta j}^T + K_{t\beta}^T \frac{T_j}{T} \right]; \quad (17)$$

$$(\alpha = 1, 2, \dots, N),$$

где $K_{t\beta}^T$ – турбулентное термодиффузионное отношение [10].

Выводы

Для локально-стационарного состояния турбулентного поля, когда в структуре турбулентности существует некоторое внутреннее равновесие, наиболее полное описание тепломассообмена в многокомпонентной среде можно получить соотношениями Стефана-Максвелла для многокомпонентной диффузии и соответствующим выражением для потока тепла в турбулизованном континиуме.

Следует подчеркнуть, что при анализе гидродинамических и тепломассовых процессов феноменологический подход (основанный на положениях неравновесной термодинамики) позволяет получить определяющее соотношение для термодинамических потоков диффузии и тепла, а также удобные для расчета алгебраические формулы, связывающие между собой коэффициенты молекулярного процесса.

Список литературы

1. Большое, малое и человеческий разум / [Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С.] / под ред. Ю. Данилова; пер. с англ. А. Хочаяна. – СПб: Амфора, 2008. – 191 с.
2. Де Грот С. Неравновесная термодинамика / С. Де Грот, П. Мазур. – М.: Мир, 1964. – 456 с.
3. Дейч М.Е. Газодинамика двухфазных сред / М.Е. Дейч, Г.Л. Филиппов. – [2-е изд.]. – М: Энергоиздат, 1981. – 472 с.
4. Дъярмати И. Неравновесная термодинамика / И. Дъярмати. – М.: Мир, 1974. – 304 с.
5. Колесниченко А.В. Соотношения Стефана-Максвелла и поток тепла для неидеальных многокомпонентных сплошных сред / А.В. Колесниченко, Г.А. Тирский. // Числ. метод, мех. сплошн. среды. – 1976. – Т.7, №4. – С.106–121.
6. Колесниченко А.В. Турбулентность многокомпонентных сред / А.В. Колесниченко, М.Я. Мааров. – М.: МАИК Наука, 1998. – 366 с.
7. Ландау Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 733 с.

8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
9. Пригожин И. Химическая термодинамика / И. Пригожин, Р. Фей. – Новосибирск: Наука, 1966. – 509 с.
10. Седов Л.И. Механика сплошной среды / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1976, Т.1. – 536 с.

Наведено метод дослідження теплообмінних процесів та гідродинаміки багатокomпонентних систем на основі положень нерівноважної термодинаміки.

Багатофазне середовище, дифузія, генерація ентропії, тензорні функції, термодинамічна сила, термодинамічні потоки, турбулентний рух.

A method for the study of hydrodynamics and heat transfer processes of multicomponent systems on the basis of non-equilibrium thermodynamics.

Multiphase medium, diffusion, the generation of entropy, tensor functions, the thermodynamic force, the thermodynamic flows, turbulent motion.

УДК 621.762

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОЦІНКИ ГЛИБИНИ ПРОПЛАВЛЕННЯ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

І.П. Радько, кандидат технічних наук

Розглянуто метод визначення проплавлення контакт-деталей за допомогою рівняння теплопровідності в сферичних координатах. Показано, що розміри основи дуги дуже малі в порівнянні з поверхнею контакт-деталі, тому розрахунок теплового режиму контакт-деталі проводиться з використанням методу точкового джерела. Визначено розподіл температури електричної дуги за час її горіння при комутації струму.

Контакт-деталь, електрична дуга, теплопровідність, напруга, електричний струм.

Мета досліджень – вдосконалення математичної моделі теплових процесів комутаційних апаратів.

Матеріали та методика досліджень. Використано параметри дуги та метод теплового балансу енергії електричної дуги при комутації струму електричних апаратів.

Результати досліджень. Вперше обраховано величину глибини проплавлення, електричну ерозію, термін служби контактів з досліджуваними матеріалами порошкової металургії та потужність електричної дуги.

$$P = a \cdot \text{grad}T_{ct} + \lambda G - GT_{ct}^4, \quad (1)$$

© І.П. Радько, 2013

8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
9. Пригожин И. Химическая термодинамика / И. Пригожин, Р. Фей. – Новосибирск: Наука, 1966. – 509 с.
10. Седов Л.И. Механика сплошной среды / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1976, Т.1. – 536 с.

Наведено метод дослідження теплообмінних процесів та гідродинаміки багатоконпонентних систем на основі положень нерівноважної термодинаміки.

Багатофазне середовище, дифузія, генерація ентропії, тензорні функції, термодинамічна сила, термодинамічні потоки, турбулентний рух.

A method for the study of hydrodynamics and heat transfer processes of multicomponent systems on the basis of non-equilibrium thermodynamics.

Multiphase medium, diffusion, the generation of entropy, tensor functions, the thermodynamic force, the thermodynamic flows, turbulent motion.

УДК 621.762

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОЦІНКИ ГЛИБИНИ ПРОПЛАВЛЕННЯ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

І.П. Радько, кандидат технічних наук

Розглянуто метод визначення проплавлення контакт-деталей за допомогою рівняння теплопровідності в сферичних координатах. Показано, що розміри основи дуги дуже малі в порівнянні з поверхнею контакт-деталі, тому розрахунок теплового режиму контакт-деталі проводиться з використанням методу точкового джерела. Визначено розподіл температури електричної дуги за час її горіння при комутації струму.

Контакт-деталь, електрична дуга, теплопровідність, напруга, електричний струм.

Мета досліджень – вдосконалення математичної моделі теплових процесів комутаційних апаратів.

Матеріали та методика досліджень. Використано параметри дуги та метод теплового балансу енергії електричної дуги при комутації струму електричних апаратів.

Результати досліджень. Вперше обраховано величину глибини проплавлення, електричну ерозію, термін служби контактів з досліджуваними матеріалами порошкової металургії та потужність електричної дуги.

$$P = a \cdot \text{grad}T_{ct} + \lambda G - GT_{ct}^4, \quad (1)$$

© І.П. Радько, 2013

де P – потужність, що виділяється в дузі, Вт; α – коефіцієнт температуропровідності, $\frac{M^2}{C}$; T_{ct} – гранична температура нагріву, $^{\circ}C$; λ – скрита теплота випаровування, $^{\circ}C$; G – постійна закону Стефана-Больцмана.

В основу методу визначення глибини проплавлення контакт-деталей покладено рівняння теплопровідності в сферичних координатах:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (2)$$

де T – температура маси контакт-деталі, яка нагрівається, $^{\circ}C$; t – час дії енергії дуги, с; α – коефіцієнт температуропровідності, $\frac{M^2}{C}$; r – відстань від опорної плями (основи) дуги, м.

Оскільки розміри основної дуги дуже малі в порівнянні з поверхнею контакт-деталі, то розрахунок теплового режиму контакт-деталі проводиться з використанням методів точкового джерела.

Розв'язок рівняння (2) знайдемо так. Введемо заміну змінних:

$$U = Tr; \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial Tr}{\partial t}; \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial t}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{T}{r}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial(r \frac{\partial T}{\partial r})}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial r \frac{\partial T}{\partial r}}{\partial r} + \frac{\partial^2 Tr}{\partial r^2} = 2 \frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}. \quad (6)$$

Підставляючи (4), (5), (6) у рівняння (2), отримаємо :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = r \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4); \quad \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{T}{r} \quad (5); \quad \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (6);$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} - \frac{2 \partial T}{r \partial r} + \frac{2 \partial T}{r \partial r} \right) = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial^2 U}{\partial r^2};$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 U}{\partial r^2}. \quad (7)$$

Опорну пляму дуги ми розглядаємо у вигляді кулі радіусом R , розміщеної всередині контакту, розміри якого набагато разів більше радіуса R (необмежене середовище). Початкова температура кулі $0 < r < R$ рівна T_0 , а в області $r > R$ температура дорівнює нулю. Таким чином, рівняння (7) розглядається при таких граничних умовах:

$U = T_0 r$, коли $t = 0$ при $0 < r < R$;

$U = 0$, коли $t \neq 0$ при $r < R$;

$U = 0$ коли $t = 0$ при $r > R$.

Розв'язок рівняння (7) у цьому випадку буде таким:

$$T = \frac{T_0}{2r\sqrt{\pi at}} \int_0^R r' [l^{\frac{(r-r')^2}{4at}} + l^{\frac{(r-r')^2}{4at}}] \partial r' = \frac{T_0}{2r\sqrt{\pi at}} \int_0^R r' l^{\frac{(r')^2}{4at}} (l^{\frac{rr'}{2at}} + l^{\frac{rr'}{2at}}) \partial r'. \quad (8)$$

Використовуючи малість R , розкладемо підінтегральну функцію в ряд за ступенями r і обмежимо першими 3-ма членами розкладу:

$$l^{\frac{(r')^2}{4at}} = 1 - \frac{(r')^2}{4at} \pm \frac{(r')^4}{32a^2t^2}; \quad (8')$$

$$l^{\frac{rr'}{2at}} = 1 + \frac{rr'}{2at} + \frac{r^2(r')^2}{8a^2t^2}; \quad (8'')$$

$$l^{\frac{rr'}{2at}} = 1 - \frac{rr'}{2at} + \frac{r^2(r')^2}{8a^2t^2}. \quad (8''')$$

Після підстановки (8'), (8''), (8''') в (8) отримаємо :

$$T = \frac{T_0 l^{\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}} \int_0^R (r' - \frac{(r')^3}{4at} + \frac{(r')^5}{32a^2t^2}) (2 + \frac{r^2(r')^2}{4a^2t^2}) \partial r' = \frac{T_0 l^{\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}} \int_0^R [2r' + \frac{(r')^3}{4at} (-1 + \frac{r^2}{2at}) + \frac{(r')^5}{16a^2t^2} (1 - \frac{r^2}{2at})] \partial r' \quad (9)$$

Після інтегрування (9) прийме вигляд :

$$T = \frac{T_0 l^{\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}} [R^2 + \frac{R^4}{8at} (-1 + \frac{r^2}{2at}) + \frac{R^6}{96a^2t^2} (1 - \frac{r^2}{2at})]; \quad (10)$$

$$T = \frac{T_0 l^{\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}} R^2 [1 + \frac{R^2}{8at} (-1 + \frac{r^2}{2at})]. \quad (11)$$

Знайдемо розподіл температур T цього джерела для випадку кінцевого часу. Для цього скористаємось відомим співвідношенням:

$$mcdT = qIUt \quad (12)$$

де m – маса джерела (плями), г; c – питома теплоємність, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$; I – струм дуги, А; U – падіння напруги в дузі, В; q – електротермічний еквівалент, $\frac{\text{кал}}{\text{дж}}$.

Визначимо звідси E , значення якого підставимо в (11), та інтегруючи по t від 0 до t , отримаємо:

$$T = \frac{3qIUR^2}{2r\sqrt{\pi a \pi R^3 \gamma c}} \int_0^t l^{\frac{r^2}{4a(t-t_1)}} [1 + \frac{R^2}{8at} (-1 + \frac{r^2}{2at})] \partial t =$$

$$= \frac{3qIU}{8rR\gamma\pi c\sqrt{\pi a}} \left[\int_0^t l^{\frac{(r')^2}{4a(t-t_1)}} \frac{1}{\sqrt{t-t_1}} \partial t' - \frac{R^2}{8a} \int_0^t l^{\frac{(r')^2}{4a(t-t_1)}} \frac{1}{\sqrt{t-t_1}} \partial t' + \frac{R^2 r^2}{16a^2} \int_0^t l^{\frac{(r')^2}{4a(t-t_1)}} \frac{1}{\frac{5}{2}(t-t_1)} \partial t' \right]. \quad (13)$$

Залишилось знайти три інтеграли.

1-й інтеграл:

$$\int_0^t l^{\frac{(r')^2}{4a(t-t_1)}} \frac{1}{\frac{5}{2}(t-t_1)} \partial t'.$$

Скориставшись заміною змінних:

$$\frac{1}{\frac{5}{2}(t-t_1)} = \sigma; \quad \partial \sigma = \frac{\partial t'}{2(t-t_1)^{\frac{3}{2}}};$$

$$t=0 \quad \sigma = t^{-\frac{1}{2}};$$

$$t=t \quad \sigma = \infty,$$

будемо мати:

$$2 \int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty} l^{\frac{(r')^2}{4at}} \sigma^2 \partial \sigma = 2\sqrt{t} l^{\frac{(r')^2}{4at}} - \frac{r^2}{a} \int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty} l^{\frac{(r')^2}{4at}} \sigma^2 \partial \sigma = 2\sqrt{t} l^{\frac{(r')^2}{4at}} - \sqrt{\frac{\pi a}{r^2}} \frac{r^2}{a} \left[1 - \varphi \left(\sqrt{\frac{r^2}{4at}} \right) \right]. \quad (14)$$

2-й інтеграл:

$$\int_0^t l^{\frac{(r')^2}{4a(t-t_1)}} \frac{1}{\frac{3}{2}(t-t_1)} \partial t'.$$

Введемо заміну змінних:

$$\frac{1}{\frac{3}{2}(t-t_1)} = \sigma; \quad \partial \sigma = \frac{\partial t'}{2(t-t_1)^{\frac{3}{2}}};$$

$$t=0 \quad \sigma = t^{-\frac{1}{2}};$$

$$t=t \quad \sigma = \infty,$$

$$2 \int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty} l^{\frac{(r')^2}{4at}} \sigma^2 \partial \sigma = 2\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}} \left[1 - \varphi \left(\sqrt{\frac{r^2}{4at}} \right) \right]. \quad (15)$$

3-й інтеграл:

$$\int_0^t \frac{l \frac{(r')^2}{4a(t-t_1)}}{\frac{3}{2}(t-t')} \partial t'.$$

$$\frac{1}{\frac{3}{2}(t-t')} = \sigma; \quad \partial \sigma = \frac{\partial t'}{2(t-t_1)^{\frac{3}{2}}};$$

$$t=0 \quad \sigma = t^{-\frac{1}{2}};$$

$$t=t \quad \sigma = \infty,$$

$$2 \int_0^t \sigma^2 l^{-\frac{r^2}{4at} \sigma^2} \partial \sigma = 2 \frac{1}{2} \int_{\frac{1}{t}}^{\infty} \sigma l^{-\frac{r^2}{4at} \sigma^2} \partial \sigma^2 =$$

заміна змінних $\sigma^2 = x; \sigma = \frac{1}{\sqrt{t}}; \sqrt{x} = \frac{1}{\sqrt{t}}; x = \frac{1}{t}$

$$= \int_{\frac{1}{t}}^{\infty} \sqrt{x} l^{-\frac{r^2}{4at} x} \partial x =$$

Інтегруючи частинами

$$\sqrt{x} = U; \frac{1}{2\sqrt{x}} \partial x = \partial U;$$

$$l^{-\frac{r^2}{4a} x \partial x} = \partial V;$$

$$-\frac{4a}{r^2} l^{-\frac{r^2}{4a} x} = V;$$

$$= \sqrt{x} \left(-\frac{4a}{r^2} l^{-\frac{r^2}{4a} x} \right) l^{\frac{r^2}{4a} x} \int_{\frac{1}{t}}^{\infty} - \int_{\frac{1}{t}}^{\infty} -\frac{4a}{r^2} l^{-\frac{r^2}{4a} x} \frac{1}{2\sqrt{x}} \partial x = \frac{4a}{r^2} \frac{1}{\sqrt{1}} l^{-\frac{r^2}{4at}} + \frac{4a}{r^2} \left[\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}} \left\{ 1 - \varphi \left(\sqrt{\frac{r^2}{4at}} \right) \right\} \right] \quad (16)$$

Підставляючи значення інтегралів (14), (15), (16) в (13), будемо мати:

$$T = \frac{3qIU}{8\pi\sqrt{\pi a R \gamma c}} \left(2\sqrt{t} l^{-\frac{r^2}{4at}} + \frac{r^2}{a} \sqrt{\frac{\pi a}{r^2}} [1 - \varphi] - \frac{2R^2}{4a} \sqrt{\frac{\pi a}{r^2}} [1 - \varphi] \right) +$$

$$+ \frac{4aR^2 r^2}{16a^2 r^2} \frac{1}{\sqrt{t}} l^{-\frac{r^2}{4at}} + \frac{4a}{r^2} \sqrt{\frac{\pi a}{r^2}} \frac{R^2 r^2}{16a^2} [1 - \varphi] =$$

$$= \frac{3qIUR^2}{8\pi\sqrt{\pi a R^2 \gamma c}} \left\{ \left(2\sqrt{t} + \frac{R^2}{4a\sqrt{t}} \right) l^{-\frac{r^2}{4at}} - [1 - \varphi] \left(\frac{r^2 \sqrt{\pi a}}{4ar} \frac{a^2 \sqrt{\pi a}}{4ar} \right) \right\}.$$

$$T = \frac{3qIU}{8\pi\sqrt{\pi a R^2 \gamma c}} \left[\frac{1}{r} l^{-\frac{r^2}{4at}} \left(2\sqrt{t} + \frac{R^2}{4at} \right) - \sqrt{\frac{\pi}{a}} \left(1 - \varphi \sqrt{\frac{r^2}{4at}} \right) \right]. \quad (17)$$

При цьому видно, що температура контакту не може бути вище деякої максимальної.

Максимальна температура поверхні електродів нами визначена із рівнянь теплового балансу енергії на електроді за формулою (1). Наведена оцінка показала, що максимальна температура поверхні контакт-деталей становить 2400 К, що близько до температури випаровування срібла.

Глибина проплавлення матеріалу контакт-деталей залежить від енергії дуги, фізико-механічних властивостей контактного матеріалу, часу горіння дуги і визначається за виразом:

$$r = 0,17 \sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{bT}}, \quad (18)$$

де U_0 – напруга джерела живлення, В; I_0 – струм навантаження, А; t_0 – час розмикання контакт-деталі, с; $b = \sqrt{\pi \lambda \gamma c}$ – коефіцієнт, який визначається теплофізичними властивостями контактного матеріалу, Дж/(м²Кс^{1/2}); T – розрахункова температура плавлення, К.

Як видно з формули (18), на глибину проплавлення контактного матеріалу впливає і час горіння дуги t_0 при комутації струму. Тому, можна визначити оптимальний час розмикання контакт-деталей t_{omm} , при якому глибина проплавлення та ерозії будуть мінімальні:

$$t_{omm} = \frac{\pi \lambda S^2 T^2}{P_{cep}^2}, \quad (19)$$

де S – оцінка контакту, на яку діє енергія електричної дуги, мм; P_{cep} – середнє значення потужності дуги, Вт.

Оцінка граничної глибини проплавлення за формулою (18) показала, що її величина становить 0,5 мм.

Розглядаючи мікроструктуру поздовжнього розрізу електродів можна помітити, що глибина проплавлення становить у середньому 0,6 мм.

Таким чином, збіг даних розрахунку з експериментальними даними є задовільним, враховуючи оціночний розрахунок.

Висновки

Глибина проплавлення матеріалу контактів залежить від енергії дуги, електроерозійних властивостей матеріалу контактів, часу горіння електричної дуги і визначається за формулою:

$$h = \sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{2\psi T_p I_0}}, \quad (20)$$

де ω – коефіцієнт, що характеризує тип навантаження і залежить від співвідношення активного опору споживача R_0 та його індуктивності L , а також залежить від часу розмикання контактів t_0 :

$$\omega = \frac{R_0 t_0}{L}, \quad (21)$$

де ψ – коефіцієнт, який враховує співвідношення між розмірами контактів;
 T_p – розрахункова температура плавлення контактного матеріалу, К;
 $b = \sqrt{\pi \lambda \gamma c}$ – коефіцієнт, який визначається фізико-механічними характеристиками матеріалу контактів, Дж/(м²Кс^{1/2}); U_0 – напруга джерела струму, В;
 I_0 – сила струму споживача, А; t_0 – час розмикання контакт-деталі, с.

Внаслідок проведеного розрахунку була встановлена залежність строку служби контактів від кількості електрики перенесеної в дузі.

Список літератури:

1. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Буткевич Г.В. – М.: Энергия 1973. – 172 с.
2. Буткевич Г.В. К вопросу износа контактов электрических аппаратов под действием дуги / Буткевич Г.В. // Тр. МЭИ. – 1965. – Вып. 64. – С. 261–269.
3. Декабрун Н. Е. Контакты аппаратов низкого напряжения / Декабрун Н.Е. – М.: Энергия, 1970. – 327 с.
4. Кобленц М. Г. Исследование электрической износоустойчивости контакторов / Кобленц М.Г. // Электротехника. – 1966. – №1.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности / Лыков А.В. – М.: Высш. шк., 1967. – 250 с.
6. Хольм Р. Электрические контакты / Хольм Р. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1961. – 464 с.

Рассмотрено метод определения проплавления контакт-деталей при помощи уравнения теплопроводности в сферических координатах. Показано, что размеры основания дуги очень маленькие по сравнению с поверхностью контакт деталей, поэтому расчет теплового режима контакт-детали производится с использованием метода точечного источника. Определено распределение температуры электрической дуги за время горения при коммутации тока.

Контакт-деталь, электрическая дуга, теплопроводность, напряжение, электрический ток.

Consider the method of determination of melting the contact details of the equation of heat conduction in spherical coordinates. The calculation of the thermal regime the contact parts are manufactured by the method of a point source as the sizes of the base arc is very small compared to the surface of the contact details. Been determined the temperature distribution of the arc during combustion at current commutation.

Contact details, electric arc, thermal, voltage, electric current.

ТЕПЛООБМІН ПУЧКА ТРУБ З НАПІВЦИЛІНДРИЧНИМИ ІНТЕНСИФІКАТОРАМИ. 1. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК

В.Г. Горобець, доктор технічних наук

Розроблено математичну модель та проведено чисельні розрахунки для шахових пучків труб за наявності напівциліндричних інтенсифікаторів на зовнішній поверхні. Отримано локальні та інтегральні характеристики досліджуваних поверхонь. Проведено зіставлення отриманих результатів з експериментальними даними для труб з інтенсифікаторами у вигляді накатки. Показано, що застосування інтенсифікаторів в 1,9–2,0 рази підвищує теплову ефективність таких поверхонь порівняно з гладкотрубними поверхнями. Визначено оптимальну геометрію розміщення інтенсифікаторів на поверхні труб.

Пучок труб, напівциліндричні інтенсифікатори, математичне моделювання, теплообмін, оптимальна геометрія.

Відомі способи інтенсифікації теплообмінних процесів на поверхні ґрунтуються на створенні таких умов гідродинамічного обтікання поверхні, при яких має місце турбулізація потоку, руйнування приграничного шару (ПШ) на початкових ділянках його формування, створення ділянок відриву і приєднання потоку до поверхні обтікання, які чергуються між собою і т.д. З цією метою на обтічній поверхні створюють невисокі ребра різних конфігурацій, виступи, заглиблення або канавки, лунки різної форми та інші геометричні форми поверхонь, що сприяють інтенсифікації теплообмінних процесів. Проведені дослідження [3] показують, що найперспективнішими з них є інтенсифікатори без гострих кутів і кромek, які мають добру обтічну форму поверхні. До інтенсифікаторів такого типу належать, наприклад, напівциліндричні виступи або западини з плавними краями. Такі поверхні можуть бути створені шляхом деформації поверхні труб за допомогою роликів (метод накатки), при гофрування поверхні, приварюванні до гладкої поверхні виступів з добре обтічним профілем, наприклад дроту тощо. Експериментальне вивчення таких поверхонь показує, що вони дозволяють істотно підвищити тепловіддачу при помірному зростанні гідравлічного опору, якщо порівнювати з гладкою поверхнею.

Важливим для практичних застосувань є питання вибору оптимальних розмірів і геометричного розташування інтенсифікаторів на поверхні. Зазначимо, що якщо для поверхонь з виступами такі рекомендації отримані на підставі експериментальних досліджень [3], то питання локального моделювання теплопереносу для таких поверхонь вивчено не-

достатньо і рекомендації щодо вибору оптимальної геометрії поверхонь відсутні.

Мета досліджень – із застосуванням інтегральних методів розрахунку рівнянь переносу проведення математичного моделювання та вивчення умов локального теплообміну поверхонь з напівциліндричними виступами при великих відстанях між ними; визначення оптимальної геометрії розміщення інтенсифікаторів.

Матеріали та методика досліджень. Труби з напівциліндричними інтенсифікаторами мають широку область застосування при конструюванні теплообмінників різного призначення. Такі поверхні ефективні для теплообмінних апаратів з теплоносіями типу газ-рідина і газ-газ, тобто для тих випадків, коли величини коефіцієнтів тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхні труби відрізняються між собою. Теплообмінники такого типу звичайно являють собою пучок труб, розміщених у циліндричному кожусі, причому напрямок течії зовнішнього і внутрішнього теплоносіїв у різних конструкціях може бути організовано по-різному. Розрізняють прямоточну і протиточну схему течії. Розглянемо протиточну схему течії, яка більш ефективна і знайшла широке застосування в практиці конструювання теплообмінних апаратів (рис. 1).

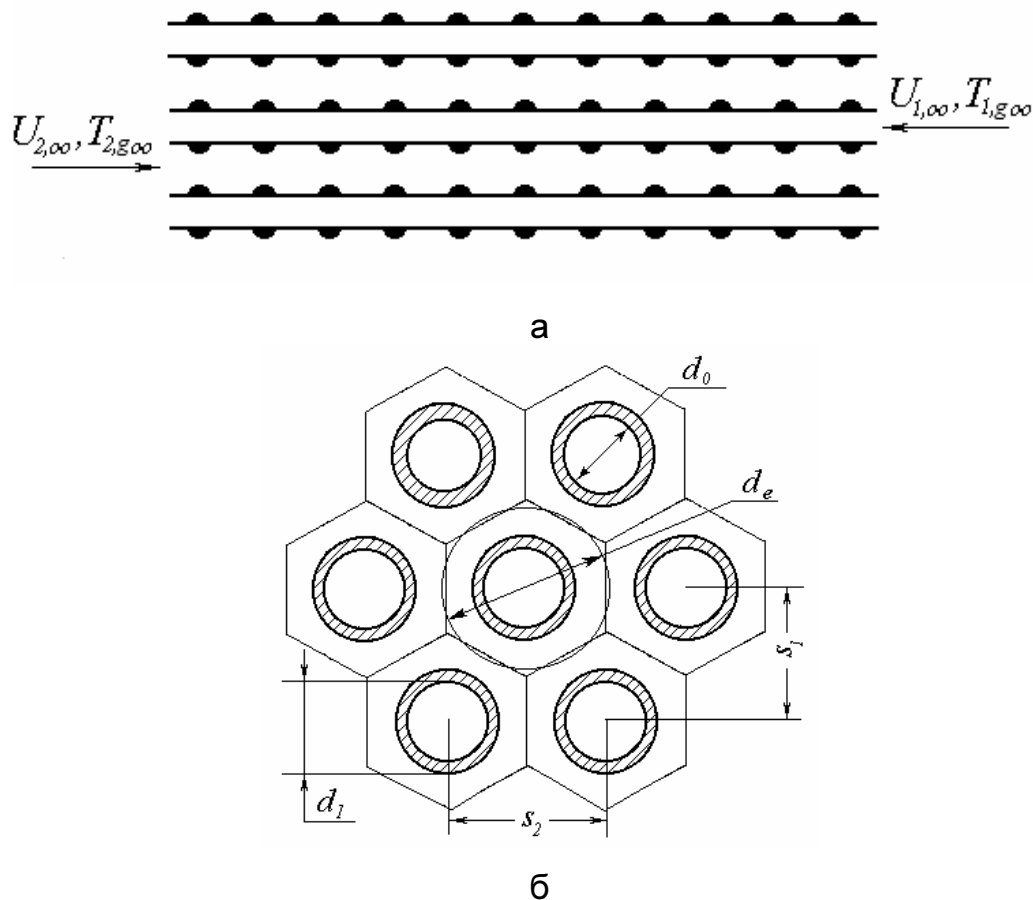


Рис. 1. Розрахункова схема течії в пучку труб з шаховим розташуванням:
а – поздовжній переріз трубного пучка із циліндричними інтенсифікаторами;
б – поперечний переріз пучка

При такій організації течії на зовнішній поверхні труб розташовані виступи напівциліндричної форми, при поперечному обтіканні яких виникають відриви зовнішнього потоку. При великих відстанях між виступами відривні течії утворюються в кутових зонах між виступом і основою, а на поверхні труби формується ділянка приєднаної зовнішньої течії (рис. 2).

Передбачається, що при високих швидкостях зовнішнього потоку течія в міжтрубному просторі є турбулентною і має місце інтенсивне перемішування теплоносія. При цьому профілі швидкості і температури в поперечному перерізі каналу вирівнюються і їх можна вважати постійними

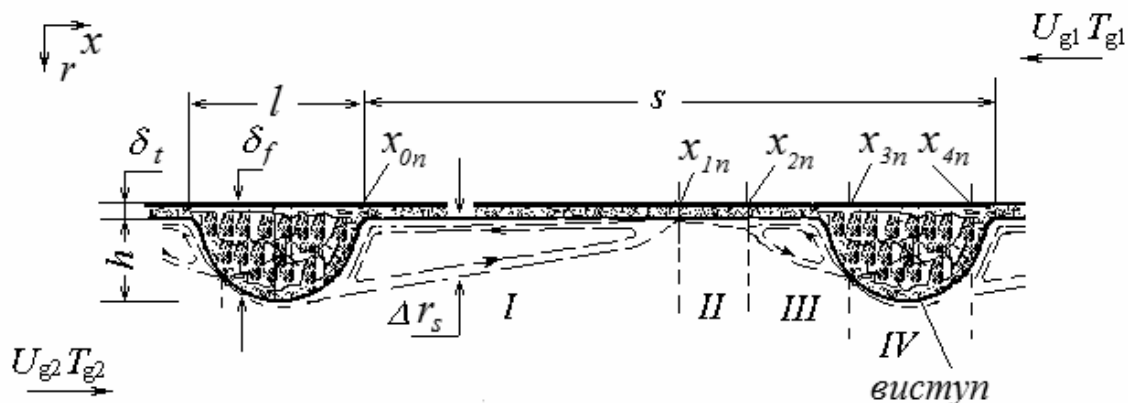


Рис. 2. Розрахункова схема течії в міжреберній комірці при великих відстанях між виступами

по перерізу і відповідно для внутрішнього і зовнішнього каналу рівними U_{gi}, T_{gi} ($i = 1, 2$). Розглянемо пучок із шаховим розташуванням труб (див. рис. 1). При такому розташуванні труб можна виділити повторюваний елемент пучка, який являє собою шестигранну секцію. Для зручності обчислень шестигранний контур замінюємо колом, яке має таку ж площу поперечного перерізу, що і виділений контур (див. рис. 1, б). Швидкість зовнішньої течії в кожному перерізі пучка визначається з виразу: $U_{g2} = G_{g2} / (kF_{c2})$, де G_{g2} – витрата зовнішнього теплоносія, $\text{м}^3/\text{с}$; k – кількість шестигранних секцій у трубному пучку. Площа поперечного перерізу в виділеній секції $F_{c2} = \pi(d_e^2 - d_s^2)/4$, де d_s, d_e – відповідно внутрішній і зовнішній діаметр прохідного перерізу каналу, мм. Величина d_s може змінюватися в напрямку Ox і визначається за виразом: $d_s = d_1 + \Delta r_s$, де d_1 – зовнішній діаметр труби, мм; Δr_s – поперечні розміри відривної зони в перерізі x (див. рис. 2). Оскільки біля основи виступів наявні округлення, то можна не враховувати вторинні застійні течії в кутових зонах. Базуючись на наведених вище передумовах, зовнішню поверхню труби розбиваємо на повторювані елементарні ділянки між координатами початку сусідніх виступів довжиною s , для яких умови течії ідентичні (див. рис. 2). Розробивши математичну модель теплопереносу для виділеної ділянки поверхні і виконавши розрахунки можна визначити

локальні теплообмінні характеристики на поверхні та тепловіддачу на елементарній ділянці поверхні довжиною s . Розрахунок переносу теплоти у зовнішньому каналі проводиться від ділянки до ділянки, починаючи з входу.

Перейдемо до розробки математичної моделі теплопереносу для елементарної ділянки поверхні з циліндричними інтенсифікаторами у вигляді виступів (див. рис. 2). Розглянемо випадок: коли між виступами є великий проміжок порівняно з висотою виступу. Аналіз гідродинамічної течії в комірці між виступами для такої геометрії їх розташування дозволяє умовно виділити чотири характерні зони течії: I – зону відривної течії в лівому куті комірки, II – область приєднаної зовнішньої течії до поверхні труби, III – зону відривної течії в правому куті комірки, VI – область приєднання зовнішнього потоку до поверхні циліндричного виступу (див. рис. 2). При розробці математичної моделі теплопереносу, враховуючи невелику протяжність опуклих ділянок поверхні, впливом кривизни поверхні на умови формування ПШ нехтуємо.

Методи розрахунку спряженого теплопереносу для течій, які формують ПШ на довільно неізотермічній поверхні, а також для відривних течій в кавернах і кутових зонах викладено в [1]. На підставі проведеного аналізу можна записати вихідні рівняння, що описують теплоперенос в окремій комірці.

Якщо виступ розглядати як елемент стінки, що має змінну товщину, то рівняння переносу теплоти для розглянутої елементарної ділянки поверхні з виступами мають вигляд:

$$\lambda \delta_t \frac{\partial^2 \bar{T}_{1,n}}{\partial x^2} = q_{for,mn}(x, \bar{T}_{1,n}) + q_{aft,n}(x, \bar{T}_{1,n}); \quad (1)$$

$$\lambda \delta_f(x) \frac{\partial^2 \bar{T}_{2,n}}{\partial x^2} = q_{for,mn}(x, \bar{T}_{2,n}) + q_{aft,n}(x, \bar{T}_{2,n}), \quad (2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби, Вт/м °С; $\delta_f(x), \delta_t$ – товщина виступів і товщина труби, мм, індекс 1 належить до поверхні труби, індекс 2 відповідає виступу, індекси *for* і *aft* позначають зовнішню і внутрішню поверхню труби, *m* вказує номер зони течії I – VI, в яких знаходиться відповідна ділянка течії на зовнішній поверхні труби, а індекс *n* означає номер комірки $n=1, 2, \dots, N$; N – кількість комірок, на які розбивається вся довжина труби (див. рис. 2, 3).

Граничні умови для елементарної ділянки можуть бути подані у вигляді:

$$\left. \frac{\partial \bar{T}_1}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \bar{T}_N}{\partial x} \right|_{x=Ns} = 0, \quad \lambda \delta_t \left. \frac{\partial \bar{T}_{1,n-1}}{\partial x} \right|_{x=(n-1)s} = \lambda \delta_f \left. \frac{\partial \bar{T}_{2,n}}{\partial x} \right|_{x=(n-1)s},$$

$$\bar{T}_{1,n}[x = (n-1)s] = \bar{T}_{2,n}[x = (n-1)s], \quad n = 2, 3, \dots, N;$$

$$\lambda \delta_f \frac{\partial \bar{T}_{2,n}}{\partial x} \Big|_{x=ns} = \lambda \delta_t \frac{\partial \bar{T}_{1,n+1}}{\partial x} \Big|_{x=ns}, \quad \bar{T}_{2,n}(x = ns) = \bar{T}_{1,n+1}(x = ns), \quad (3)$$

$$n = 1, 2, \dots, N-1;$$

$$\lambda \delta_t \frac{\partial \bar{T}_{1,n}}{\partial x} \Big|_{x=ns-l} = \lambda \delta_f \frac{\partial \bar{T}_{2,n}}{\partial x} \Big|_{x=ns-l}, \quad \bar{T}_{1,n}(x = ns-l) = \bar{T}_{2,n}(x = ns-l),$$

$$n = 1, 2, \dots, N;$$

$$\text{де } \bar{T}_{1,n} = \frac{1}{\delta_t} \int_0^{\delta_t} T_{1,n}(x, r_0 + r') dr', \quad \bar{T}_{2,n} = \frac{1}{\delta_f} \int_0^{\delta_f} T_{2,n}(x, r_0 + r') dr' \quad - \text{усереднені}$$

значення температур по товщині труби і виступів для n -ї комірки, r_0 – внутрішній радіус труби, мм.

Зазначимо, що область зміни координати x знаходиться в межах $0 \leq x \leq L$, має початок біля входу зовнішнього теплоносія в трубний пучок і визначається його довжиною L .

Густина відведених теплових потоків на поверхні виступу, а також на зовнішній та внутрішній поверхнях труби при довільному розподілі температурного напору на поверхні залежно від геометрії поверхні визначаються функціональними співвідношеннями, які запропоновані в роботах [2,5].

При великих міжреберних відстанях $h \ll s$ маємо такі співвідношення для локальних теплових потоків на зовнішній поверхні окремого виступу в кожній із зон $m=I, II, IV$:

$$q_{for,mn}(x, \bar{T}_{1n}) = \alpha_{1sn}^*(x) \left[\bar{T}_{1n}(x=x_{mn}) - T_{gmn} + \int_x^{x_{mn}} f(|x_{mn}-x|, |x_{mn}-x'|) \frac{d\bar{T}_{1n}}{dx'} dx' \right], \quad (4)$$

де x_{mn} – координата початку формування ПШ у m -й зоні (див. рис. 2);

T_{gsm} – температура теплоносія на зовнішній границі ПШ у відповідній зоні, $^{\circ}\text{C}$;

$f(x, \xi) = [1 - (\xi/x)^{C_1}]^{-C_2}$ – функція впливу необігрітої ділянки, а ін-

декс «*» позначає ізотермічну поверхню. Значення показників C_1, C_2 залежно від режиму течії і чисел Прандтля наведено в роботах [1,2,5].

Для ПШ локальні значення коефіцієнта тепловіддачі на ізотермічній поверхні визначаються за формулою:

$$\alpha^*(x) = c \lambda_g \text{Pr}^n \text{Re}_x^m / x, \quad (5)$$

де λ_g – коефіцієнт теплопровідності теплоносія, Вт/м⁰С; Pr – число Прандтля; $\text{Re}_x = Ux / \nu$ – число Рейнольдса, розраховане за швидкістю U на зовнішній границі ПШ; x – довжина формування ПШ, а коефіцієнт c і показники n, m визначаються на підставі розрахункових або експериментальних даних [6].

Температура зовнішнього потоку T_{gmn} у зонах приєднаної та відривної течії визначається з умови балансу теплоти, переданої від поверхні обтікання зовнішнього теплоносія. Методи її розрахунку наведено в [1].

Густина відведеного теплового потоку на внутрішній поверхні гладкої труби визначається за виразом:

$$q_{aft,n}(x, \bar{T}_{jn}) = \alpha_{1,cp}(\bar{T}_{jn} - T_{g1n}), j = 1, 2; , \quad (6)$$

де $\alpha_{1,cp}, T_{g2n}$ – усереднене значення коефіцієнта теплообміну на внутрішній поверхні труби та температура теплоносія всередині труби, методика розрахунку яких для ламінарного та турбулентного режимів течії наведені в [1,5].

Загальний алгоритм чисельного розрахунку системи інтегродиференціальних рівнянь (1), (2) з граничними умовами (3) і співвідношеннями для густин відведених теплових потоків (4), (5) викладено, наприклад, в [1]. Для розрахунку отриманих рівнянь використано чисельну схему Рунге-Кутта за ітераційною схемою, а обчислення інтегральних членів проводилося із застосуванням методу трапецій [4]. Використовуючи описану вище методику розрахунку, знаходилися локальні та інтегральні теплові характеристики в кожній комірці між виступами. В процесі розрахунку визначалася загальна кількість тепла, передана стінкою з інтенсифікаторами шляхом підсумовування теплових потоків, що відво-

дяться з поверхні всіх комірок: $Q_2 = \sum_{n=1}^N \Delta Q_{2,n}$. Величина теплового пото-

ку, відведеного з поверхні i -ї комірки, дорівнює:

$$\Delta Q_{2,n} = 2\pi r_1 \left[\sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^4 \int_{x_{on}}^{x_{o,n+1}} q_{for,mn}(x, \bar{T}_{j,n}) dx \right],$$

де $n = 1, 2, \dots, N$; N – кількість комірок по довжині труби.

Усереднений по поверхні коефіцієнт тепловіддачі визначається виразом: $\bar{\alpha}_2 = Q_2 / [NF_p(T_L - T_{g2})]$, де $F_p = 2\pi r_1[\pi R_l + (s - l)]$ – площа поверхні окремої комірки (R_l – радіус кривизни виступу, мм; r_1 – зовнішній

радіус труби, мм), $T_L - T_{g2} = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^2 \int_0^L [\bar{T}_{jn}(x) - T_{g2n}] dx$ – усереднений температурний напір по довжині труби, $^{\circ}\text{C}$.

Зміну температури теплоносіїв у трубі і міжтрубному просторі на ділянці труби довжиною Δx визначали за формулою: $T_{gi}(x + \Delta x) = T_{gi}(x) + \Delta T_{gi}$, $i = 1, 2$; а збільшення температури теплоносія ΔT_{gi} знаходилося з балансного співвідношення:

$$\Delta T_{gi} = \Delta Q_i / [U_i c_{pi} \rho_i F_{ci} \Delta x], i = 1, 2;$$

де U_i – усереднена по перерізу швидкість течії, м/с; F_{ci} – площа поперечного перерізу для i -го теплоносія, м^2 ; c_{pi}, ρ_i – відповідно питома теплоємність і густина i -го теплоносія, $\text{кДж/кг}^{\circ}\text{C}$, кг/м^3 .

Результати досліджень. Для апробації розробленої моделі тепlopерееносу труб з інтенсифікаторами проведено порівняння результатів розрахунку із залежностями, отриманими в [3] експериментальним шляхом для труб з накаткою. Результати порівняння розрахункової та експериментальної залежності $Nu / Nu_{2л}$ для труб з інтенсифікаторами для

$Re_{d1} = 2,02 \times 10^3$, $h/s = 0,1$ наведено на рис. 3, де $Nu = \bar{\alpha}_2 d_1 / \lambda_{g2}$,

$Nu_{2л} = \bar{\alpha} d_1 / \lambda_g$ – усереднене число Нуссельта по довжині труби, відповідно для поверхні з інтенсифікаторами і гладкої поверхні [1,5]. Максимальні відмінності між розрахунковими та експериментальними даними складають $\pm 17\%$.

Розрахунки з визначення теплових характеристик шахового пучка труб з інтенсифікаторами, виготовлених із сталі, проводились для випадку, коли міжреберна відстань змінювалося в діапазоні $s/h = 8 - 15$. Як зовнішній і внутрішній теплоносії вибрано, відповідно повітря і вода.

Прийнято такі значення вхідних динамічних і температурних параметрів та геометричні розміри труби з інтенсифікаторами: $U_{2\infty} = 5 \text{ м/с}$,

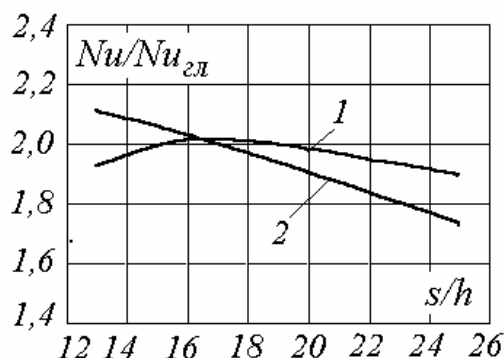


Рис. 3. Залежність $Nu / Nu_{2л}$ від відстані між виступами s/h :

1 – розрахункова крива; 2 – експериментальна залежність [3]

$T_{g2\infty} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_{1\infty} = 0,015\text{ м/с}$, $T_{g1\infty} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $d_0 = 25\text{ мм}$, $d_1 = 26\text{ мм}$, $h = 5\text{ мм}$, $L = 1\text{ м}$. Результати розрахунків наведено на рис. 4–5.

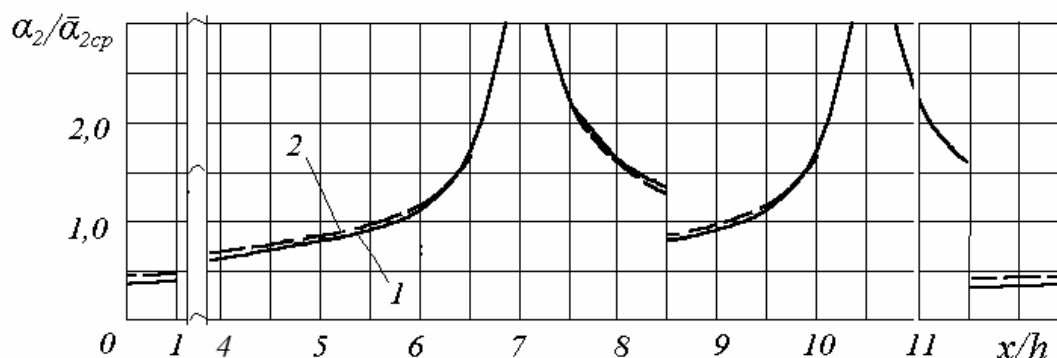


Рис. 4. Розподіл локальних коефіцієнтів тепловіддачі в комірці між виступами на внутрішній поверхні труби при $s/h = 11$:

1 – розв’язок спряженої задачі; 2 – ізотермічна поверхня

На рис. 4 показано розподіли локальних коефіцієнтів тепловіддачі α_2 у комірці між сусідніми виступами на внутрішній поверхні труби. Як видно з рис. 4, у разі великих відстаней між виступами максимальні значення коефіцієнтів тепловіддачі спостерігаються на ділянках приєднання зовнішнього потоку до поверхні труби (в області точок x_{1n} і x_{3n} на рис. 4), а найменші значення недалеко від точок відриву зовнішнього течії (в областях, прилеглих до точок x_{2n} і x_{4n} на рис. 4).

У плані практичного застосування розглянутих поверхонь найбільший інтерес представляє така геометрія поверхні з інтенсифікаторами, для якої з одиниці площі теплообмінної поверхні відводиться максимальна кількість тепла. Щоб визначити поверхні з оптимальним розміщенням інтенсифікаторів були проведені варіантні розрахунки величини густини теплового потоку $q_{2,cp} = Q_2 / F_{2,mp}$ ($F_{2,mp}$ – площа зовнішньої поверхні труби з інтенсифікаторами, м^2), яка поділена на густину потоку для гладкої поверхні $q_{2,cp,gl}$, при варіюванні величини проміжку між сусідніми виступами s . Результати розрахунків наведено на рис. 5.

Розрахунки проводилися для заданого числа Рейнольдса $Re_h = U_{2\infty} h / \nu = 1,6 \times 10^3$ ($U_{2\infty}$ – швидкість течії в міжтрубному просторі, м/с). Як видно з рис. 5, оптимальні значення відстаней між виступами знаходяться у межах $s/h = 13–16$. Як впливає з проведених розрахунків, вказані відстані корелюються з експериментально визначеними оптимальними відстанями між елементами накатки, які близькі до значення $s/h \approx 10$ [3].

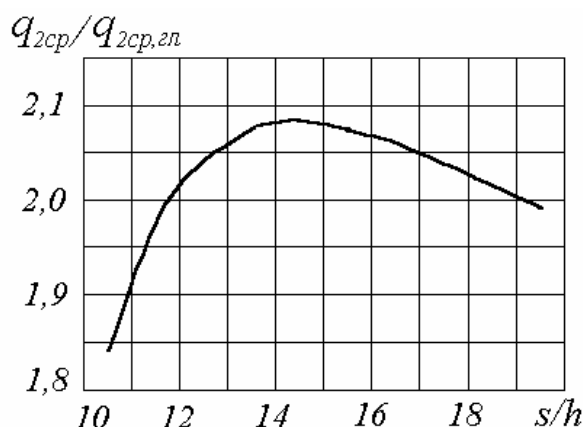


Рис. 5. Залежність густини відведеного теплового потоку в залежності від відстані між інтенсифікаторами

Висновки

1. Розроблено математичну модель теплопереносу, проведено чисельний розрахунок та одержано основні інтегральні і локальні теплові характеристики для шахових пучків труб з напівциліндричними інтенсифікаторами.

2. Проведено зіставлення розрахункових даних з відомими експериментальними результатами. Показано, що використання інтенсифікаторів в 1,9–2,0 рази інтенсифікує процеси теплопереносу в порівнянні з гладкотрубними поверхнями.

3. Базуючись на розробленій моделі теплопереносу визначено оптимальну геометрію поверхні з напівциліндричними інтенсифікаторами, що дає можливість покращити габаритні та вагові характеристики теплообмінників різного призначення.

Список літератури

1. Горобец В. Г. Теплообмен при обтекании неизотермических развитых поверхностей теплообмена / В.Г. Горобец. – К.: «ЦП «Компринт», 2011. – 353 с.
2. Дорфман А.Ш. Теплообмен при обтекании неизотермических тел / А.Ш. Дорфман. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
3. Калинин Э.К. Интенсификация теплообмена в каналах / Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
4. Калиткин Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М. Энергия, 1972. – 680 с.
5. Кэйс В.М. Конвективный тепло- и массоперенос / В.М. Кэйс. – М.: Энергия, 1972. – 446 с.
6. Себиси Т. Конвективный теплообмен / Т. Себиси, П. Бредшоу. – М.: Мир, 1987. – 590 с.

Розроблено математическую модель и проведено численные расчеты теплопереноса для шахматных пучков труб при наличии полуцилиндрических интенсификаторов на внешней поверхности. Получены локальные и интегральные характеристики исследуемых поверхностей. Проведено сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными для

труб с интенсификаторами в виде накатки. Показано, что применение интенсификаторов в 1,9–2,0 раза повышает тепловую эффективность пучков по сравнению с гладкотрубными поверхностями. Определено оптимальную геометрию размещения интенсификаторов на поверхности труб.

Пучок труб, полуцилиндрические интенсификаторы, математическое моделирование, теплообмен, оптимальная геометрия.

The mathematical model and heat transfer calculations for the chess tube bundles with semi-cylindrical intensifiers are developed. Local and integral characteristics of the studied surfaces are obtained. A comparison of the calculated results with experimental data for tubes with intensifiers is made. It is shown that the use of intensifiers increase thermal efficiency in 1,9–2,0 times compared with a smooth surfaces. The optimal geometry placement of intensifiers on the tube surfaces is found.

Tube bundles, semi-cylindrical intensifiers, mathematical model, heat transfer, optimal geometry.

УДК 526.24

ТЕПЛООБМІН ПУЧКА ТРУБ З НАПІВЦИЛІНДРИЧНИМИ ІНТЕНСИФІКАТОРАМИ. 2. РОЗРАХУНОК ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ

В. Г. Горобець, доктор технічних наук

Розроблено математичну модель та проведено розрахунок гідравлічного опору для шахових пучків труб за наявності напівциліндричних інтенсифікаторів на зовнішній поверхні. Отримано залежності коефіцієнта гідравлічного опору від величини відстані між інтенсифікаторами для досліджуваних поверхонь. Проведено зіставлення результатів розрахунку з експериментальними даними для труб з інтенсифікаторами у вигляді накатки. Показано, що застосування інтенсифікаторів збільшує гідравлічний опір таких поверхонь порівняно з гладкотрубними поверхнями. Визначено, що на величину гідравлічного опору суттєво впливає геометрія розміщення інтенсифікаторів на поверхні труб та величина числа Рейнольдса у зовнішньому потоці.

Пучок труб, напівциліндричні інтенсифікатори, математичне моделювання, гідравлічний опір.

Умови гідродинамічного обтікання поверхні з інтенсифікаторами суттєво відрізняються від умов, які мають місце при обтіканні гладкотрубних пучків труб. Це обумовлено як зміною площі поперечного перерізу в міжтрубному просторі, так і відмінностями у формуванні пристінної течії на поверхні з інтенсифікаторами, за наявності яких має місце турбуліза-

© В. Г. Горобець, 2013

труб с интенсификаторами в виде накатки. Показано, что применение интенсификаторов в 1,9–2,0 раза повышает тепловую эффективность пучков по сравнению с гладкотрубными поверхностями. Определено оптимальную геометрию размещения интенсификаторов на поверхности труб.

Пучок труб, полуцилиндрические интенсификаторы, математическое моделирование, теплообмен, оптимальная геометрия.

The mathematical model and heat transfer calculations for the chess tube bundles with semi-cylindrical intensifiers are developed. Local and integral characteristics of the studied surfaces are obtained. A comparison of the calculated results with experimental data for tubes with intensifiers is made. It is shown that the use of intensifiers increase thermal efficiency in 1,9–2,0 times compared with a smooth surfaces. The optimal geometry placement of intensifiers on the tube surfaces is found.

Tube bundles, semi-cylindrical intensifiers, mathematical model, heat transfer, optimal geometry.

УДК 526.24

ТЕПЛООБМІН ПУЧКА ТРУБ З НАПІВЦИЛІНДРИЧНИМИ ІНТЕНСИФІКАТОРАМИ. 2. РОЗРАХУНОК ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ

В. Г. Горобець, доктор технічних наук

Розроблено математичну модель та проведено розрахунок гідравлічного опору для шахових пучків труб за наявності напівциліндричних інтенсифікаторів на зовнішній поверхні. Отримано залежності коефіцієнта гідравлічного опору від величини відстані між інтенсифікаторами для досліджуваних поверхонь. Проведено зіставлення результатів розрахунку з експериментальними даними для труб з інтенсифікаторами у вигляді накатки. Показано, що застосування інтенсифікаторів збільшує гідравлічний опір таких поверхонь порівняно з гладкотрубними поверхнями. Визначено, що на величину гідравлічного опору суттєво впливає геометрія розміщення інтенсифікаторів на поверхні труб та величина числа Рейнольдса у зовнішньому потоці.

Пучок труб, напівциліндричні інтенсифікатори, математичне моделювання, гідравлічний опір.

Умови гідродинамічного обтікання поверхні з інтенсифікаторами суттєво відрізняються від умов, які мають місце при обтіканні гладкотрубних пучків труб. Це обумовлено як зміною площі поперечного перерізу в міжтрубному просторі, так і відмінностями у формуванні пристінної течії на поверхні з інтенсифікаторами, за наявності яких має місце турбуліза-

© В. Г. Горобець, 2013

ція потоку, руйнування приграничного шару (ПШ) на початкових ділянках його формування, створення ділянок відриву і приєднання потоку до поверхні обтікання, які чергуються між собою, тощо. Умови та характер гідродинамічної течії на поверхні труби з інтенсифікаторами докладно розглянуто в [1]. При розрахунку гідравлічних втрат необхідно розглядати локальні втрати тиску в кожній із зон відриву та приєднання зовнішньої течії до поверхні обтікання.

З метою зниження гідравлічних втрат використовують інтенсифікатори у вигляді виступів, заглиблень або канавок та інші типи інтенсифікаторів, причому їх геометричну форму вибирають з добре обтічним профілем, тобто такою, що не має гострих кутів і кромek. При цьому потрібно вибирати таку геометрію поверхні, для якої процес інтенсифікації теплообміну не призводить до суттєвого зростання гідравлічних втрат.

Мета досліджень – розробка математичної моделі та проведення розрахунку гідравлічних втрат для поверхонь з напівциліндричними виступами при великих відстанях між ними; визначення впливу геометричних та динамічних параметрів об'єкта дослідження на величину гідравлічних опорів.

Матеріали та методика досліджень. Розрахунок гідравлічного опору із зовнішнього боку трубного пучка проводимо за такою методикою. Для труби з інтенсифікаторами виділяється елементарна ділянка поверхні, що повторюється. Оскільки умови гідродинамічної течії у сусідніх комірках ідентичні, то достатньо провести розрахунок гідравлічних опорів для окремої комірки і виконати підсумовування гідравлічних опорів для всіх комірок по довжині труби [1]. У зовнішньому виділеному каналі трубного пучка повний коефіцієнт гідравлічного опору розраховується за формулою [3]:

$$\zeta = \zeta_p + \zeta_{mp}, \quad (1)$$

де ζ_p , ζ_{mp} – дві складові коефіцієнта тертя, які обумовлені відповідно зміною поперечного перерізу міжтрубного каналу та опором тертя на поверхні труби з інтенсифікаторами. Складова коефіцієнта гідравлічного опору за рахунок зміни площі поперечного перерізу каналу для виділеного елемента дорівнює:

$$\zeta_p = \zeta_{1,p} + \zeta_{2,p}, \quad (2)$$

причому $\zeta_{1,p}$ враховує стиснення поперечного перерізу каналу і визначається за виразом:

$$\zeta_{1,p} = k_1(1 - F_1 / F_0), \quad (3)$$

а $\zeta_{2,p}$ – його розширення, обчислюється за формулою:

$$\zeta_{2,p} = k_2(1 - F_1 / F_2)^2. \quad (4)$$

Для виступів відповідні площі поперечних перерізів дорівнюють $F_0 = F_2 = \pi(d_e^2 - d_1^2)/4$; $F_1 = \pi[d_e^2 - (d_1 + 2h)^2]/4$, де d_e – зовнішній екві-

валентний діаметр каналу, мм; d_1 – зовнішній діаметр труби, мм; h – висота виступу, мм (рис. 1).

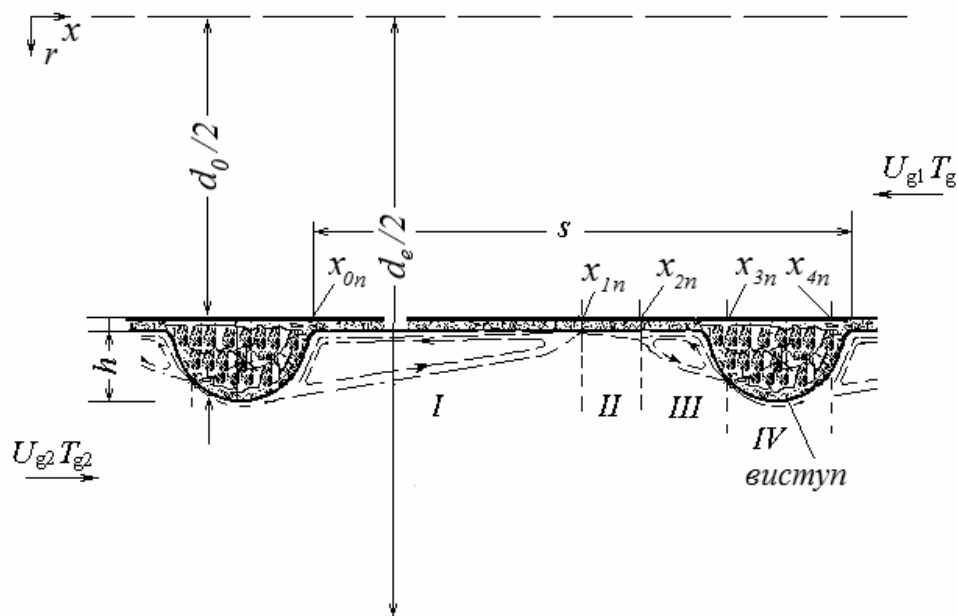


Рис. 1. Схема розрахунку гідравлічних опорів

Коефіцієнти опору тертя для j -тої елементарної комірки між виступами поверхні з накаткою визначаються шляхом підсумовування окремих складових опорів на ділянках I–IV, що мають протяжність L_i і визначаються за формулою:

$$\zeta_{j,mp} = \sum_{i=1}^n L_i \zeta_{i,mp} / s, \quad (5)$$

де i – номер ділянки для окремої комірки; n – кількість ділянок у комірці. При великих відстанях між виступами $h \ll s$ $i = I, II, III, IV$; $n = VI$; а коефіцієнти тертя $\zeta_{i,mp}$ в області приєднаного ПШ ($i = I, III$) і в шарі змішування на ділянках відривних течій ($i = II, IV$) для ламінарного та турбулентного режимів течії знаходяться із співвідношень

$$\zeta_{mp} = 0,664 \text{Re}_x^{-0,5}; \quad (39)$$

$$\zeta_{mp} = 0,074 \text{Re}_x^{-0,2}, \quad (40)$$

x – характерна довжина ділянки, м.

Падіння тиску по довжині каналу визначається шляхом підсумовування їх на окремих ділянках каналу і визначається за виразом:

$$\Delta p = \zeta \frac{L}{s} \frac{1}{2} \rho U^2, \quad (41)$$

де s – відстань між виступами, мм; L – довжина труби, м; U – швидкість течії в вузькому перерізі каналу, м/с; ζ – коефіцієнт гідравлічного опору в окремій комірці.

Результати досліджень. Використовуючи розроблену методику розрахунку гідравлічних втрат, був проведений розрахунок гідравлічних опорів для труб з напівциліндричними інтенсифікаторами при великих відстанях між сусідніми виступами. Розрахунок проводився при таких значеннях геометричних параметрів пучка $d_0 = 14$ мм, $d_1 = 16$ мм, $h = 5$ мм, $L = 1$ м при варіюванні швидкості зовнішнього потоку. Результати розрахунку подано у вигляді залежності обчисленого гідравлічного опору, поділеного на гідравлічний опір для гладкої поверхні, від числа Рейнольдса $Re_D = U_{2v} D / \nu$, (U_{g2} – швидкість у вузькому перерізі міжтрубного каналу, м/с; $D = d_1 + 2h$ – зовнішній діаметр труби з інтенсифікаторами, мм) при різних значеннях відстаней між сусідніми ребрами s/h (рис. 2). Як випливає з отриманих залежностей наявність інтенсифікаторів в 2–5 разів збільшує гідравлічні втрати в трубному пучку порівняно з гладкотрубною поверхнею.

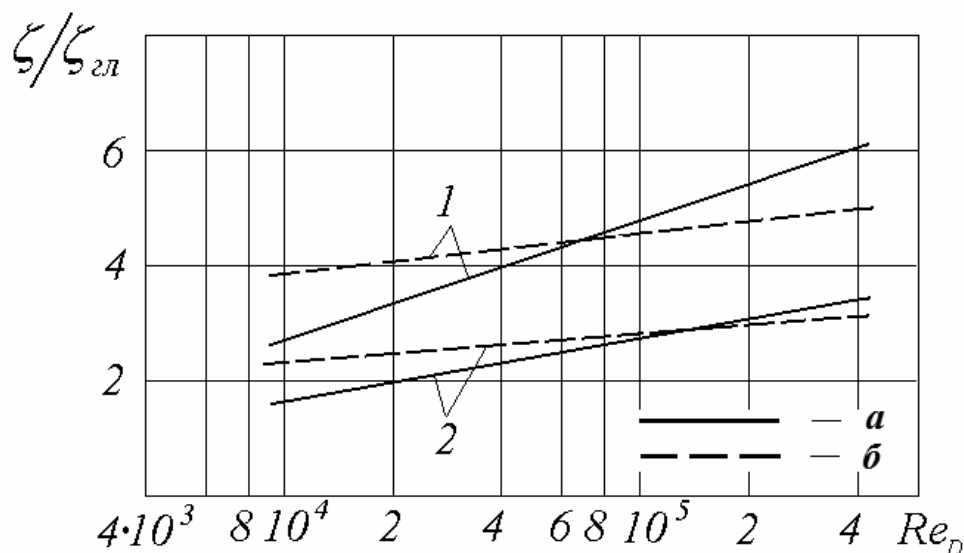


Рис. 2. Залежність коефіцієнта гідравлічного опору ξ від числа Re_D :
 a – розрахункові дані; $б$ – експериментальні дані [4]; 1 – $s/h = 11,95$; 2 – 23,9

При цьому величина гідравлічного опору збільшується із зростанням числа Рейнольдса і зменшенням відстані між сусідніми інтенсифікаторами.

Проведено порівняння результатів розрахунку коефіцієнтів гідравлічного опору за вищевикладеною методикою та експериментальних даних для труби з накаткою [2] (рис. 2). Як випливає з рис. 2 є деяке завищення розрахункових даних для міжреберних відстаней $s/h = 11,95$ і 23,9 з максимальною похибкою близько 27 % у першому випадку і близько 17 % у другому.

Слід зауважити, що при виборі висоти інтенсифікаторів та відстані між ними необхідно вибирати таку геометрію поверхні, при якій при максимальних значеннях коефіцієнта теплообміну на поверхні гідравлічні втрати не повинні мати великі значення.

Висновки

1. Розроблено методику розрахунку гідравлічних втрат, проведено чисельний розрахунок та одержано гідравлічні опори для шахових пучків труб з напівциліндричними інтенсифікаторами.

2. Проведено зіставлення розрахункових даних з відомими експериментальними результатами. Максимальні відмінності між ними складають від 17 % до 27 %.

3. Показано, що наявність інтенсифікаторів в 2–5 разів збільшує гідравлічні втрати порівняно з гладкотрубними пучками труб. Гідравлічні опори труб з напівциліндричними інтенсифікаторами збільшуються зі зростанням числа Рейнольдса і зменшенням відстані між інтенсифікаторами.

Список літератури

1. Горобець В.Г. Теплообмін пучка труб з напівциліндричними інтенсифікаторами. 1. Тепловий розрахунок / В.Г. Горобець // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2013. – Вип. 184, ч. 1. – С 53-62.

2. Горобець В.Г. Теплообмен при обтекании неизотермических развитых поверхностей / В.Г. Горобец. – К.: ЦП «Компринт», 2011. – 297 с.

3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 536 с.

4. Калинин Э.К. Интенсификация теплообмена в каналах / Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.

Разработана математическая модель и выполнен расчет гидравлических сопротивлений для шахматных пучков труб при наличии полуцилиндрических интенсификаторов на внешней поверхности. Получены зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от величины расстояния между интенсификаторами для исследуемых поверхностей. Проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными для труб с интенсификаторами в виде накатки. Показано, что использование интенсификаторов повышает гидравлическое сопротивление таких поверхностей по сравнению с гладкотрубными поверхностями. Определено, что на величину гидравлического сопротивления существенно влияет геометрия размещения интенсификаторов на поверхности труб и величина числа Рейнольдса во внешнем потоке.

Пучок труб, полуцилиндрические интенсификаторы, математическое моделирование, гидравлическое сопротивление.

The mathematical model and calculation of hydraulic resistance for chess beam pipe in the presence of semi-cylindrical intensifiers on the outer surface. The dependences of the hydraulic resistance coefficient from the distance between the intensifier for the studied surfaces. Comparison of calculation results with experi-

mental data for pipes intensifiers is made. It is shown that the use of intensifiers increases the hydraulic resistance of such surfaces compared with smooth surfaces. It is found that a geometry placement of intensifiers on the surface and size of Reynolds number in the external flow has a significant influence on the value of hydraulic resistance.

Beam pipes, semi-cylindrical intensifiers, mathematical modeling, hydraulic resistance.

УДК 536 (075.8)

АНАЛИЗ ОТДЕЛЬНЫХ ВОПРОСОВ ЭНТРОПИИ

Б.Х. Драганов, доктор технических наук

Приведена общая характеристика энтропии с позиции классической термодинамики. Изложены основы свободной энергии Гиббса и свободной энергии Гельмгольца, химического потенциала. Выполнен анализ локальной энтропии, минимума производства энтропии, баланса энтропии на основе положений неравновесной термодинамики.

Энтропия, необратимые процессы, изобарно-термический потенциал, изохорно-термический потенциал, термодинамические сила и потоки.

Цель исследований – анализ энтропии для равновесных и неравновесных процессов и оценка степени генерации энтропии.

Материалы и методика исследований. Анализ энтропии в рамках классической термодинамики приведен в ряде работ, среди которых следует выделить авторов: Р. Беккер, А.А. Гухман, А.Ф. Булендра, И. Пригожин. Вместе с тем следует отметить, что такие вопросы, как локальная энтропия, минимум генерации энтропии, свободная энергия Гиббса и др. не нашли должного изложения.

Метод исследования основан на основных положениях феноменологической термодинамики.

Результаты исследований. Эволюция произвольного состояния к состоянию равновесия происходит в результате необратимых процессов. В состоянии равновесия эти процессы прекращаются. Таким образом, неравновесное состояние можно определить как такое, в котором необратимые процессы вынуждают систему эволюционировать к состоянию равновесия.

Изменение энтропии можно представить как сумму двух слагаемых:

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (1)$$

mental data for pipes intensifiers is made. It is shown that the use of intensifiers increases the hydraulic resistance of such surfaces compared with smooth surfaces. It is found that a geometry placement of intensifiers on the surface and size of Reynolds number in the external flow has a significant influence on the value of hydraulic resistance.

Beam pipes, semi-cylindrical intensifiers, mathematical modeling, hydraulic resistance.

УДК 536 (075.8)

АНАЛИЗ ОТДЕЛЬНЫХ ВОПРОСОВ ЭНТРОПИИ

Б.Х. Драганов, доктор технических наук

Приведена общая характеристика энтропии с позиции классической термодинамики. Изложены основы свободной энергии Гиббса и свободной энергии Гельмгольца, химического потенциала. Выполнен анализ локальной энтропии, минимума производства энтропии, баланса энтропии на основе положений неравновесной термодинамики.

Энтропия, необратимые процессы, изобарно-термический потенциал, изохорно-термический потенциал, термодинамические сила и потоки.

Цель исследований – анализ энтропии для равновесных и неравновесных процессов и оценка степени генерации энтропии.

Материалы и методика исследований. Анализ энтропии в рамках классической термодинамики приведен в ряде работ, среди которых следует выделить авторов: Р. Беккер, А.А. Гухман, А.Ф. Булендра, И. Пригожин. Вместе с тем следует отметить, что такие вопросы, как локальная энтропия, минимум генерации энтропии, свободная энергия Гиббса и др. не нашли должного изложения.

Метод исследования основан на основных положениях феноменологической термодинамики.

Результаты исследований. Эволюция произвольного состояния к состоянию равновесия происходит в результате необратимых процессов. В состоянии равновесия эти процессы прекращаются. Таким образом, неравновесное состояние можно определить как такое, в котором необратимые процессы вынуждают систему эволюционировать к состоянию равновесия.

Изменение энтропии можно представить как сумму двух слагаемых:

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (1)$$

где $d_e S$ – изменение энтропии системы, обусловленное обменом энергии и веществом; $d_i S$ – изменение энтропии, обусловленное необратимыми процессами внутри системы.

Локальное производство энтропии. Вторым законом термодинамики должен быть локальным законом. Разделим систему на r частей. Тогда

$$d_i S = d_i S^1 + d_i S^2 + \dots + d_i S^r \geq 0, \quad (2)$$

где $d_i S^k$ – производство энтропии k -й части, причем для каждого k

$$d_i S^k \geq 0. \quad (3)$$

Несомненно, утверждение, что производство энтропии в каждой части системы, вызванное необратимыми процессами, – положительная величина, является более строгим, чем классическая формулировка второго закона (энтропия изолированной системы может только расти или оставаться без изменения). Заметим, что второй закон термодинамики в такой формулировке не требует, чтобы система была изолирована. Это справедливо для всех систем независимо от граничных условий.

Локальное увеличение энтропии в непрерывных средах может быть определено с помощью плотности энтропии $s(x,t)$. Как и в случае полной энтропии $ds = d_i s + d_e s$, причем $d_i s \geq 0$. Определим локальное производство энтропии так:

$$\sigma(x,t) \equiv \frac{d_i s}{dt} \geq 0; \quad (4)$$

$$\frac{d_i s}{dt} = \int_V \sigma(x,t) dV. \quad (5)$$

Для необратимых процессов, которые можно изучить экспериментально, неравновесная термодинамика основана на явном выражении для σ . Прежде чем выводить это выражение, запишем явные уравнения баланса локальной энергии и локальных концентраций.

Минимум производства энтропии. В термодинамической системе различным силам F_k ($k = 1, 2, \dots, n$) соответствуют различные потоки I_k . Система может находиться вдали от равновесия, удерживая некоторые силы F_k ($k = 1, 2, \dots, s$) при фиксированных ненулевых значениях и оставляя остальные силы F_k ($k = s + 1, \dots, n$) свободными. В этом случае потоки, соответствующие удержанным силам, достигают постоянных значений ($I_k = \text{const}$, где $k = 1, 2, \dots, s$), в то время как свободные силы приводят соответствующие потоки к нулевому значению $I_k = 0$ ($k = s+1, \dots, n$).

В линейном режиме полное производство энтропии систем для потоков энергии и вещества $ds/dt = \int \sigma dV$ (где σ – генерация энтропии) в равновесном состоянии достигает минимального значения. Это положение

ние, так называемое «принцип наименьшей диссипации энтропии», был предложен Рэлеем.

Свободная энергия Гиббса и химический потенциал. Большой вклад в термодинамику химических процессов внес Дж.У. Гиббс. Он рассматривал гетерогенную систему, состоящую из нескольких однородных частей, каждая из которых содержала вещества $S_1, S_2, \dots, S_n$ с массами $m_1, m_2, \dots, m_n$.

Полагая, что изменения энергии dU некоторой однородной части должно быть пропорционально массе вещества $dm_1, dm_2, \dots, dm_n$, Гиббс предложил уравнение, которое выполняется в любой однородной части системы:

$$dU = TdS - pdV + \mu_1 dm_1 + \mu_2 dm_2 + \dots + \mu_n dm_n, \quad (6)$$

где μ_k – химический потенциал.

Химические реакции неудобно описывать с помощью изменения масс реагентов. Гораздо привычнее и удобнее использовать для этого изменения числа молей, так как скорости химических реакций и законы диффузии легче всего формулировать с помощью молярных величин. Запишем соотношение (6), выразив количество вещества в молях:

$$dU = TdS - pdV + \mu_1 dN_1 + \mu_2 dN_2 + \dots + \mu_n dN_n. \quad (7)$$

Принимая во внимания зависимость (7), получим

$$d_i S = -\frac{1}{T} \sum_1^n \mu_k d_i N_k > 0. \quad (8)$$

Для закрытой системы $d_e N_k = 0$. Скорость химической реакции по компоненту k определяется величиной dN_k / dt , поэтому производство энтропии можно записать так:

$$d_i S = -\frac{1}{T} \sum_1^n \mu_k \frac{dN_k}{dt} > 0 \quad (9)$$

Чтобы показать различие между внешними силами и внешней средой, выразим материальные изменения в молях dN_k в виде:

$$dN_k = d_i N_k + d_e N_k, \quad (10)$$

где $d_i N_k$ – изменения вследствие необратимых процессов, $d_e N_k$ – изменения, вызванные обменом веществ с внешней средой.

Соотношение (10) позволяет записать изменение энтропии для такого процесса:

$$\begin{aligned} d_i S &= \frac{dU + pdV}{T} - \left(\frac{\mu_2 - \mu_1}{T} \right) d\xi \\ &= \frac{dU + pdV}{T} + \frac{A}{T} d\xi \end{aligned} \quad (11)$$

Если $dU + pdV = 0$, то перенос частиц приводит к изменению энтропии:

$$d_i S = - \left(\frac{\mu_2 - \mu_1}{T} \right) d\xi > 0. \quad (12)$$

Согласно второму началу термодинамики эта величина должна быть положительной, т.е. перенос частиц происходит из области с высоким химическим потенциалом в область с низким химическим потенциалом. Это и есть процесс диффузии: частицы из области с высокой концентрацией переходят в область с низкой концентрацией.

Выше рассматривались гомогенные системы. Термодинамические зависимости можно сформулировать с помощью энтропии $sT(x)$, $m_k(x)$, которая есть функцией температуры и плотностей числа молей.

Выразим плотности энтропии и энергии как функции локальной температуры $T(x)$ и плотностей числа молей $n_k(x)$ (обе величины доступны для прямых измерений):

$$\begin{aligned} u &= u(T(x), n_k(x)) ; \\ s &= s(T(x), n_k(x)) ; \end{aligned} \quad (13)$$

Полную энтропию и полную энергию системы получают интегрированием соответственно плотности энтропии и плотности энергии по объему системы:

$$\begin{aligned} S &= \int_V s(T(x), n_k(x)) dV ; \\ U &= \int_V u(T(x), n_k(x)) dV . \end{aligned} \quad (14)$$

Так как система в целом не находится в термодинамическом равновесии, полная энтропия S в общем случае не является функцией полной энергии U и полного объема V . Тем не менее, термодинамическое описание остается возможным, если температура вполне определена в каждой точке пространства.

Изохорно-изотермический потенциал $F = F(V, T, N, x_i)$ является свободной энергией Гельмгольца. Между свободной энергией Гиббса и свободной энергией Гельмгольца существует зависимость:

$$\begin{aligned} F &= U - TS, \\ H &= V + pG, \\ G &= F + pV. \end{aligned} \quad (15)$$

С помощью этих зависимостей определяются условия термодинамического равновесия системы и ее устойчивость.

Энтропия процессов неравновесной термодинамики. Эволюция произвольного состояния к состоянию равновесия происходит в результате необратимых процессов. Температура во всех частях системы, находящейся в таком состоянии, становится одинаковой.

Однако равномерное распределение температуры не входит в число тех требований, при выполнении которых энтропия или энергия системы становится вполне определенной. Для неравновесных систем, в которых температура распределена неравномерно, но локально вполне определена, мы можем ввести плотности таких термодинамических величин (потенциалов), как энергия и энтропия. Например, плотность энергии

$$u(T(x), n_k(x)) = \text{внутренняя энергия на единицу объема} \quad (16)$$

может быть определена через локальную температуру T и молярную плотность $n_k(x)$ = число молей на единицу объема.

Аналогичным образом можно определить плотность энтропии $s(T, n_k)$. Тогда полную энергию U , полную энтропию S и полное число молей N системы можно выразить через соответствующие плотности:

$$S = \int_V s[T(x), n_k(x)] dV ; \quad (17)$$

$$U = \int_V u[T(x), n_k(x)] dV ; \quad (18)$$

$$N = \int_V n_k(x) dV . \quad (19)$$

В общем случае каждая из этих переменных – полная энергия U , энтропия S , число молей N и объем V – не является более функцией трех других переменных. В общем случае необратимое изменение $d_i S$ связано с потоком некоторой величины dX , например теплоты или вещества, за время dt . Для $dX = dQ$, где dQ – количество теплоты, которое передано за время dt ; для $dX = dN$, где dN – количество молей вещества, которые перешли (преобразовались) за время dt . И в том, и в другом случаях изменения энтропии можно представить в виде:

$$d_i S = F dX , \quad (20)$$

где F – термодинамическая сила.

В этом формализме термодинамические силы должны быть записаны в виде функций термодинамических переменных, таких, как температура и концентрация. Для потока вещества соответствующая термодинамическая сила может быть выражена по аналогии. Все необратимые процессы можно описать на языке термодинамических сил и термодинамических потоков. Изменения энтропии есть сумма всех изменений, вызванных необратимыми потоками dX_k , что позволяет обобщить:

$$d_i S = \sum_k F_k dX_k \geq 0 \quad \text{или} \quad \frac{d_i S}{dt} = \sum_k F_k \frac{dX_k}{dt} \geq 0. \quad (21)$$

Неравенство (21) выражает второе начало термодинамики. Производство энтропии каждым необратимым процессом равно произведению соответствующей термодинамической силы F_k и потока $J_k = dX_k/dt$.

Уравнение баланса энтропии. При выводе уравнения баланса энтропии следует исходить из уравнения сохранения энергии баланса по числу молей. Последнее уравнение содержит выражения для потока энтропии J_S и производства энтропии σ , которое вызвано необратимыми процессами, как теплопроводность, диффузия и химическая реакция. Уравнения баланса энтропии имеет вид:

$$\frac{ds}{dt} + \nabla \cdot J_S = \sigma \quad (22)$$

Для получения явного вида J_S и σ поступим так. Для упрощения рассмотрим систему при отсутствии внешних полей и диссипации кинетической энергии, обусловленной конвекцией или диффузией. Из соотношения Гиббса $Tds = du - \sum \mu_k dn_k$ – следует, что

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{1}{T} \frac{du}{dt} - \sum_k \frac{\mu_k}{T} \frac{dn_k}{dt} \quad (23)$$

Теперь с учетом уравнения баланса числа молей и уравнения баланса внутренней энергии, где $d(KE)/dt = 0$, выражение может быть записано как

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{1}{T} \nabla \cdot J_u + \sum_k \frac{\mu_k}{T} \nabla \cdot J_k - \sum_{k,j} \frac{\mu_k}{T} v_{jk} v_j. \quad (24)$$

Это же уравнение может быть упрощено и записано в виде (27), если учесть следующие замечания. Прежде всего, сродство A_j реакции j имеет вид

$$A_j = -\sum_k \mu_k v_{jk}. \quad (25)$$

Во-вторых, если g – скалярная функция, а J – вектор, то

$$\nabla \cdot (gJ) = J \cdot (\Delta g) + g(J \cdot \Delta). \quad (26)$$

С учетом (25) и (26) и после некоторых несложных преобразований можно переписать уравнение баланса энтропии (24) в таком виде:

$$\frac{ds}{dt} + \nabla \cdot \left(\frac{J_u}{T} - \sum_k \frac{\mu_k J_k}{T} \right) = J_u \cdot \nabla \frac{1}{T} - \sum_k J_k \cdot \nabla \frac{\mu_k}{T} + \sum_j \frac{A_j v_j}{T}. \quad (27)$$

Сравнивая это уравнение с (26), получаем, что

$$J_S = \left(\frac{J_u}{T} - \sum_k \frac{\mu_k J_k}{T} \right) \quad (28)$$

$$\sigma = J_u \cdot \nabla \frac{1}{T} - \sum_k J_k \cdot \nabla \frac{\mu_k}{T} + \sum_j \frac{A_j v_j}{T} \geq 0. \quad (29)$$

Это выражение – один из вариантов записи второго закона: $\sigma > 0$.

Уравнение Гиббса - Дюгема. Одно из важных соотношений в термодинамике – это уравнение Гиббса-Дюгема, которое показывает, что все интенсивные переменные T, p и μ_k независимы. Уравнение Гиббса-Дюгема выводится из фундаментального уравнения (6) Гиббса. Кроме того, используется соотношение о том, что энтропия – экстенсивная функция от U, V, N_k :

$$U = Ts - pV + \sum_k \mu_k N_k. \quad (30)$$

Или в дифференциальной форме:

$$dU = Tds + SdT - Vdp - pdV + \sum_k (\mu_k dN_k + N_k d\mu_k). \quad (31)$$

Это уравнение соглашается с уравнением (6), если

$$SdT - Vdp + \sum_k N_k d\mu_k = 0. \quad (32)$$

Соотношения (32) называется уравнением Гиббса-Дюгема. Оно показывает, что изменения интенсивных параметров T, p и μ_k не могут быть независимы.

Выводы

Энтропия охватывает все аспекты превращения вещества, изменения энергии и химического потенциала. Все процессы являются неравновесными и степени отклонения от равновесного состояния определяются величиной генерацией энтропии. Освещены отдельные вопросы (локальное производство энтропии; минимум производства энтропии; принципы свободной энергии; энтропия неравновесной термодинамики; энтропия фазовых систем и др.), которые важны для анализа современных природных явлений. Результаты исследований позволяют более точно определить основные характеристики энтропии.

Список литературы

1. Драганов Б.Х. Аналіз окремих характеристик ентропії / Б.Х. Драганов, Н.В. Чепурна // Науковий вісник НУБіП України, Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2012. – Вип. 174, ч. 2. – С.79– 82.
2. Квасников И.А. Термодинамика и статическая физика / И.А. Квасников. – М.: УРСС 2002. – 240 с.
3. Колмогоров А.Н. ДАН СССР / А.Н.Колмогоров. – М: Мир, 1958. – Т. 118. – 861 с.
4. Николис Дж. Динамика иерархических систем: эволюционное представление / Дж. Николис. – М: Мир, 1989. – 488 с.
5. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди; пер. с англ. Ю.А. Данилова и В.В. Белого. – М.: Мир, 2002. – 460 с.
6. Трайбус М. Термостатика и термодинамика / М. Трайбус. – М: Энергия, 1970. – 502 с.
7. Boltzmann L. Populare Schriften. – Leipzig, 1905.

8. De Groot S.K., Mazur P. Non – Equilibrium Thermodynamics. – Amsterdam: North Holland, 1969.
9. Emseley I. The Elements. – Oxford: Oxford University Press, 1989.
10. Gibbs J.W. Elementary Principles in Statical Mechanics – New – Hawen: Yale University Press, 1902.
11. Gibbs J.W. On the equilibrium of hetere.
12. Kett T. K., Anderson D. K., Ternary isothermal dissusion and the validity of the Onsager reciprocal relations. // I. Phys. Ehem, 73, 1968. – P. 1268 – 1274.
13. Petrosky T. , Prigogine I. Chaos Solution and Fractals. 7. (1996) – P. 445 – 495.
14. Prigogine I. Etude Thermodynamique des Procceses Irreversibles. – Liege Desover, 1947.
15. Prigogine I. Introduction in Thermodynamics of Inreversible Procceses. – N. Y.: Jon Wiley. – 1967.

Наведена загальна характеристика ентропії з позиції класичної термодинаміки. Викладено основи вільної енергії Гіббса та вільної енергії Гельмгольца, хімічного потенціалу. Виконано аналіз локальної ентропії, мінімуму виробництва ентропії, балансу ентропії на основі положень нерівноважної термодинаміки.

Ентропія, незворотні процеси, ізобарно-термічний потенціал, ізохорно-термічний потенціал, термодинамічні сила та потоки.

The general characteristics of the entropy from the perspective of classical thermodynamics. The foundations of the Gibbs free energy and Helmholtz free energy, chemical potential. The analysis of the local entropy production minimum entropy, entropy balance on the basis of non-equilibrium thermodynamics.

Entropy, irreversible processes, isobaric-thermal potential, isochoric-thermal potential, the thermodynamic force and flow.

УДК 621.365

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ В ЗАВАНТАЖЕННІ ЦИЛІНДРИЧНОГО ІНДУКТОРА

***І.П. Кондратенко, доктор технічних наук
В.П. Лисенко, кандидат технічних наук
Д.С. Комарчук, аспірант****

Запропоновано методику розрахунку завантаження індуктора в установці для термообробки насіння ріпаку. Досліджено розподіл температурного поля завантаження по довжині індуктора. Значення температури завантаження вздовж та по радіусу індуктора практично однаково. Це свідчить про рівномірність розподілу магнітної індукції по

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

© І.П. Кондратенко, В.П. Лисенко, Д.С. Комарчук, 2013

8. De Groot S.K., Mazur P. Non – Equilibrium Thermodynamics. – Amsterdam: North Holland, 1969.
9. Emseley I. The Elements. – Oxford: Oxford University Press, 1989.
10. Gibbs J.W. Elementary Principles in Statical Mechanics – New – Hawen: Yale University Press, 1902.
11. Gibbs J.W. On the equilibrium of hetere.
12. Kett T. K., Anderson D. K., Ternary isothermal dissusion and the validity of the Onsager reciprocal relations. // I. Phys. Ehem, 73, 1968. – P. 1268 – 1274.
13. Petrosky T. , Prigogine I. Chaos Solution and Fractals. 7. (1996) – P. 445 – 495.
14. Prigogine I. Etude Thermodynamique des Procceses Irreversibles. – Liege Desover, 1947.
15. Prigogine I. Introduction in Thermodynamics of Inreversible Procceses. – N. Y.: Jon Wiley. – 1967.

Наведена загальна характеристика ентропії з позиції класичної термодинаміки. Викладено основи вільної енергії Гіббса та вільної енергії Гельмгольца, хімічного потенціалу. Виконано аналіз локальної ентропії, мінімуму виробництва ентропії, балансу ентропії на основі положень нерівноважної термодинаміки.

Ентропія, незворотні процеси, ізобарно-термічний потенціал, ізохорно-термічний потенціал, термодинамічні сила та потоки.

The general characteristics of the entropy from the perspective of classical thermodynamics. The foundations of the Gibbs free energy and Helmholtz free energy, chemical potential. The analysis of the local entropy production minimum entropy, entropy balance on the basis of non-equilibrium thermodynamics.

Entropy, irreversible processes, isobaric-thermal potential, isochoric-thermal potential, the thermodynamic force and flow.

УДК 621.365

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ В ЗАВАНТАЖЕННІ ЦИЛІНДРИЧНОГО ІНДУКТОРА

***І.П. Кондратенко, доктор технічних наук
В.П. Лисенко, кандидат технічних наук
Д.С. Комарчук, аспірант****

Запропоновано методику розрахунку завантаження індуктора в установці для термообробки насіння ріпаку. Досліджено розподіл температурного поля завантаження по довжині індуктора. Значення температури завантаження вздовж та по радіусу індуктора практично однаково. Це свідчить про рівномірність розподілу магнітної індукції по

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

© І.П. Кондратенко, В.П. Лисенко, Д.С. Комарчук, 2013

діаметру каналу, а різний час нагріву завантаження у верхніх та центральних точках пояснюється «кінцевим» ефектом електромагнітного поля індуктора.

Індуктор, стержні, індукційний нагрів, теплообмінні процеси, ріпак, термообробка.

Циліндричні індуктори для нагріву осесиметричних виробів (труб та стержнів кругового перетину) найширше використовують при індукційному нагріві. Такі індуктори створюють магнітне поле, яке при достатньо великій довжині індуктора рівномірно розподіляється по внутрішньому периметру.

Іноді циліндричні індуктори називають індукторами поздовжнього магнітного поля через те, що напрямок магнітного поля збігається з поздовжнього віссю індуктора, вздовж якої розміщується виріб, що нагрівається.

Індуктори як теплообмінні агенти широко використовують при нагріві рідких середовищ (вода, молоко тощо). При цьому фізичні властивості рідин дозволяють знімати з теплообмінної поверхні значний тепловий потік. При застосуванні індукційного нагріву для термообробки сипких матеріалів таких як пісок, щебінь, сільськогосподарська продукція (зерно, олійне насіння) необхідно створювати розгалужену поверхню теплообміну.

Відоме використання циліндричного однофазного індуктора для нагріву повітря при пропусканні останнього через феромагнітні труби, які є завантаженням індуктора та теплообмінним апаратом [2]. Застосовуючи таку схему завантаження можна значно збільшити поверхню теплообміну та використовувати індукційний нагрів для термообробки дисперсного матеріалу, збільшуючи тепловіддачу через створення обертального руху багатостержневого завантаження циліндричного індуктора.

Параметри та геометричні розміри теплообмінного агрегату необхідно визначати з урахуванням розподілу температури по перерізу теплообмінного апарату. Літературні джерела [1,5] описують рівномірний розподіл індукції магнітного поля та наведених вихрових струмів у поздовжньому перерізі завантаження, але конкретних даних розподілу фізичних полів (електромагнітного та температурного) досі не наведено.

Мета досліджень – розробка методики розрахунку геометричних параметрів завантаження індуктора в установці для термообробки насіння ріпаку, дослідження розподілу температурного поля завантаження в індукторі.

Матеріали та методика досліджень. Для розрахунку установки температурної обробки олійного матеріалу необхідно визначити геометричні параметри теплообмінної поверхні. Поверхня складається з розрізеного пучка феромагнітних стержнів, які не мають електричних контактів між собою по всій довжині індуктора. Розташування стержнів у пучці вибираємо з умови самовільного витікання дисперсного матеріалу. Для

сипких матеріалів найменший діаметр отвору для самовільного витікання визначається як [6]:

$$A \geq (3 \div 6)a' \quad (1)$$

де a' – максимальний розмір частинок сипучого матеріалу, мм.

Максимальний розмір зерна ріпаку становить 2,14 мм [2], отже відстань між стержнями повинна бути в межах:

$$6.42 < A < 12.84.$$

Приймаючи діаметр каналу установки для попереднього нагріву зерна ріпаку D , розраховуємо кількість стержнів у каналі. Пропонується визначати кількість стержнів за принципом побудови рівномірного ряду. Тоді кількість діаметральних рядів у каналі за умов дотримання відстані між стержнями, що визначається за виразом (1), буде:

$$n = \frac{\frac{D}{2} - \bar{A}}{\bar{A} + d_{cm}}, \quad (2)$$

де d_{cm} – діаметр стержнів, мм; $\bar{A}$ – середня допустима відстань між стержнями, мм.

Кількість стержнів у кожному діаметральному ряді визначаємо так:

$$m_i = \frac{\pi d_i}{A_{\max} + d_{cm}}, \quad (3)$$

де d_i – діаметр i – того ряду стержнів, мм.

Діаметр каналу доцільно вибрати з міркувань приєднання нового обладнання до діючих установок. Так, для обладнання виробництва олії ріпаку у Навчально-науковій-виробничій лабораторії дизельного біопалива, що розташована у ВП НУБіП України „Агрономічна дослідна станція”, найприйнятніший діаметр каналу становить 152 мм. Для такого каналу кількість рядів стержнів на основі виразу (2) буде $n=5$, кількість стержнів у ряді – $m_1=5$; $m_2=11$; $m_3=16$; $m_4=21$; $m_5=27$. Довжину каналу з завантаженням приймемо рівною 1000 мм. При цьому враховується, що буде виконуватись умова довгого індуктора. Тобто довжина індуктора буде більшою за три діаметри індуктора

$$L_{\text{інд}} > 3D_{\text{інд}}. \quad (4)$$

Кількість витків, перетин провідників та виконання багатовиткового індуктора визначено за методикою [3] при кількості стержнів $m_{1-5}=80$, діаметрі стержнів 6 мм. Матеріал стержнів – вуглецева сталь, що характеризується такими електрофізичними властивостями як питома електропровідність та основна крива намагнічування, за якою визначається магнітна проникність. Розрахунок питомої електропровідності виконувалось за формулою [4]:

$$\sigma = \frac{S}{lR},$$

де S – площа провідника, мм²; l – довжина провідника, мм; R – опір провідника, Ом.

Вимірювання опору стержня проводилось із використанням мосту постійного струму МО-62 та приладу RLC-метр серії BR2876. Отримане значення питомої електропровідності становить $\sigma = 9,8 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$, що значно перевищує довідкові дані. Означене свідчить про недотримання виробником рекомендованого хімічного складу сталі при виготовленні стержнів. Виконуючи вищезазначені умови, у науково-дослідній лабораторія «Інтелектуальні управляючі системи в АПК» кафедри «Автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка» виготовлено установку для термообробки насіння ріпаку, основні складові якої зображено на рис 1.

Завантаження у вигляді феромагнітних стержнів 5 поміщується в зерно у текучий канал 7. Навколо каналу розміщений багатовитковий індуктор. Електромагнітне поле, яке створює індуктор, не взаємодіє з каналом проходження зерна, оскільки канал виготовлений з полівінілхлориду, який не є феромагнетиком.

Феромагнітні стержні розміщені рівномірно по каналу (рис. 2) та закріплені з обох боків феромагнітними пластинами. Розрахункова відстань розсіювання електромагнітного поля, що створює індуктор, – 10 см [1]. Оскільки утримуючі пластини розміщені на відстані 20 см від краю індуктора, вони не взаємодіють з електромагнітним полем. Для встановлення датчиків вибрано стержні, температура яких найбільш залежала від нерівномірності розподілу фізичних полів. Зовнішній ряд стержнів та ряд в центральній частині позначимо відповідно 1...5 ряд.

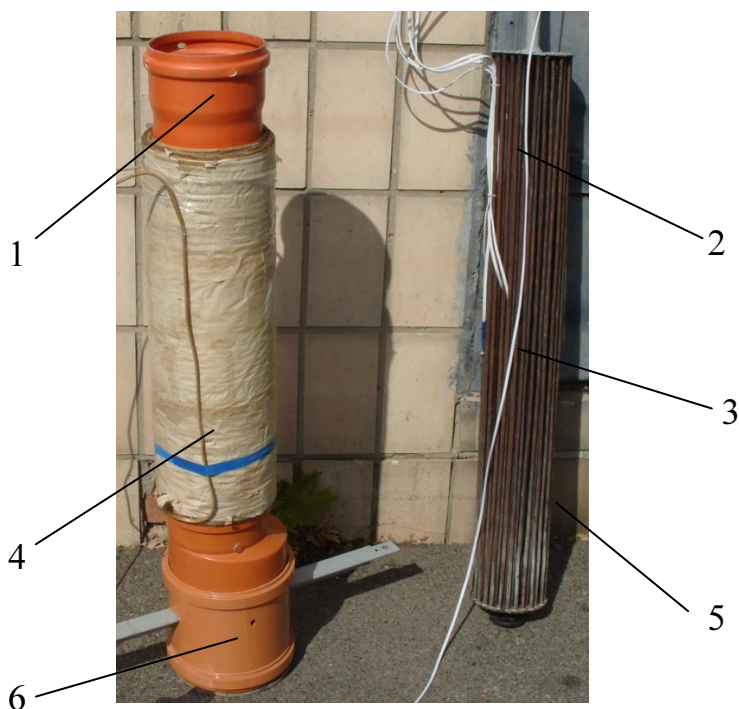


Рис 1. Установка для термообробки зерна ріпаку:

1 – вхідний отвір; 2 – з'єднувальні шини; 3 – датчики температури; 4 – індуктор;
5 – феромагнітні стержні; 6 – вихідний отвір

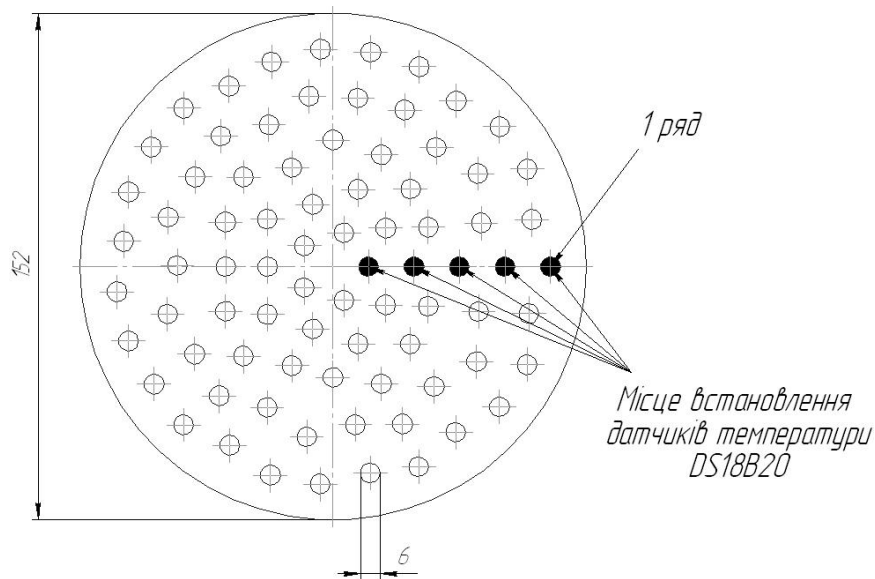


Рис. 2. Розміщення стержнів по об'єму каналу

Для вимірювання температури застосовувались температурні датчики DS18B20 фірми Dallas Semiconductor. Загальний вигляд DS18B20 показано на рис 3.



Рис 3. Зовнішній вигляд температурного датчика DS18B20

PIO – порт введення/виводу; DQ – введення/вивід даних;

GND – «земля»

Інтелектуальні температурні датчики DS18B20 являють собою спеціалізовані мікропроцесори, що вимірюють температуру середовища та перетворюють її значення в послідовний двійковий код. Кожний датчик індивідуально маркований, тобто містить ідентифікаційний номер, за яким керуючий комп'ютер може розпізнати цей датчик у мережі.

Для з'єднання датчиків використовувалась мікролокальна мережа (Miniature Local Area Network – MicroLAN). В основу роботи MicroLAN покладена організація зв'язку процесора з периферійними пристроями через однодротову шину. Однодротова шина – це система, що складається з одного майстра шини DS9490R (пристрій, керуючий роботою шини) та декількох датчиків температури DS18B20 (рис 4).

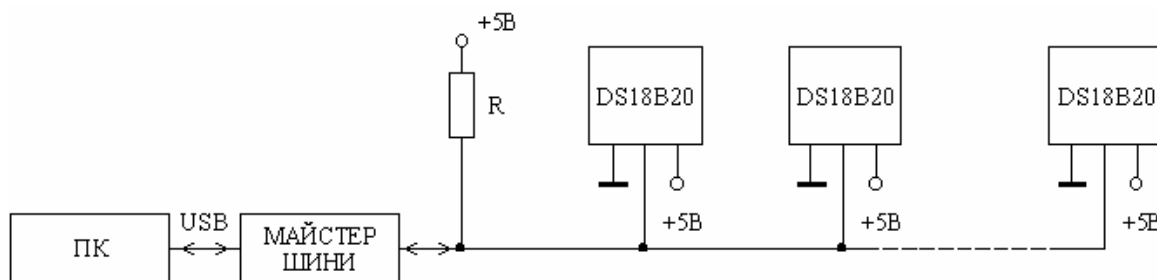


Рис 4. Схема підключення датчиків температури до ПК

Термодатчик DS18B20 забезпечує вимірювання температури в діапазоні $-55..+125$ °C. Гарантована точність не перевищує $\pm 0,5$ °C у діапазоні $-(10..+85)$ і ± 2 °C. Типова крива похибки вимірювання температури наведена на рис 5.

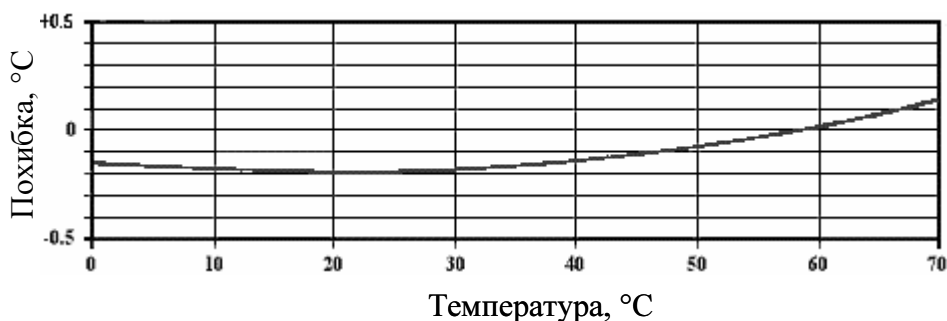


Рис 5. Типова крива похибки термодатчика DS18B20

Незважаючи на обмежену абсолютну точність, мала дискретність представлення температури є дуже бажаною. Для цього датчик DS18B20 може бути запрограмований на визначену дискретність перетворення температури.

Для синхронізації апаратних та програмних частин використовувався пакет «OWFS», операційна система Linux Ubuntu 12.04 LTS. Програмне забезпечення для зчитування температури розроблено на основі використання командного процесора Bash та інтерпретатора команд shell.

Результати досліджень. Датчики температури DS18B20 закріплювались на вертикально встановлених феромагнітних стержнях (рис 6). Для забезпечення надійного контакту використовувалась паста з високою теплопровідністю. Датчики температури налаштовувались на дискретність перетворювання температури в 1 с, покази температури зчитувались з всіх датчиків одночасно з періодичністю 5 с та заносились до бази даних.

Енергетичні показники індуктора контролювались за допомогою вимірювального комплексу K505 та трансформатора струму УТТ-5М і становили: напруга $U=190$ В; струм $I=53$ А; активна потужність $P=4000$ Вт.



Рис 6. Встановлення датчиків температури на стержні

Для дослідження залежностей електромагнітних полів по довжині індуктора доцільно вимірювати температуру стержнів різних рядів в одному перерізі. Як видно на рис. 7 (датчики температури встановлені на стержнях у крайній зоні індуктора) динаміка приросту температури зовнішніх та внутрішніх рядів стержнів відрізняється. Різниця температур у цій зоні свідчить про нерівномірний розподіл електромагнітних полів, що може бути пов'язано з «кінцевим» ефектом індуктора. При переміщенні датчиків температури в напрямку до середини індуктора на відстані 150 мм від його краю (рис. 8) розбіжність виміряних значень зменшується. У центральній частині індуктора (рис. 9) температура стержнів зростає з однаковою динамікою. Оскільки індуктор і завантаження виконані симетричними щодо осі абсцис, то розподіл температури по довжині також виявився симетричним (рис. 10).

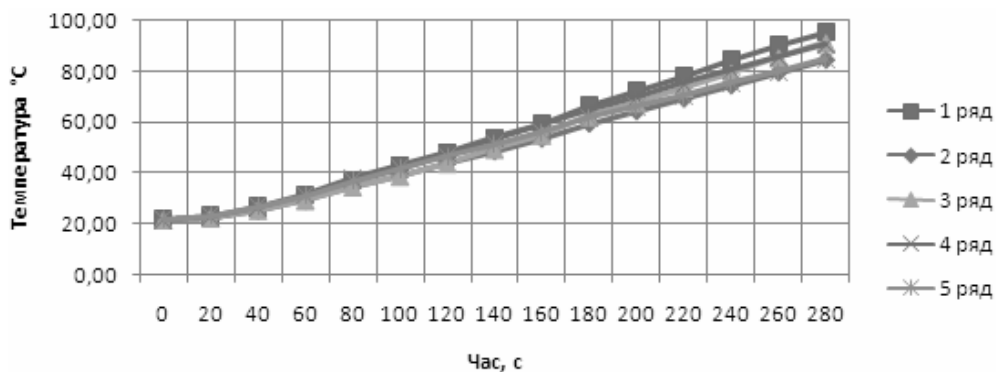


Рис 7. Залежність температури рядів стержнів на кінці індуктора

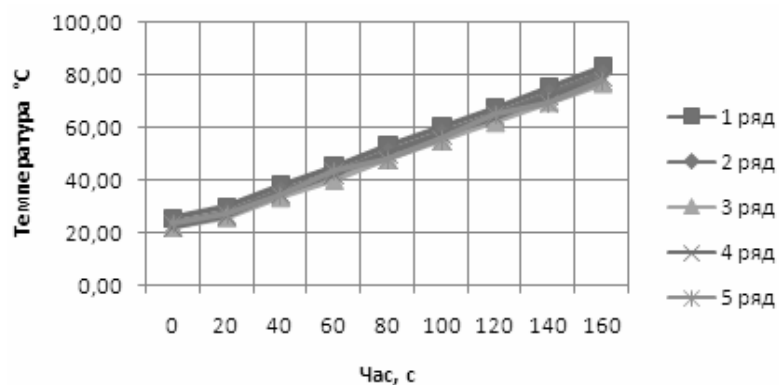


Рис 8. Залежність температури рядів стержнів на відстані 150 мм від краю індуктора

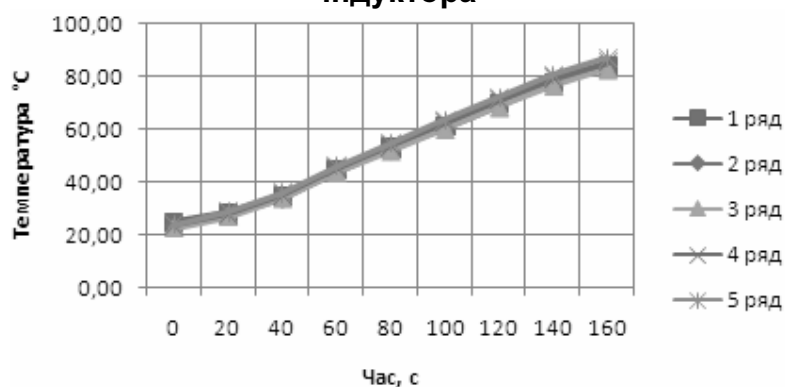


Рис 9. Залежність температури рядів стержнів на середині індуктора

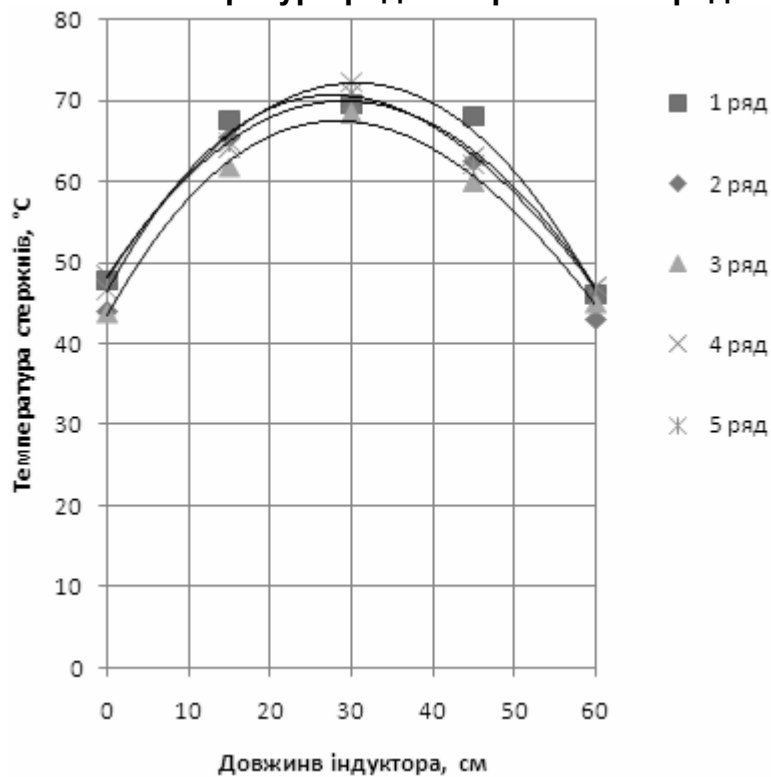


Рис 10. Залежність температури рядів стержнів від довжини індуктора

Висновки

Значення температури стержнів, розташованих у різних радіальних рядах в середині індуктора, майже однаково. Розбіжність значень температури не перевищує 4 %. При дослідженні температури стержнів для отримання повної картини теплових розподілів датчики по чергові встановлювались на всіх стержнях у кожному з перерізів, однак виміряне значення температури варіювалось в межах 0,5 %. Це свідчить про рівномірність розподілу магнітної індукції по діаметру каналу, а різний час нагрівання стержнів у верхній та середній точках до температури 80 °C пояснюється «кінцевим» ефектом електромагнітного поля індуктора.

Список літератури

1. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г.И. Бабат. – [2-е изд., перераб. и доп.] – М. - Л. : Энергия, 1965. – 552 с.
2. Васецкий Ю.М. Высокоэффективная универсальная индукционная установка нагрева газо-жидкосных теплоносителей / Ю.М. Васецкий, И.П. Кондратенко, В.А. Ращепкин // Новини енергетики. – 1999. – №4. – С. 34–37.
3. Кондратенко І.П. Енергетичні характеристики і електричні параметри індукторів для нагріву пучка феромагнітних труб / І.П. Кондратенко, А.П. Ращепкін, А.О. Березюк // Вісник КДУ ім. Михайла Остроградського. – 2010. – №3, ч. 2. – С.62.
4. Копылов И.П. Проектирование электрических машин./ Копылов И.П.— М.: Энергия, 1980. — 495 с.
5. Немков В. С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В. С. Немков, В. Б. Демидович. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 297 с.
6. Kawaguchi H., Enokizono M., Todaka T. Thermal and magnetic field analysis of induction heating problems // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 161, № 2. – P. 193–198.

Предложена методика расчета загрузки индуктора в установке для термообработки семян рапса. Исследовано распределение температурного поля загрузки по длине индуктора. Значение температуры загрузки вдоль и по радиусу индуктора практически одинаково. Указанное свидетельствует о равномерности распределения магнитной индукции по диаметру канала, а разное время нагрева загрузки в верхних и центральных точках объясняется «конечным» эффектом электромагнитного поля индуктора.

Индуктор, стержни, индукционный нагрев, теплообменные процессы, рапс, термообработка.

The method of calculating load inductor heating rapeseed are proposed. The experimental determination of thermal fields are conducted. The value of the temperature along the rod and rod coil located in different radial rows in the middle of the inductor are practically identical. It indicates the uniformity of distribution of magnetic induction in the channel.

Inductor, rod, induction heating, heat processing, rapeseed, heating.

and nonstationary time series analysis / Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. L. [and others]. — Proc. R. Soc. London, 1998. — Vol. 454. — P. 903—995.

5. <http://prodav.narod.ru/>

Проанализированы предпосылки использования преобразования Гильберта-Хуанга для очистки информационных сигналов от шумов, исследованы разные реализации преобразования Гильберта-Хуанга.

Фильтрация, информационный канал, зашумленность, прогнозирование

Analyzed the preconditions of Hilbert-Huang transform to clean data signals from noise, studied different implementations Hilbert-Huang transform.

Filtering, information channel, noise, forecasting.

УДК 621.311.1:63

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПО ОДНОМУ ПРОВОДУ

В.В. Василенко, доктор технічних наук

В.М. Комаров, аспірант*

Розглянуто фізичну сутність електромагнітних процесів, що відбуваються в однопровідній системі електропостачання локальних сільськогосподарських об'єктів. Наведено принципову схему фізичної моделі однопровідної системи електропостачання та проаналізовано електромагнітні процеси, що відбуваються в усіх її функціональних вузлах при передачі електроенергії синусоїдного змінного струму. Сформульовано загальний принцип передачі електроенергії по одному проволу.

Трансформатор Тесли, коливальний контур, електрична індукція, струм зміщення.

Однією з важливих проблем підвищення ефективності електропостачання сільськогосподарських об'єктів є проблема електропостачання автономних фермерських господарств і малих підприємств, віддалених від централізованих мереж електропостачання. Побудова традиційних ліній електропередачі для цих об'єктів пов'язана зі значними втратами електроенергії на нагрів проводів ліній електропередачі струмом провідності, високою матеріалоємністю і вартістю спорудження ліній електропередачі.

Розв'язання цієї проблеми може бути досягнуто застосуванням системи передачі електроенергії по одному проволу.

*Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В.В. Василенко.

© В.В. Василенко, В.М. Комаров, 2013

Мета досліджень – аналіз електромагнітних процесів, що відбуваються при передачі електроенергії по одному проводу, та визначення принципу дії однопровідної системи електропередачі.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження електромагнітних процесів виконувалися на фізичній моделі системи передачі електроенергії по одному проводу. Результати досліджень використано при обґрунтуванні принципу функціонування системи на основі перетворення струму провідності у високочастотний струм зміщення при передачі та зворотному перетворенню струму зміщення в струм провідності при живленні навантаження.

Результати досліджень. В основу побудови фізичної моделі системи передачі електроенергії по одному проводу покладена система передачі електроенергії по одному проводу.

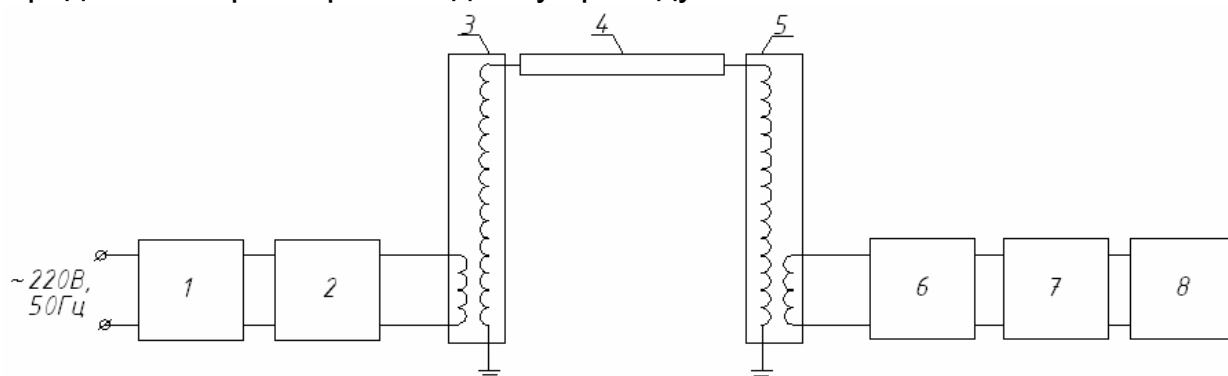


Рис.1. Принципова схема фізичної моделі системи передачі електроенергії по одному проводу

Як видно із рис.1 фізична модель системи передачі електроенергії по одному проводу складається із таких функціональних вузлів: випрямляча (1), що живиться від джерела однофазного синусоїдного змінного струму; високочастотного імпульсного генератора (2); передавального трансформатора Тесли (3); лінії передачі електроенергії по одному проводу (4); приймального трансформатора Тесли (5); діодно-конденсаторного випрямного блоку (6); інвертора напруги постійного струму в напругу синусоїдного змінного струму промислової частоти (7) та навантаження (8).

Експериментальні дослідження розробленої згідно з наведеною принциповою схемою фізичної моделі системи передачі електроенергії по одному проводу показали її повну роботоздатність при резонансній частоті 500 кГц і напрузі 25 кВ. При цьому фізичні процеси в моделі цієї системи відбуваються так.

Електроенергія, що передається, синусоїдного змінного струму промислової частоти (220В, 50Гц) випрямляється випрямлячем (1) і випрямлений постійний струм напругою 220В подається на високочастотний імпульсний генератор (2), який перетворює постійний струм в імпульсний змінний струм прямокутної форми частотою 500 кГц і напругою 220В, при цьому частота імпульсів високочастотного генератора (500

кГц) налаштована на резонансну частоту розімкненого індуктивно-ємнісного контуру, який включає лінію передачі електроенергії по одному проводу (4) та багатовиткові заземлені обмотки приймального (5) і передавального (3) трансформаторів Тесли. Високочастотні імпульси прямокутної форми подаються на первинну маловиткову обмотку передавального трансформатора Тесли (3), в результаті чого на його вторинній багатовитковій (800 витків) заземленій обмотці індукується висока напруга (25 кВ), яка передається з початку цієї обмотки на однопровідну лінію електропередачі (4), під'єднану до початку багатовиткової заземленої обмотки приймального трансформатора Тесли (5), де накопичуються заряди, що стікають в ємність індуктивно-ємнісного контуру з вторинної обмотки передавального трансформатора Тесли (3), створюючи струм зміщення, який на відміну від струму провідності не створює резистивних теплових втрат енергії.

Високовольтна напруга та струм зміщення, подані по однопровідній лінії на первинну (багатовиткову) обмотку приймального трансформатора Тесли (5), створюють в його вторинній маловитковій замкненій обмотці понижену напругу (220В) високочастотного імпульсного струму провідності, яка подається на діодно-конденсаторний випрямний блок (6), де імпульсний струм випрямляється і заряджає ємнісний накопичувач, що згладжує пульсації випрямленого постійного струму провідності. Слід зазначити, що струм зміщення в однопровідній лінії та багатовиткових обмотках обох трансформаторів Тесли зв'язаний з перетоком зарядів по однопровідній лінії передачі електроенергії (4), обумовленим силовою взаємодією зарядів та швидкістю зміни електричного зміщення, а не дією ЕРС.

Випрямлений постійний струм провідності подається на інвертор напруги (7), який перетворює його в синусоїдний змінний струм промислової частоти і забезпечує живлення споживачів навантаження (8).

Суттєвою особливістю запропонованого способу передачі електроенергії є те, що струм зміщення перетворюється у вторинній обмотці приймального трансформатора Тесли в звичайний активний струм провідності замкненого кола навантаження, тобто струм зміщення використовується для передачі електроенергії.

Таким чином, принцип передачі електроенергії по одному проводу полягає в перетворенні синусоїдного змінного струму промислової напруги і частоти в імпульсний змінний струм високої частоти і напруги, при яких у розімкненій і заземленій однопровідній лінії передачі виникає струм зміщення, що разом з високою напругою створює падаючі хвилі, які є носіями електричної енергії, що подається на приймальний трансформатор Тесли, замкнена вторинна обмотка якого разом з діодно-конденсаторним випрямним блоком перетворює струм зміщення в постійний струм провідності з подальшим перетворенням інвертором напруги в синусоїдний змінний струм промислової частоти і напруги, який живить споживачів навантаження.

Іншими словами принцип передачі електроенергії по одному проводу полягає в перетворенні струму провідності в струм зміщення, що передається по лінії електропередачі з наступним перетворенням його в кінці лінії електропередачі в струм провідності, яким живиться навантаження.

Визначення параметрів і рівнянь електромагнітного поля в процесі передачі електроенергії по одному проводу доцільно розглянути, виходячи із теорії поширення плоских електромагнітних хвиль в ідеальному діелектрику, провідність якого, як відомо, дорівнює нулю. Таким діелектриком є нижні шари атмосфери, тобто повітря, в якому розташовуються лінії електропередачі, в тому числі і лінії передачі по одному проводу.

Враховуючи те, що в ідеальному діелектрику відносні величини діелектричної і магнітної проникності дорівнюють: $\epsilon_r=1$ і $\mu_r=1$, абсолютні значення діелектричної і магнітної проникності будуть рівнятися електричній і магнітній сталим: $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м та $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Тоді параметри плоскої електромагнітної хвилі, яка поширюється вздовж лінії електропередачі по одному проводу та є носієм електроенергії, що передається будуть дорівнювати таким величинам.

Коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі:

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\beta, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт згасання та $\alpha=0$, оскільки провідність ідеального діелектрика дорівнює нулю;

$$\beta = \frac{\omega}{c} = 2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}, \frac{\text{рад}}{\text{м}} - \text{коефіцієнт фази};$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} - \text{швидкість хвилі(світла)}.$$

Хвильовий опір:

$$\dot{Z}_{xs} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377, \text{ Ом}. \quad (2)$$

Миттєве значення періодичної функції імпульсної напруги прямокутної форми, отримане шляхом розкладання її в ряд Фур'є до п'ятої гармоніки, дорівнює:

$$u(\omega t) = \frac{4U_m}{\pi} \sin(\omega t) + \frac{4U_m}{3\pi} \sin(3\omega t) + \frac{4U_m}{5\pi} \sin(5\omega t), \text{ В}, \quad (3)$$

де U_m – амплітудне значення напруги імпульсу.

Для отримання миттєвих значень напруженостей електричного і магнітного полів та вектора Пойнтінга визначимо амплітудне значення напруженості електричного поля:

$$E_m = \frac{U_m}{\sum l_i} = \frac{U_m}{2\pi(r_1 w_1 + r_2 w_2) + z}, \frac{\text{В}}{\text{м}}. \quad (4)$$

де z – довжина лінії, м; r_1, r_2 – радіуси обмоток, м; w_1, w_2 – кількість витків обмотки передавального та приймального трансформаторів Тесли.

Тоді миттєві значення напруженостей електричного і магнітного поля та вектора Пойнтінга будуть дорівнювати:

$$E(\omega t) = E_x = E_m \sin\{\omega(t - z_i / c)\}; \quad (5)$$

$$H(\omega t) = H_y = \frac{E_m}{Z_{\text{хв}}} \sin\{\omega(t - z_i / c)\};$$

$$\Pi(\omega t) = \Pi_z = \frac{E_m^2}{Z_{\text{хв}}} \sin^2\{\omega(t - z_i / c)\},$$

де E_m – амплітудне значення напруженості електричного поля, z_i – координата по осі z .

На рис. 2 наведено графік залежностей напруженостей електричного та магнітного поля для фіксованого моменту часу.

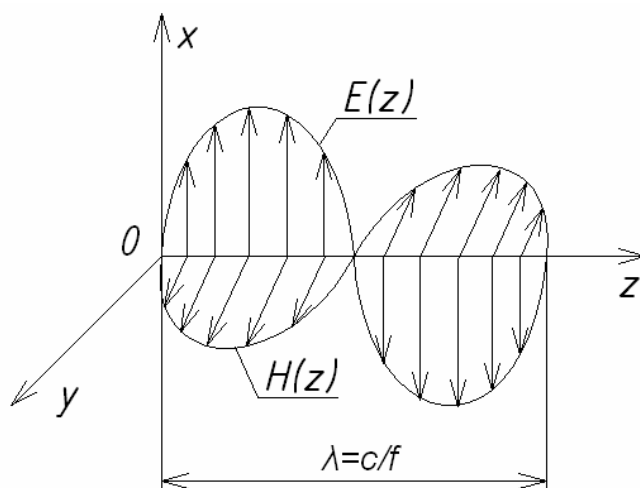


Рис. 2. Падаючі хвилі напруженостей електричного і магнітного полів

Довжина хвилі:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}, \text{ м}, \quad (6)$$

де f – частота, с^{-1} ; ϵ_0 – електрична стала, Ф/м ; μ_0 – магнітна стала, Гн/м

Енергія електричного і магнітного поля в об'ємі V :

$$w_e = \int_V \frac{\epsilon_0 E^2}{2} dV = w_M \int_V \frac{\mu_0 H^2}{2} dV, \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (7)$$

У системі передавання електроенергії по одному проводу за відсутності навантаження (в режимі холостого ходу) встановлюються стоячі хвилі напруженостей електричного та магнітного полів, оскільки амплітуди падаючої і відбитої хвилі за відсутності резистивних втрат енергії є рівними. При підключенні навантаження разом зі стоячими хвилями створюється бігуча хвиля, яка є носієм електроенергії навантаження.

Миттєві значення напруженостей електричного і магнітного полів при цьому будуть дорівнювати:

$$E(t, x) = E_m \left[K e^{j\beta x} + (1 - K) \cos \beta x \right]; \quad (8)$$

$$H(t, y) = \frac{E_m}{\dot{Z}_{x\phi}} \left[K e^{j\beta y} + j(1 - K) \sin \beta y \right]. \quad (9)$$

Тоді при однаковій напруженості на початку та в кінці лінії отримаємо:

$$E(t, x) = E_m K \sin(\omega t + \beta x) + E_m (1 - K) \cos \beta x \cdot \sin \omega t; \quad (10)$$

$$H(t, y) = \frac{E_m}{\dot{Z}_{x\phi}} K \sin(\omega t + \beta y) + \frac{E_m (1 - K)}{\dot{Z}_{x\phi}} \sin \beta y \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (11)$$

де $E_m K \sin(\omega t + \beta x)$, $\frac{E_m (1 - K)}{\dot{Z}_{x\phi}} \sin \beta y \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$ – стоячі хвилі напруженостей електричного та магнітного полів; $E_m K \sin(\omega t + \beta x)$, $\frac{E_m}{\dot{Z}_{x\phi}} K \sin(\omega t + \beta y)$ – бігучі хвилі напруженості цих полів; $K = \frac{\dot{Z}_{x\phi}}{Z_H}$ – коефіцієнт узгодження навантаження; Z_H – опір навантаження, Ом; $\dot{Z}_{x\phi}$ – хвильовий опір, Ом.

При $K=0$ (розімкнена лінія) і $K=\infty$ (коротке замикання) в лінії встановлюються тільки стоячі хвилі, чим ближче коефіцієнт узгодження K до одиниці, тим ефективніше проявляються бігучі хвилі.

Висновки

Принцип передачі електроенергії по одному проводу в загальному випадку полягає в перетворенні струму провідності у струм зміщення, що передається по однопровідній лінії електропередачі з наступним перетворенням його в кінці лінії електропередачі в струм провідності живлення навантаження.

Одиночний провід лінії передачі електроенергії є напрямним каналом, який разом з заземленими багатовитковими обмотками передавального і приймального трансформаторів Тесли створює індуктивно-ємнісний розімкнений контур, що визначає резонансні властивості системи передачі.

Носієм електроенергії, яка передається системою передачі по одному проводу, є бігуча плоска електромагнітна хвиля напруженості електричного і магнітного полів, що створюється при підключенні навантаження і поширюється вздовж напрямного каналу системи разом зі стоячими електромагнітними хвилями, які виникли до підключення навантаження в режимі холостого ходу.

Список літератури

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Бессонов Л. А. - М.: Высш. шк., 1986 – 212 с.
2. Калашников С. Г. Электричество / Калашников С. Г. – М.: Наука, 1985. – 576 с.
3. Круг К. А. Основы электротехники / Круг К. А. - М.-Л.: Гос. энерг. изд-во., 1946. – 947 с.
4. Tesla N. Apparatus for transmission of electrical energy US Patent № 649621/ 15.05.1900. – 17 с.

Рассмотрено физическую сущность электромагнитных процессов, происходящих в однопроводной системе электроснабжения локальных сельскохозяйственных объектов. Приведена принципиальная схема физической модели однопроводной системы электроснабжения и проанализированы электромагнитные процессы, происходящие во всех ее функциональных узлах при передаче электроэнергии синусоидального переменного тока. Сформулирован общий принцип передачи электроэнергии по одному проводу.

Трансформатор Теслы, колебательный контур, электрическая индукция, ток смещения

In the article shown the physical electromagnetic processes' nature in single-wire line system of local agricultural facilities. Described schematical physical model of single-wire line power system and analyzed electromagnetic processes in all its functional units with power transmission sinusoidal AC. Formulated the general principle of transferring electric energy by single-wire line.

Tesla coil, oscillation circuit, electric induction, replacement current.

УДК 620.179:621.373.5

ТРИВИМІРНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОЗРЯДЖАННЯ ЄМНОСТІ НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНУ СИСТЕМУ З ПОСЛІДОВНО З'ЄДНАНИХ КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ, ЕЛЕКТРОДА І НЕФЕРОМАГНІТНОЇ ПЛАСТИНИ

***І.П. Кондратенко, А.В. Жильцов, доктори технічних наук
В.В. Васюк, аспірант****

Розроблено тривимірну математичну модель для розрахунку густини струмів розтікання в масивних феромагнітних елементах електромагнітної системи для зменшення або визначення залишкових напружень у дослідному зразку.

Електромагнітне поле, інтегральні рівняння, струми розтікання, електродна система.

*Науковий керівник – доктор технічних наук А.В. Жильцов

© І.П. Кондратенко, А.В. Жильцов, В.В. Васюк, 2013

Список літератури

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Бессонов Л. А. - М.: Высш. шк., 1986 – 212 с.
2. Калашников С. Г. Электричество / Калашников С. Г. – М.: Наука, 1985. – 576 с.
3. Круг К. А. Основы электротехники / Круг К. А. - М.-Л.: Гос. энерг. изд-во., 1946. – 947 с.
4. Tesla N. Apparatus for transmission of electrical energy US Patent № 649621/ 15.05.1900. – 17 с.

Рассмотрено физическую сущность электромагнитных процессов, происходящих в однопроводной системе электроснабжения локальных сельскохозяйственных объектов. Приведена принципиальная схема физической модели однопроводной системы электроснабжения и проанализированы электромагнитные процессы, происходящие во всех ее функциональных узлах при передаче электроэнергии синусоидального переменного тока. Сформулирован общий принцип передачи электроэнергии по одному проводу.

Трансформатор Теслы, колебательный контур, электрическая индукция, ток смещения

In the article shown the physical electromagnetic processes' nature in single-wire line system of local agricultural facilities. Described schematical physical model of single-wire line power system and analyzed electromagnetic processes in all its functional units with power transmission sinusoidal AC. Formulated the general principle of transferring electric energy by single-wire line.

Tesla coil, oscillation circuit, electric induction, replacement current.

УДК 620.179:621.373.5

ТРИВИМІРНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОЗРЯДЖАННЯ ЄМНОСТІ НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНУ СИСТЕМУ З ПОСЛІДОВНО З'ЄДНАНИХ КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ, ЕЛЕКТРОДА І НЕФЕРОМАГНІТНОЇ ПЛАСТИНИ

***І.П. Кондратенко, А.В. Жильцов, доктори технічних наук
В.В. Васюк, аспірант****

Розроблено тривимірну математичну модель для розрахунку густини струмів розтікання в масивних неферромагнітних елементах електромагнітної системи для зменшення або визначення залишкових напружень у дослідному зразку.

Електромагнітне поле, інтегральні рівняння, струми розтікання, електродна система.

*Науковий керівник – доктор технічних наук А.В. Жильцов

© І.П. Кондратенко, А.В. Жильцов, В.В. Васюк, 2013

Нехай ємність C , заряджена до напруги U_0 , замикається на систему з послідовно з'єднаних котушки індуктивності L й N масивних

провідників, що займають об'єм $D = \bigcup_{q=1}^N D_q$, обмежені гладкою поверхнею

$S = \bigcup_{q=1}^N S_q$ (рис. 1). Питома провідність матеріалів провідників постійна за об'ємом кожного провідника й рівна відповідно $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N$.

Будемо вважати, що в колі протікають квазістаціонарні струми [2], тобто такі струми, при яких струми зсуву в діелектрику, що оточує провідники, можна знехтувати.

Мета досліджень – за заданою геометрією системи, за заданими електрофізичними характеристиками матеріалів, з яких виготовлені конструктивні елементи, електричним з'єднанням елементів, заданою напругою на ємності знайти струм $i(t)$ у колі розрядження конденсатора, розподіл густини струму $\delta(Q, t)$ в масивних провідниках, електромагнітну силу $F(t)$, що діє на електрод з диском тощо.

У загальному випадку це вимагає розв'язання тривимірних крайових задач для системи рівнянь Максвелла в необмеженій області:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\delta}; \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \operatorname{div} \vec{B} = 0; \operatorname{div} \vec{\delta} = 0; \vec{B} = \mu \vec{H}; \vec{\delta} = \gamma \vec{E}. \quad (1)$$

Тут $\vec{E}$ – вектор напруженості електричного поля, В/м; $\vec{H}$ – вектор напруженості магнітного поля, А/м; $\vec{B}$ – вектор магнітної індукції, Тл; $\vec{\delta}$ – вектор густини струму, А/м³ (поза масивними провідниками необхідно припустити, що $\vec{\delta} = 0$); γ – питома провідність, С_м/м; μ – абсолютна магнітна проникність середовища, Гн/м; t – час, с.

Матеріали і методика досліджень. Система рівнянь (1), доповнена граничними й початковими умовами, формулює початково-крайову задачу, до розв'язання якої зводиться моделювання електромагнітного процесу в системі.

Для однозначного визначення поля до диференціальних рівнянь (1) слід додати такі додаткові умови [1]:

безперервність нормальної складової густини струму на поверхні масивних провідників (впливає із знехтування струмами зсуву поза й усередині масивних провідників);

безперервність нормальної складової індукції й дотичної складової напруженості магнітного поля на поверхні масивних провідників S ;

відомо початковий розподіл густини струму $\vec{\delta}^{(0)}(M)$ по масивних провідниках;

індукція $\vec{B}(M, t)$ прагне до нуля при $M \rightarrow \infty$ як $1/r^2$.

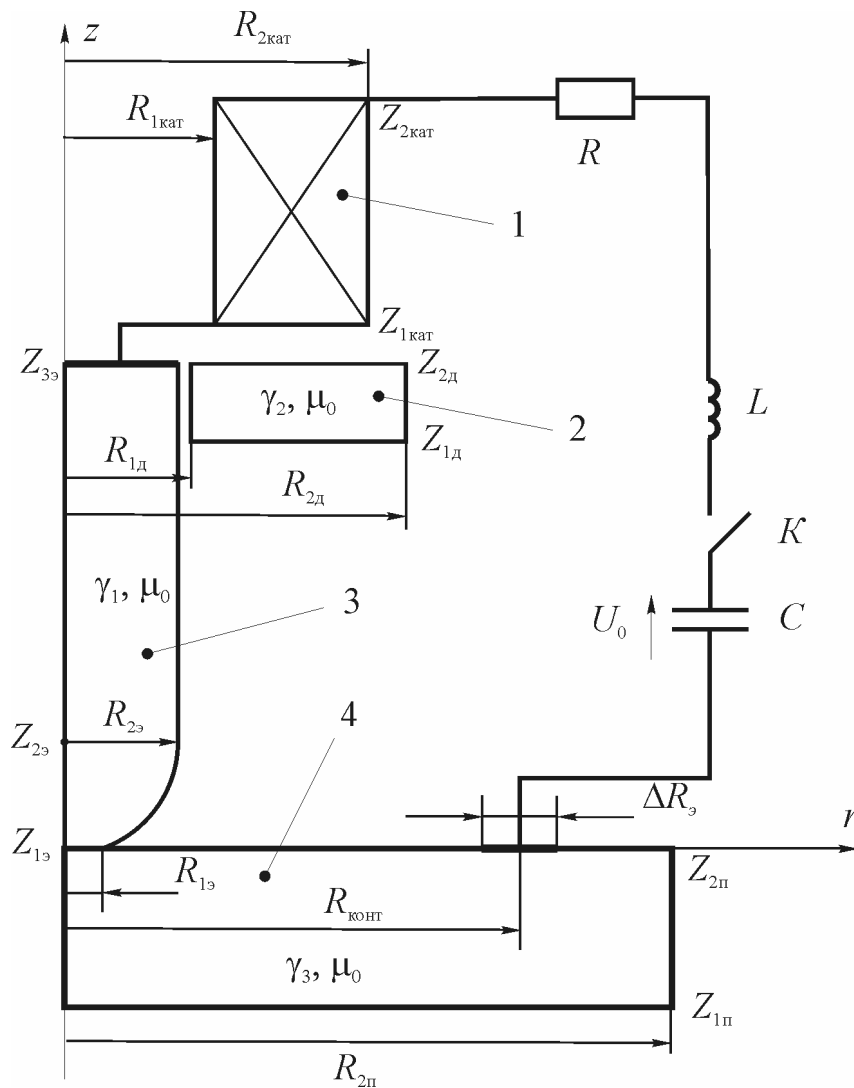


Рис.1. Меридіанний переріз електродної системи із зображенням зовнішнього електричного ланцюга:

1 – котушка індуктивності; 2 – алюмінієвий диск; 3 – електрод;
4 – неферромагнітна пластина

Результати досліджень. Уведенням електродинамічних потенціалів $\vec{A}$ і Φ спростимо вихідну систему рівнянь (1). Враховуючи те, що $\text{div}\vec{B}=0$, визначаємо векторний потенціал:

$$\vec{B}=\text{rot}\vec{A}; \quad (2)$$

$$\text{div}\vec{A}=0. \quad (3)$$

Підставимо (2) у друге рівняння (1):

$$\text{rot}\vec{E}=-\frac{\partial}{\partial t}\text{rot}\vec{A} \quad \text{або} \quad \text{rot}\left(\vec{E}+\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\right)=0.$$

З останнього співвідношення випливає, що $\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ – потенційне поле [1] й для нього існує таке скалярне поле φ , що

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\text{grad}\varphi. \quad (4)$$

Зі співвідношення (4) отримуємо рівняння:

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad}\varphi. \quad (5)$$

З першого рівняння виразу (1) знаходимо

$$\text{rot}\vec{H} = \text{rot}(\mu^{-1}\vec{B}) = \text{rot}(\mu^{-1}\text{rot}\vec{A}) = \vec{\delta},$$

тобто

$$\text{rot}(\mu^{-1}\text{rot}\vec{A}) = \vec{\delta}. \quad (6)$$

Далі з урахуванням останнього співвідношення (1) приходимо до рівняння

$$\vec{\delta} = -\gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \gamma \text{grad}\varphi. \quad (7)$$

Рівняння (6), (7) утворюють систему рівнянь, еквівалентну всій системі рівнянь Максвелла. Еквівалентність розуміється в такому сенсі: якщо поля $\vec{A}$, φ , $\vec{\delta}$ задовольняють рівнянням (6), (7), то магнітна індукція $\vec{B}$, напруженість магнітного поля $\vec{H}$ й напруженість електричного поля $\vec{E}$ визначаються так:

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A}; \quad \vec{H} = \mu^{-1}\vec{B}; \quad \vec{E} = \gamma^{-1}\vec{\delta}$$

і при їхній підстановці в систему рівнянь Максвелла вони задовольняють їй тотожно.

Виведемо рівняння, яким повинні задовольняти потенціали $\vec{A}$ й φ . Враховуємо, що середовище є лінійним, ізотропним, безгістерезисним. У силу зроблених допущень, з рівняння (6) знаходимо:

$$\text{rot}\text{rot}\vec{A} = \mu\vec{\delta}. \quad (8)$$

Згідно із співвідношенням з векторного аналізу

$$\text{rot}\text{rot}\vec{a} = \text{grad}(\text{div}\vec{a}) - \Delta\vec{a}, \quad (9)$$

записуємо

$$-\Delta\vec{A} + \text{grad}(\text{div}\vec{A}) = \mu\vec{\delta}.$$

Враховуючи (3), одержуємо таке рівняння для визначення векторного потенціалу

$$\Delta\vec{A} = -\mu\vec{\delta}. \quad (10)$$

Для визначення скалярного потенціалу з урахуванням (5) знаходимо

$$\operatorname{div} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div} \vec{A} - \operatorname{div}(\operatorname{grad} \varphi). \quad (11)$$

Беручи до уваги, що

$$\operatorname{div} \vec{E} = \operatorname{div} \left(\frac{\vec{\delta}}{\gamma} \right) = \frac{1}{\gamma} \operatorname{div} \vec{\delta} = 0 \quad ; \quad \operatorname{div} A = 0,$$

отримуємо

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} \varphi) = 0.$$

Таким чином, для скалярного електричного потенціалу отримуємо таке рівняння:

$$\Delta \varphi = 0. \quad (12)$$

Сформулюємо крайову задачу для розрахунку магнітного поля в електромагнітній системі:

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{\delta}_w, Q \in D_w, \quad (13)$$

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{\delta}_q, Q \in D_q, q = 1, 2, \dots, N, \quad (14)$$

$$\Delta \vec{A} = 0, Q \in D_0, \quad (15)$$

де $\vec{\delta}_w$ – густина струму в обмотці котушки D_w , А/м³; $\vec{\delta}_q$ – густина струму в області масивного провідника D_q , А/м³; $q = 1, 2, \dots, N$ (у розглянутому завданні $N = 3$); D_0 – зовнішній стосовно всіх тіл електромагнітної системи простір.

Граничні умови для векторного потенціалу на границі S_{qm} , $q = 1, 2, \dots, N-1$, масивних тіл мають вигляд:

$$[\vec{n}_Q, \vec{A}^-] = [\vec{n}_Q, \vec{A}^+], \quad [\vec{n}_Q, \operatorname{rot} \vec{A}^-] = [\vec{n}_Q, \operatorname{rot} \vec{A}^+], Q \in S \cup S_w, \quad (16)$$

де $\vec{A}^+$, $\vec{A}^-$ – граничні значення векторного потенціалу в точці Q при наближенні до неї відповідно із внутрішньої й зовнішньої сторони масивного провідника; $\vec{n}_Q$ – зовнішня нормаль до границі q -го масивного провідника; S – границя масивних провідників, $S = S_{20} \cup S_{12} \cup S_{10} \cup S_{13} \cup S_{30}$ (рис. 2).

Запишемо крайові умови для скалярного електричного потенціалу:

$$\varphi^+ = \varphi^- \text{ на } S, \quad (17)$$

де φ^+ , φ^- – значення скалярного електричного потенціалу в точці $Q \in S$, при наближенні до неї відповідно із внутрішньої й зовнішньої сторони масивного провідника D_q , $q = 1, 2, \dots, N$.

Далі врахуємо безперервність нормального компонента густини струму $\vec{\delta}$ на границі масивних тіл:

$$(\vec{\delta}^+, \vec{n}_Q) = (\vec{\delta}^-, \vec{n}_Q) \text{ на } S,$$

Тобто

$$-\gamma^+ \frac{\partial A_{n_Q}^+}{\partial t} - \gamma^+ \frac{\partial \phi^+}{\partial n_Q} = -\gamma^- \frac{\partial A_{n_Q}^-}{\partial t} - \gamma^- \frac{\partial \phi^-}{\partial n_Q}, Q \in S, \quad (18)$$

де $A_{n_Q}^+$ ($A_{n_Q}^-$) – миттєве значення проекції векторного потенціалу на зовнішню нормаль $\vec{n}_Q$ у точці $Q \in S$, при наближенні до неї із внутрішньої (зовнішньої) сторони масивного провідника D_q , $q=1,2,\dots,N-1$; $\partial \phi^+ / \partial n_Q$ ($\partial \phi^- / \partial n_Q$) – нормальна похідна від скалярного електричного потенціалу при наближенні до точки $Q \in S$ із внутрішньої (зовнішньої) сторони масивного провідника D_q , $q=1,2,\dots,N$; $\vec{n}_Q$ – зовнішня нормаль до границі масивного провідника D_q , $q=1,2,\dots,N$; γ^+ , γ^- – питома провідність матеріалу внутрішньої й зовнішньої області стосовно границі S , См/м .

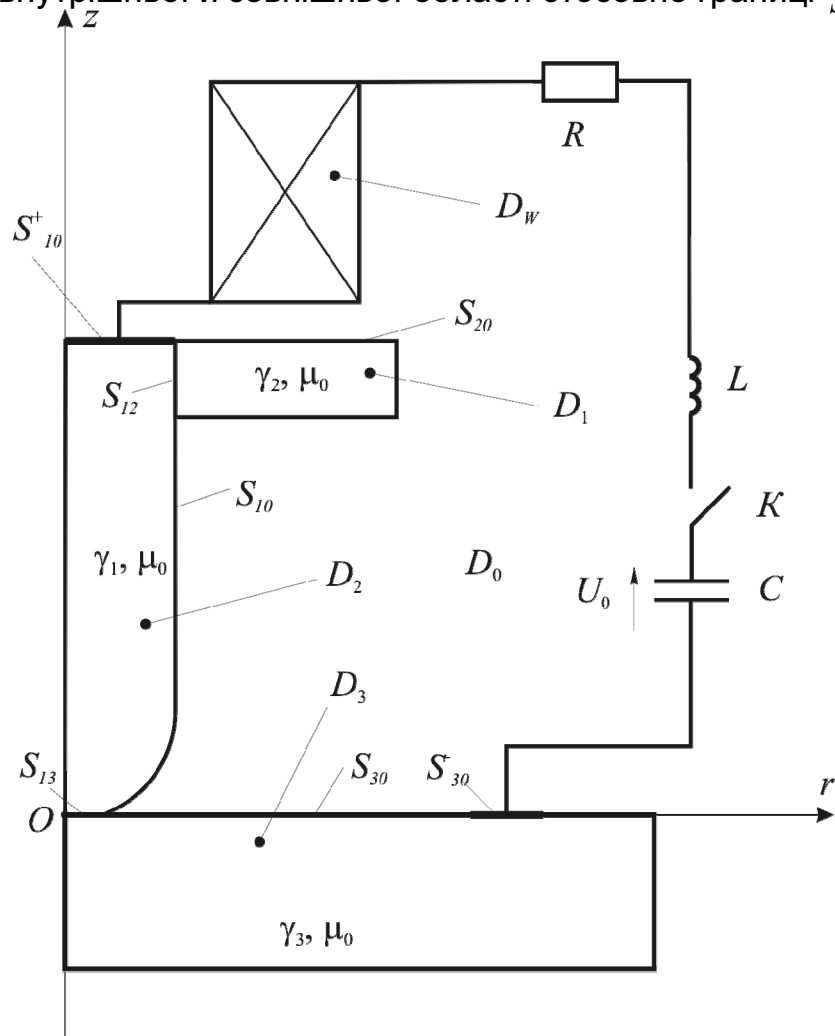


Рис.2. Електродна система

Таким чином, можемо сформулювати крайову задачу для визначення векторного магнітного потенціалу й скалярного електричного потенціалу:

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{\delta}_w, Q \in D_w; \quad (19)$$

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{\delta}_q, Q \in D_q, q=1,2,\dots,N; \quad (20)$$

$$\Delta \vec{A} = 0, Q \in D_0; \quad (21)$$

$$[\vec{n}_Q, \text{rot} \vec{A}^-] = [\vec{n}_Q, \text{rot} \vec{A}^+], Q \in S; \quad (22)$$

$$[\vec{n}_Q, \vec{A}^-] = [\vec{n}_Q, \vec{A}^+], Q \in S; \quad (23)$$

$$\Delta \varphi_q = 0, Q \in D_q, q=1,2,3,\dots,N; \quad (24)$$

$$\varphi^+ = \varphi^- \text{ на } S; \quad (25)$$

$$-\gamma_1 \frac{\partial A_{n_Q}^+}{\partial t} - \gamma_1 \frac{\partial \varphi^+}{\partial n_Q} = \delta_{n_Q}^+ \text{ на } S_{10}^+; \quad (26)$$

$$-\gamma_N \frac{\partial A_{n_Q}^+}{\partial t} - \gamma_N \frac{\partial \varphi^+}{\partial n_Q} = \delta_{n_Q}^- \text{ на } S_{N0}^-; \quad (27)$$

$$-\gamma^+ \frac{\partial A_{n_Q}}{\partial t} - \gamma^+ \frac{\partial \varphi^+}{\partial n_Q} = -\gamma^- \frac{\partial A_{n_Q}}{\partial t} - \gamma^- \frac{\partial \varphi^-}{\partial n_Q}, Q \in S; \quad (28)$$

$$A(\infty) = 0 \quad (29)$$

де S_{10}^+ , S_{N0}^- – частина границь S_{10} , S_{N0} , на яких задано значення нормального компоненту густини струму $\delta_{n_Q}^+$ й $\delta_{n_Q}^-$ (місця контактів в електромагнітній системі, до яких приєднується ділянка кола, що складається з ємності, котушки й активного опору). Якщо відомий струм $i_w(t)$ в обмотці котушки D_w , то модуль густини струму в місцях контакту S_{10}^+ , S_{N0}^- знаходиться так:

$$\delta_{n_Q}^+(t) = \frac{i_w(t)}{S_{10}^+}, \delta_{n_Q}^-(t) = \frac{i_w(t)}{S_{N0}^-}. \quad (30)$$

Шукаємо векторний потенціал у вигляді:

$$\vec{A}(Q,t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{D_w} \frac{\vec{\delta}_w(M,t)}{r_{QM}} dV_M + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_D \frac{\vec{\delta}_m(M,t)}{r_{QM}} dV_M, \quad (31)$$

який задовольняє рівнянням (19) – (21) і крайовим умовам (22), (23). Тут $\vec{\delta}_w(M,t)$ – миттєва густина струму в котушці D_w , А/м³; $\vec{\delta}_m(M,t)$ – миттєва

густина струму в масивному провіднику D_m , $m=1,2,\dots,N$, A/m^3 ; r_{QM} – відстань від точки Q до точки M , м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м.

Підставляючи в рівняння (7) вираз для векторного магнітного потенціалу (31), одержуємо інтегро-диференціальне рівняння (інтегральне за просторовими змінними, диференціальне за часом) для густини вихрових струмів у масивних провідниках:

$$\frac{\vec{\delta}_q(Q,t)}{\gamma_q \lambda} + \frac{\partial}{\partial t} \int_{D_q} \frac{\vec{\delta}(M,t)}{r_{QM}} dV_M + \frac{1}{\lambda} \text{grad} \varphi(Q,t) = - \frac{\partial}{\partial t} \int_{D_w} \frac{\vec{\delta}_w(M,t)}{r_{QM}} dV_M ;$$

$$Q \in D_q, q=1,2,\dots,N, \quad (32)$$

де $\lambda = \mu_0 / (4\pi)$.

Вектор магнітної індукції визначається за формулою [2]:

$$\vec{B}(Q,t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{D_w} \frac{[\vec{r}_{QM}, \vec{\delta}_w(M,t)]}{r_{QM}^3} dV_M + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{D_q} \frac{[\vec{r}_{QM}, \vec{\delta}(M,t)]}{r_{QM}^3} dV_M. \quad (33)$$

Для визначення $\text{grad} \varphi_q$ ставиться внутрішня задача (24) – (28). Розв'язок рівняння (24) шукаємо у вигляді потенціалу простого шару електричних зарядів [3]:

$$\varphi(Q,t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma(M,t)}{r_{QM}} dS_M, \quad (34)$$

де $\varphi(Q,t)$ – миттєве значення скалярного електричного потенціалу в точці Q ; $\sigma(M,t)$ – миттєве значення густини простого шару електричних зарядів у точці M границі S .

Крайові умови (25) виконуються автоматично. Для задоволення виразу (34) крайовій умові (28), скористуємося теоремою про стрибок нормальної похідної потенціалу простого шару [3]:

$$\frac{\partial \varphi^-}{\partial n_Q} = - \frac{\sigma(Q,t)}{2\epsilon_0} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \sigma(M,t) \frac{(\vec{r}_{QM}, \vec{n}_Q)}{r_{QM}^3} dS_M, \quad (35)$$

$$\frac{\partial \varphi^+}{\partial n_Q} = \frac{\sigma(Q,t)}{2\epsilon_0} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \sigma(M,t) \frac{(\vec{r}_{QM}, \vec{n}_Q)}{r_{QM}^3} dS_M. \quad (36)$$

Таким чином, одержуємо таку систему інтегральних рівнянь

$$\sigma(Q,t) + \frac{\gamma^+ - \gamma^-}{\gamma^+ + \gamma^-} \frac{1}{2\pi} \int_S \sigma(M,t) \frac{(\vec{r}_{QM}, \vec{n}_Q)}{r_{QM}^3} dS_M = -2\epsilon_0 \frac{\gamma^+ - \gamma^-}{\gamma^+ + \gamma^-} \frac{\partial A_{n_Q}}{\partial t}, \quad Q \in S. \quad (37)$$

Підставляючи в рівняння (37) вираз для векторного потенціалу (31), остаточно отримуємо

$$\begin{aligned} \frac{\chi(Q)\mu_0\varepsilon_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t_D} \int \frac{\tilde{\delta}(M,t), \vec{n}_Q}{r_{QM}} dV_M + \sigma(Q,t) + \frac{\chi(Q)}{2\pi} \int_S \sigma(M,t) \frac{(\vec{r}_{QM}, \vec{n}_Q)}{r_{QM}^3} dS_M = \\ = -\frac{\chi(Q)\mu_0\varepsilon_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t_{Dw}} \int \frac{(\tilde{\delta}_w(M,t), \vec{n}_Q)}{r_{QM}} dV_M, Q \in S, \end{aligned} \quad (38)$$

де $\chi(Q) = (\gamma^+(Q) - \gamma^-(Q)) / (\gamma^+(Q) + \gamma^-(Q))$, $Q \in S$; $\gamma^+(Q)$, $\gamma^-(Q)$ – значення провідності матеріалу із внутрішньої й зовнішньої сторони границі S в точці $Q \in S$ (нормаль $\vec{n}_Q$ спрямована із внутрішньої області в зовнішню).

Задовольняючи вираз (34) граничним умовам (26), (27), доповнюємо рівняння (38) такими рівняннями:

$$\begin{aligned} \frac{\mu_0\varepsilon_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t_D} \int \frac{(\tilde{\delta}(M,t), \vec{n}_Q)}{r_{QM}} dV_M + \sigma(Q,t) + \frac{1}{2\pi} \int_S \sigma(M,t) \frac{(\vec{r}_{QM}, \vec{n}_Q)}{r_{QM}^3} dS_M = \\ = -\frac{\mu_0\varepsilon_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t_{Dw}} \int \frac{(\tilde{\delta}_w(M,t), \vec{n}_Q)}{r_{QM}} dV_M - \frac{2\varepsilon_0}{\gamma_1} \delta_{n_Q}^+(t), Q \in S_{10}^+; \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \frac{\mu_0\varepsilon_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t_D} \int \frac{(\tilde{\delta}(M,t), \vec{n}_Q)}{r_{QM}} dV_M + \sigma(Q,t) + \frac{1}{2\pi} \int_S \sigma(M,t) \frac{(\vec{r}_{QM}, \vec{n}_Q)}{r_{QM}^3} dS_M = \\ = -\frac{\mu_0\varepsilon_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t_{Dw}} \int \frac{(\tilde{\delta}_w(M,t), \vec{n}_Q)}{r_{QM}} dV_M - \frac{2\varepsilon_0}{\gamma_N} \delta_{n_Q}^+(t), Q \in S_{N0}^-. \end{aligned} \quad (40)$$

Беручи до уваги, що

$$\text{grad}\varphi = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_S \sigma(M,t) \frac{\vec{r}_{QM}}{r_{QM}^3} dS_M,$$

записуємо рівняння (32) у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{\delta}_q(Q,t)}{\gamma_q\lambda} + \frac{\partial}{\partial t_D} \int \frac{\tilde{\delta}(M,t)}{r_{QM}} dV_M - \frac{1}{\mu_0\varepsilon_0} \int_S \sigma(M,t) \frac{\vec{r}_{QM}}{r_{QM}^3} dS_M = -\frac{\partial}{\partial t_{Dw}} \int \frac{\tilde{\delta}_w(M,t)}{r_{QM}} dV_M; \\ Q \in D_q, q=1,2,\dots,N. \end{aligned} \quad (41)$$

Таким чином, отримана система інтегро-диференціальних рівнянь для густини вихрових струмів і густини простого шару електричних зарядів (у розглянутій електродній системі (див. рис. 2) $N=3$).

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{\delta}_q(Q,t)}{\gamma_q\lambda} + \frac{\partial}{\partial t_D} \int \frac{\tilde{\delta}(M,t)}{r_{QM}} dV_M - \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0} \int_S \sigma(M,t) \frac{\vec{r}_{QM}}{r_{QM}^3} dS_M = -\frac{\partial}{\partial t_{Dw}} \int \frac{\tilde{\delta}_w(M,t)}{r_{QM}} dV_M, \\ Q \in D_q, q=1,2,\dots,N; \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\chi(Q)\mu_0\varepsilon_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_D \frac{(\vec{\delta}(M,t), \vec{n}_Q)}{r_{QM}} dV_M + \sigma(Q,t) + \frac{\chi(Q)}{2\pi} \int_S \sigma(M,t) \frac{(\vec{r}_{QM}, \vec{n}_Q)}{r_{QM}^3} dS_M = \\ & = -\frac{\chi(Q)\mu_0\varepsilon_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{D_W} \frac{(\vec{\delta}_W(M,t), \vec{n}_Q)}{r_{QM}} dV_M - F(Q,t), \quad Q \in S \cup S_{10}^+ \cup S_{30}^-, \end{aligned} \quad (43)$$

де

$$\begin{aligned} \chi(Q) &= \begin{cases} \frac{\gamma^+(Q) - \gamma^-(Q)}{\gamma^+(Q) + \gamma^-(Q)}, & \text{если } Q \in S; \\ 1, & \text{если } Q \in S_1^+ \cup S_3^-; \end{cases} \\ F(Q,t) &= \begin{cases} 0, & \text{если } Q \in S; \\ \frac{2\varepsilon_0}{\gamma_1} \delta_{n_Q}^+(t), & \text{если } Q \in S_{10}^+; \\ \frac{2\varepsilon_0}{\gamma_3} \delta_{n_Q}^-(t), & \text{если } Q \in S_{30}^-. \end{cases} \end{aligned} \quad (44)$$

$$(45)$$

Розв'язавши систему рівнянь (42) – (45), знаходимо густину струму у кожному масивному провіднику, на основі якої можна розрахувати густину джерел теплоти, в масивних провідниках електромагнітну силу, що діє на електрод з диском тощо.

Висновки

Розроблена тривимірна математична модель для розрахунку струмів розтікання в неферромагнітній пластині (дослідний зразок) при проходженні кріз неї імпульсу струму, дозволяє вивчити вплив параметрів електромагнітної системи на тепловиділення, розподіл електродинамічних зусиль у масивній пластині поблизу контакту з електродом.

Список літератури

1. Бинс К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсон. – М.: Энергия, 1970. – 376 с.
2. Тозони О. В. Расчет переходных процессов в токопроводах / О. В. Тозони, Е.И. Петрушенко // Теоретическая электротехника. – Львов: Львов. ун-т, 1966. – Вып. 2. – С. 144 – 147.
3. Тозони О. В. Расчет трехмерных электромагнитных полей / О. В. Тозони, И. Д. Маергойз. – К.: Техніка, 1974. – 352 с.

Разработано трехмерную математическую модель для расчета плотности токов растекания в массивных неферромагнитных элементах электромагнитной системы для уменьшения или определения остаточных напряжений в опытном образце.

Электромагнитное поле, интегральные уравнения, токи растекания, электродная система.

Developed a three-dimensional mathematical model for the calculation of the current densities in the massive spreading of non-ferromagnetic elements of the electromagnetic system to reduce or determination of residual stresses in the prototype.

The electromagnetic field, integral equations, spreading currents, the electrode system.

УДК 631.589

ФАКТОРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ РОСТУ ТОМАТІВ ТА ЙОГО РЕЗУЛЬТАТИ

**В.П. Лисенко, В.О. Мірошник, кандидати технічних наук
А.О. Дудник, аспірант***

Наведено результати багатофакторного експерименту визначення продуктивності фотосинтезу культур томатів, розроблено математичну модель у вигляді рівняння регресії, визначено оптимальний режим мікроклімату для забезпечення максимальної продуктивності фотосинтезу.

Багатофакторний експеримент, фотосинтез, рівняння регресії, математична модель

Інтенсивність росту культури томату залежить від комплексу факторів мікроклімату, що мають забезпечувати максимальну продуктивність, котра, в свою чергу, визначається залежно від інтенсивності процесу фотосинтезу. З метою визначення значень факторів мікроклімату проведено багатофакторний активний експеримент [1-3].

Мета досліджень – визначення оптимальних параметрів мікроклімату для вирощування томатів у результаті розробки математичної моделі продуктивності росту після проведення активного експерименту щодо дослідження впливу факторів на інтенсивність фотосинтезу.

Матеріали та методика досліджень. Відомо, що інтенсивність фотосинтезу у значній мірі залежить від освітленості рослин; форма таких залежностей дозволила зробити висновок про те, що процес фотосинтезу складається зі світлових (фотохімічних) реакцій і реакцій у темноті (хімічних) [4]. Для отримання максимального приросту слід підтримувати оптимальні умови роботи фотосинтетичного апарату і, в першу чергу, це стосується рівня освітленості, температури повітря і концентрації CO₂.

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

© В.П. Лисенко, В.О.Мірошник, А.О.Дудник, 2013

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, кандидати технічних наук

Проведено дослідження перехідних процесів в електроприводі постійного струму при відхиленні напруги. Встановлено залежності тривалості перехідного процесу та усталеної швидкості від напруги.

Електродвигун постійного струму, електропривод, відхилення напруги, електромагнітна стала часу, електромеханічна стала часу, усталена швидкість, час перехідного процесу.

Знання законів протікання перехідних процесів дає можливість створити електропривод, який би максимально забезпечував вимоги технологічного процесу при оптимальному використанні електродвигунів.

Перехідні режими впливають на продуктивність робочих машин і якість перероблюваного або вироблюваного продукту. Для електроприводів, які тривалий час працюють у перехідних режимах, суттєве значення можуть мати також втрати електроенергії на прискорення або гальмування системи, внаслідок чого знижується ККД електропривода [1].

На протікання перехідних процесів в електроприводах постійного струму значною мірою впливає напруга. Тому дослідження впливу напруги на перехідні процеси в електроприводах має теоретичне і практичне значення.

Мета досліджень – аналіз впливу відхилення напруги на протікання перехідних процесів в електроприводах постійного струму.

Матеріали та методика досліджень. Аналіз перехідних процесів в електроприводах постійного струму проведено з використанням положень теорії електропривода, які стосуються електромеханічних властивостей двигунів постійного струму, динаміки і перехідних процесів в електроприводах, та застосуванням математичного моделювання.

Результати досліджень. Механічна характеристика двигунів постійного струму незалежного і паралельного збудження лінійна [2], тобто

$$M_{\partial} = \beta_{\partial} (\omega_0 - \omega), \quad (1)$$

де M_{∂} – момент двигуна, Н·м; β_{∂} – жорсткість механічної характеристики електродвигуна, Н·м·с; ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу, с⁻¹; ω – задана кутова швидкість, с⁻¹.

В електродвигунів постійного струму послідовного збудження при насиченій магнітній системі механічну характеристику також можна вважати лінійною:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{об}}{k^2\Phi_{нас}^2} M, \quad (2)$$

де U – напруга, В; $R_{об}$ – опір обмоток двигуна, Ом; k – конструктивний коефіцієнт машини; $\Phi_{нас}$ – магнітний потік при насиченій магнітній системі, Вб.

При зміні прикладеної напруги до обмотки якоря статична механічна характеристика електродвигуна описується рівнянням:

$$M_{\partial} = \beta_{\partial} \left(\frac{U}{C} - \omega \right), \quad (3)$$

де C – стала двигуна.

Рівняння, яке описує електромагнітні перехідні процеси у двигуні постійного струму незалежного і паралельного збудження, отримують із другого закону Кірхгофа для кола якоря:

$$U = C\omega + I_{я}R_{я} + L_{я} \frac{di}{dt}, \quad (4)$$

де $R_{я}$ – активний опір обмотки якоря, Ом; $L_{я}$ – індуктивність обмотки якоря, Гн.

Після перетворень із виразу (4) отримуємо диференціальне рівняння, яке описує електромагнітний перехідний процес:

$$T_e \frac{dM_{\partial}}{dt} + M_{\partial} = \beta_{\partial} \left(\frac{U}{C} - \omega \right), \quad (5)$$

де $T_e = L_{я}/R_{я}$ – електромагнітна стала часу, с; $\beta_{\partial} = C^2/R_{я}$ – жорсткість механічної характеристики двигуна, Н·м·с.

Із рівняння (5) маємо:

$$M_{\partial} = \beta_{\partial} \left(\frac{U}{C} - \omega \right) - T_e \frac{dM_{\partial}}{dt}. \quad (6)$$

Електромеханічний перехідний процес в електроприводі описується рівнянням руху електропривода:

$$M_{\partial} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (7)$$

де M_c – момент статичних опорів робочої машини, Н·м; J – зведений момент інерції електропривода, кг·м².

Тоді

$$M_{\partial} = M_c + J \frac{d\omega}{dt}. \quad (8)$$

Із виразів (6) і (8) отримаємо:

$$\beta_{\partial} \left(\frac{U}{C} - \omega \right) - T_e \left(\frac{dM_c}{dt} + J \frac{d^2\omega}{dt^2} \right) = M_c + J \frac{d\omega}{dt}. \quad (9)$$

Розглянемо перехідний процес в електроприводі при незмінному моменті статичних опорів робочої машини ($M_c = \text{const}$).

Диференційне рівняння, яке описує перехідний процес, матиме вигляд:

$$T_e \frac{J}{\beta_o} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{J}{\beta_o} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{C} - \frac{M_c}{\beta_o}, \quad (10)$$

або

$$T_e T_m \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_c, \quad (11)$$

де T_m – електромеханічна стала часу:

$$T_m = \frac{J}{\beta_o}, \quad (12)$$

ω_c – усталена кутова швидкість:

$$\omega_c = \frac{U}{C} - \frac{M_c}{\beta_o}. \quad (13)$$

Відхилення напруги, як впливає з (13), викликає зміну усталеної кутової швидкості.

Коли $T_m < 4T_e$, корені характеристичного рівняння визначаються за формулою:

$$k_{1,2} = -(1/2T_e) \pm j\sqrt{(1/T_e T_m) - (1/2T_e)^2} = -\alpha \pm j\gamma. \quad (14)$$

Відхилення напруги не впливає на електромеханічну та електромагнітну сталі часу, а також корені характеристичного рівняння.

При початкових умовах $t = 0$, $\omega = \omega_{\text{поч}}$,

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_0 = (M_{\text{поч}} - M_c) / J \quad (15)$$

диференційне рівняння (11) має розв'язок:

$$\omega = \omega_c + e^{-\alpha t} \left[(\omega_{\text{поч}} - \omega_c) \cos \gamma t + \frac{M_{\text{поч}} - M_c + J\alpha(\omega_{\text{поч}} - \omega_c)}{J\gamma} \sin \gamma t \right]. \quad (16)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (16) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{\text{поч}} - \omega_c) e^{-\alpha t} \left(\cos \gamma t + \frac{\alpha T_m - 1}{T_m \gamma} \sin \gamma t \right). \quad (17)$$

Криві перехідного процесу $\omega=f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини показані на рис. 1. Як впливає із наведених залежностей, відхилення напруги не впливає на частоту коливань, а впливає на максимальне динамічне відхилення швидкості, яке зростає із

збільшенням напруги. В ряді випадків таке відхилення кутової швидкості має негативне значення для технологічного процесу.

Якщо $T_M > 4T_e$, корені характеристичного рівняння:

$$k_{1,2} = -(1/2T_e) \pm \sqrt{(1/2T_e)^2 - (1/T_e T_M)}. \quad (18)$$

Тоді розв'язком диференційного рівняння (11) при початкових умовах (15) буде вираз:

$$\omega = \omega_c + \frac{Jk_2(\omega_{noch} - \omega_c) - (M_{noch} - M_c)}{J(k_2 - k_1)} e^{k_1 t} + \frac{(M_{noch} - M_c) - Jk_1(\omega_{noch} - \omega_c)}{J(k_2 - k_1)} e^{k_2 t}. \quad (19)$$

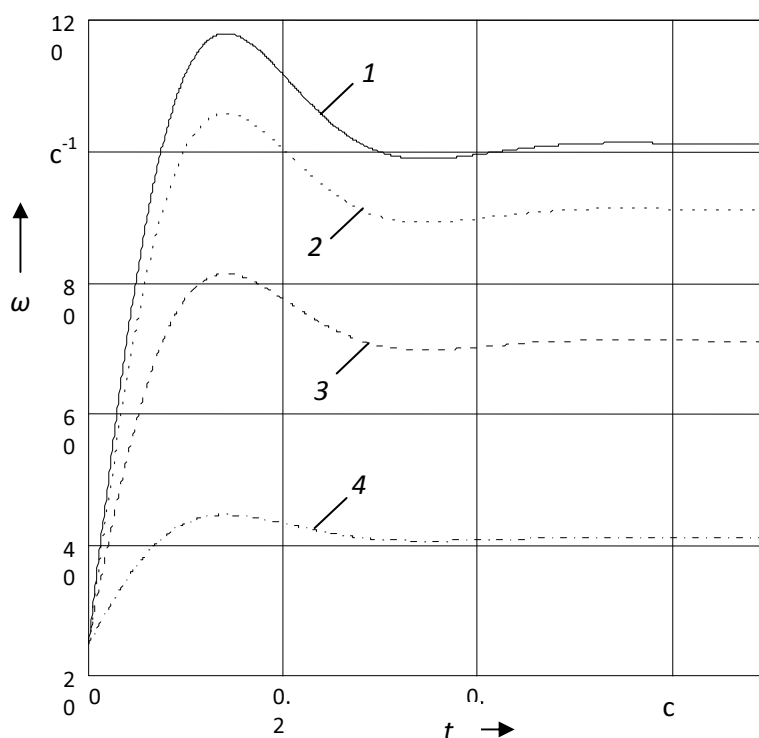


Рис. 1. Зміна кутової швидкості електродвигуна у часі при $T_M < 4T_e$ і напрузі:

1 – 242 В; 2 – 220 В; 3 – 176 В; 4 – 110 В

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (19) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + \frac{\omega_{noch} - \omega_c}{T_M(k_2 - k_1)} \left[(T_M k_2 + 1) e^{k_1 t} - (T_M k_1 + 1) e^{k_2 t} \right] \quad (20)$$

Криві перехідного процесу $\omega = f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини показані на рис. 2. У цьому випадку швидкість змінюється за експоненціальним законом. Усталене значення кутової швидкості визначається напругою, а час перехідного процесу не залежить від неї.

Якщо $T_M = 4T_e$, характеристичне рівняння має один корінь:

$$k = -1/2T_e. \quad (21)$$

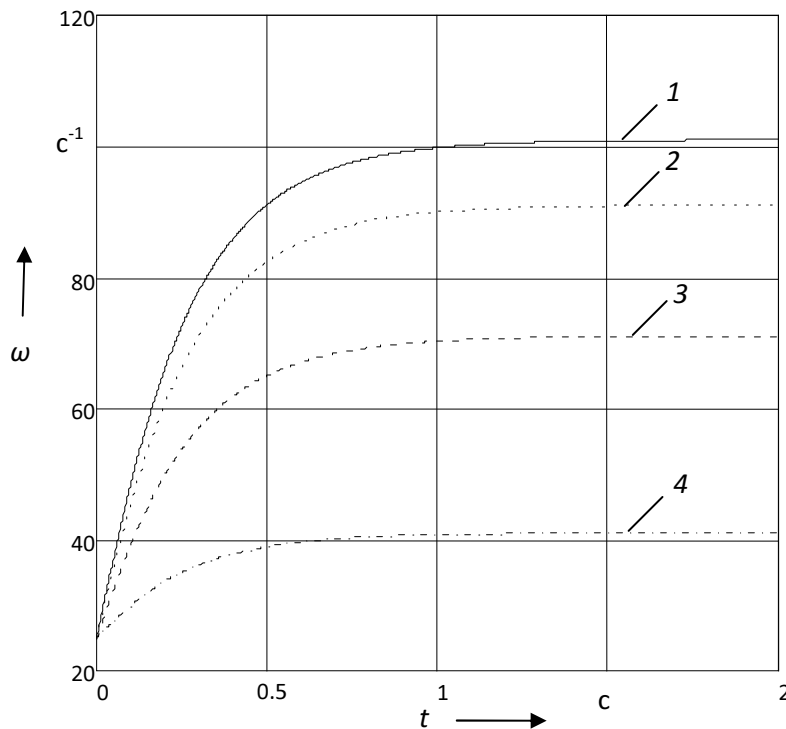


Рис. 2. Зміна кутової швидкості електродвигуна у часі при $T_m > 4T_e$ і напрузі:
1 – 242 В; 2 – 220 В; 3 – 176 В; 4 – 110 В

Тоді диференціальне рівняння (11) при початкових умовах (15) має розв'язок:

$$\omega = \omega_c + e^{kt} \left(\omega_{noch} - \omega_c + \frac{M_{noch} - M_c - Jk(\omega_{noch} - \omega_c)}{J} t \right). \quad (22)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (22) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{noch} - \omega_c) e^{kt} \left(1 - \left(k + \frac{1}{T_m} \right) t \right). \quad (23)$$

Криві перехідного процесу $\omega=f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини показані на рис. 3. Кутова швидкість у цьому випадку змінюється за нелінійним законом. Відхилення напруги викликає лише зміну усталеної кутової швидкості, а тривалість перехідного процесу не змінюється.

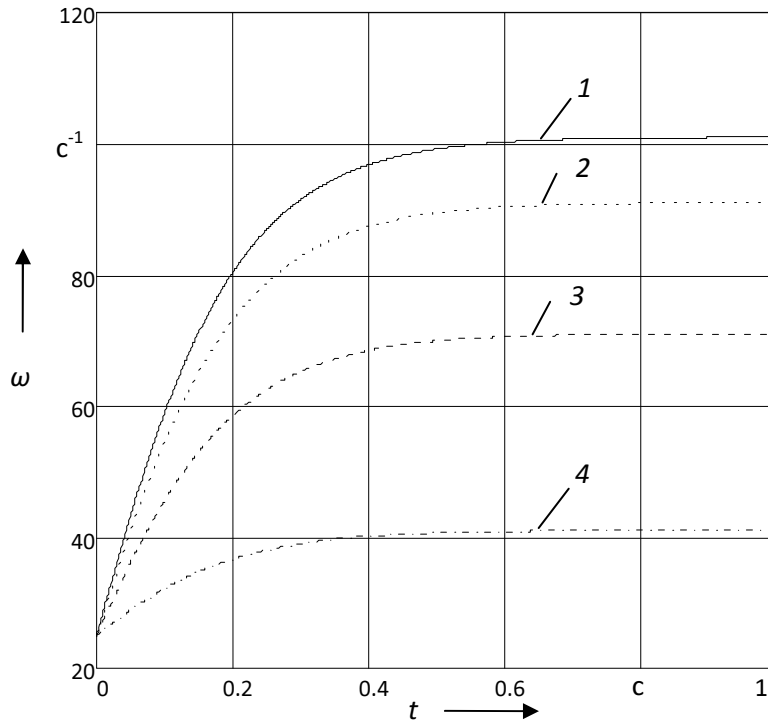


Рис. 3. Зміна кутової швидкості електродвигуна у часі при $T_M=4T_e$ і напрузі:

1 – 242 В; 2 – 220 В; 3 – 176 В; 4 – 110 В

Якщо момент статичних опорів робочої машини лінійно залежить від кутової швидкості, то

$$M_c = M_0 + \beta_c \omega, \quad (24)$$

де β_c – жорсткість механічної характеристики робочої машини, Н·м·с.

Підставимо значення моменту статичних опорів робочої машини у рівняння (9):

$$\beta_o \left(\frac{U}{C} - \omega \right) - T_e \left(\beta_c \frac{d\omega}{dt} + J \frac{d^2\omega}{dt^2} \right) = J \frac{d\omega}{dt} + M_0 + \beta_c \omega, \quad (25)$$

звідки отримуємо диференціальне рівняння, яке описує перехідний процес в електроприводі:

$$T_e \frac{J}{\beta_o + \beta_c} \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{J + \beta_c T_e}{\beta_o + \beta_c} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{\beta_o \cdot U / C - M_0}{\beta_o + \beta_c}. \quad (26)$$

Вирази $\frac{J}{\beta_o + \beta_c} = T'_M$ і $\frac{J}{\beta_c} = T''_M$ є електромеханічними сталими часу.

Тоді диференціальне рівняння (26) запишеться у вигляді:

$$T_e T'_M \frac{d^2\omega}{dt^2} + T'_M (1 + T_e / T''_M) \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_c, \quad (27)$$

де ω_c – усталене значення кутової швидкості:

$$\omega_c = \frac{\beta_\delta \cdot U / C - M_0}{\beta_\delta + \beta_c}. \quad (28)$$

Коли $T'_M < \frac{4T_e}{1 + T_e / T''_M}$, корені характеристичного рівняння визначаються за формулою:

$$k_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T''_M} \right) \pm j \sqrt{\frac{1}{T_e T'_M} - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T''_M} \right)^2} = -\alpha \pm j\gamma. \quad (29)$$

При початкових умовах $t = 0$, $\omega = \omega_{поч}$,

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_0 = (M_{поч} - M_c) / J \quad (30)$$

диференційне рівняння (26) має розв'язок:

$$\omega = \omega_c + e^{-\alpha t} \left[(\omega_{поч} - \omega_c) \cos \gamma t + \frac{M_{поч} - M_c + J\alpha(\omega_{поч} - \omega_c)}{J\gamma} \sin \gamma t \right]. \quad (31)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (31) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{поч} - \omega_c) e^{-\alpha t} \left(\cos \gamma t + \frac{T_M \alpha - 1}{T_M \gamma} \sin \gamma t \right). \quad (32)$$

Коли $T'_M > \frac{4T_e}{1 + T_e / T''_M}$, корені характеристичного рівняння визначаються за формулою:

$$k_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T''_M} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T''_M} \right)^2 - \frac{1}{T_e T'_M}}. \quad (33)$$

Тоді розв'язком диференційного рівняння (27) при початкових умовах (30) буде вираз:

$$\omega = \omega_c + \frac{Jk_2(\omega_{поч} - \omega_c) - (M_{поч} - M_c)}{J(k_2 - k_1)} e^{k_1 t} + \frac{(M_{поч} - M_c) - Jk_1(\omega_{поч} - \omega_c)}{J(k_2 - k_1)} e^{k_2 t}. \quad (34)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (34) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + \frac{\omega_{поч} - \omega_c}{T_M(k_2 - k_1)} \left[(T_M k_2 + 1) e^{k_1 t} - (T_M k_1 + 1) e^{k_2 t} \right] \quad (35)$$

Коли $T'_M = \frac{4T_e}{1 + T_e / T''_M}$, корені характеристичного рівняння визначаються за формулою:

$$k_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T_{//}} \right). \quad (36)$$

Тоді диференціальне рівняння (27) при початкових умовах (30) має розв'язок:

$$\omega = \omega_c + e^{kt} \left(\omega_{noch} - \omega_c + \frac{M_{noch} - M_c - Jk(\omega_{noch} - \omega_c)}{J} t \right). \quad (37)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (37) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{noch} - \omega_c) e^{kt} \left(1 - \left(k + \frac{1}{T_{//}} \right) t \right). \quad (38)$$

Отже, рівняння перехідного процесу зміни кутової швидкості аналогічні рівнянням, отриманим для випадку, коли момент статичних опорів робочої машини не залежить від кутової швидкості.

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів нелінійно залежить від кутової швидкості, можна виконати лінеаризацію механічної характеристики в межах діапазону зміни кутової швидкості при зміні напруги. Така характеристика досить точно описує реальну механічну характеристику. Тому в цьому випадку можна користуватися відповідними рівняннями зміни кутової швидкості, отриманими для робочих машин, у яких момент статичних опорів лінійно залежить від кутової швидкості.

Висновки

Відхилення напруги в електроприводах постійного струму не впливає на електромагнітну та електромеханічну сталі часу, а викликає лише зміну усталеної кутової швидкості. В електроприводах з невеликим моментом інерції підвищення напруги викликає збільшення відхилення динамічного значення кутової швидкості, а частота коливань не змінюється. В електроприводах, де електромагнітна стала часу значно перевищує електромагнітну, перехідні процеси при зміні напруги протікають за експоненціальним законом. При цьому тривалість перехідного процесу не залежить від напруги.

Список літератури

1. Електропривод / [Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Савченко П.І. та ін.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: Ліра-К, 2009. – 504 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода / Ключев В.И. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 560 с.
3. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода / Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.

Проведены исследования переходных процессов в электроприводе постоянного тока при отклонении напряжения. Установлены зависимости длительности переходного процесса и установившейся скорости от напряжения.

Электродвигатель постоянного тока, электропривод, отклонение напряжения, электромагнитная постоянная времени, электромеханическая постоянная времени, установившаяся скорость, время переходного процесса.

Researches of transients in the direct electric drive at the change of voltage are carried out. Dependences of the duration of the transient process and the established speed on voltage are established.

The direct electric motor, the electric drive, voltage fluctuation, electromagnetical constant of time, electromechanical constant of time, the established speed, the time of transients.

УДК 621.3.067

ДОСЛІДЖЕННЯ НА МОДЕЛІ В MatLab ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ СЕРІЇ Lenze 530

***І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, кандидати технічних наук
Національний університет
біоресурсів і природокористування України
А.В. Торопов, кандидат технічних наук
ТОВ "ЦІТ Альтера"***

Наведено комп'ютерну модель електропривода постійного струму з тиристорним перетворювачем напруги Lenze 534 та результати досліджень електромеханічних характеристик.

Перехідний процес, тиристорний перетворювач напруги, зворотний зв'язок, ПІ-регулятор, електромеханічна характеристика, модель.

Нині в промисловості широко використовується сучасний регульований електропривод на базі силової електроніки. Технічні характеристики, які наводяться в паспортних даних на елементи привода не завжди дають відповіді про його роботу в перехідних режимах. Для отримання інформації про перехідні режими необхідно проводити дослідження на лабораторних чи випробувальних стендах, що пов'язано зі значними витратами часу та додатковими витратами на їх створення. Значно спростити дослідження перехідних процесів можна з використанням комп'ютерної моделі такого електропривода в системі MatLab, який складається з двигуна постійного струму незалежного збудження та тиристорного перетворювача напруги серії Lenze 530.

Электродвигатель постоянного тока, электропривод, отклонение напряжения, электромагнитная постоянная времени, электромеханическая постоянная времени, установившаяся скорость, время переходного процесса.

Researches of transients in the direct electric drive at the change of voltage are carried out. Dependences of the duration of the transient process and the established speed on voltage are established.

The direct electric motor, the electric drive, voltage fluctuation, electromagnetical constant of time, electromechanical constant of time, the established speed, the time of transients.

УДК 621.3.067

ДОСЛІДЖЕННЯ НА МОДЕЛІ В MatLab ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ СЕРІЇ Lenze 530

***І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, кандидати технічних наук
Національний університет
біоресурсів і природокористування України
А.В. Торопов, кандидат технічних наук
ТОВ "ЦІТ Альтера"***

Наведено комп'ютерну модель електропривода постійного струму з тиристорним перетворювачем напруги Lenze 534 та результати досліджень електромеханічних характеристик.

Перехідний процес, тиристорний перетворювач напруги, зворотний зв'язок, ПІ-регулятор, електромеханічна характеристика, модель.

Нині в промисловості широко використовується сучасний регульований електропривод на базі силової електроніки. Технічні характеристики, які наводяться в паспортних даних на елементи привода не завжди дають відповіді про його роботу в перехідних режимах. Для отримання інформації про перехідні режими необхідно проводити дослідження на лабораторних чи випробувальних стендах, що пов'язано зі значними витратами часу та додатковими витратами на їх створення. Значно спростити дослідження перехідних процесів можна з використанням комп'ютерної моделі такого електропривода в системі MatLab, який складається з двигуна постійного струму незалежного збудження та тиристорного перетворювача напруги серії Lenze 530.

Мета досліджень – отримання достовірних характеристик електропривода постійного струму з напівпровідниковим перетворювачем напруги серії Lenze 530 в перехідних процесах на комп'ютерній моделі в системі MatLab при значному скороченні часу і зменшенні матеріальних затрат.

Матеріали та методика досліджень. Аналіз приводних характеристик проводився на основі положень теорії електропривода та з використанням комп'ютерної моделі в системі MatLab.

Результати досліджень. Тиристорні перетворювачі напруги (ТПН) німецької фірми Lenze серії 530 (рис. 1) виготовляють у чотирьох модифікаціях з вихідними потужностями від 0,36 до 2,04 кВт і призначені для роботи з двигунами постійного струму незалежного збудження в I квадранті. Перетворювачі працюють з від'ємним зворотним зв'язком по напрузі якоря (IR- компенсація) або по швидкості за напругою тахогенератора.



Рис. 1. Зовнішній вигляд тиристорного перетворювача напруги серії 530 фірми Lenze

На лицьовій стороні пристрою розміщені регулятори: I_{max} – установи максимально допустимого струму навантаження; $I \times R$ –настроювання зворотного зв'язку за напругою якоря ($I \times R$ -компенсація); n_{max} , n_{min} – обмеження максимальної і мінімальної швидкості двигуна; T_i – установки часу перехідного процесу.

Електрична схема привода з ТПН наведена на рис. 2. Після подачі напруги на ТПН одночасно струм надходить в обмотку збудження, а для подачі напруги на якорь двигуна необхідно ввімкнути вимикач *RFR*. При такому порядку вмикання привода магнітний потік встановлюється номінальним до початку роботи двигуна. Швидкість регулюється задатчиком,

яким може бути потенціометр $R = 10 \text{ кОм}$ або зовнішнє джерело напруги керування $U_K = 0 \dots 10 \text{ В}$.

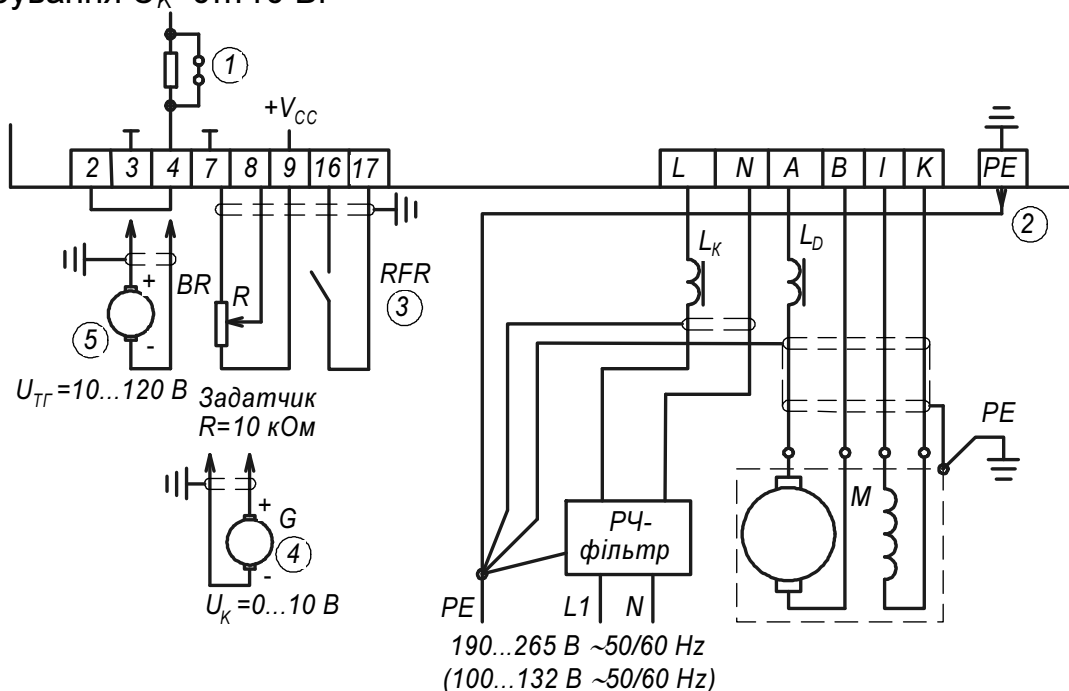


Рис. 2. Принципіальна електрична схема електропривода постійного струму з перетворювачем напруги серії 530:

1 – перемикач; 2 – роз'єднувач у вигляді лопатки; 3 – вимикач *RFR* для подачі напруги в коло якоря двигуна; 4 – зовнішнє джерело напруги керування; 5 – тахогенератор

На основі електричної схеми ТПН була створена модель в MatLab з від'ємними зворотними зв'язками за швидкістю (рис. 3).

Для електропривода використано двигун постійного струму незалежного збудження МІ32 314-02 з каталожними параметрами: $P_H = 0,78 \text{ кВт}$; $U_H = 110 \text{ В}$; $I_H = 8,2 \text{ А}$; $n_H = 2500 \text{ об/хв}$; $U_{3Б} = 110 \text{ В}$; $I_{3Б} = 0,35 \text{ А}$; $\eta_H = 0,86$; $J = 0,053 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $R_{Я} = 1,8 \text{ Ом}$; $L_{Я} = 0,021 \text{ Гн}$; $G = 38 \text{ кг}$.

Розрахункові величини для моделі:

$$T_{\Pi} = 0,01 \text{ с}; \quad T_{Я} = L_{Я}/R_{Я} = 0,021/1,8 \approx 0,02 \text{ с}; \quad R_H = U_H/I_H = 110/8,2 = 13,4 \text{ Ом};$$

$$R_{Я}^* = R_{Я}/R_H = 1,8/13,4 = 0,134; \quad \omega_H = \pi n_H/30 = 3,14 \cdot 2500/30 = 262 \text{ рад/с};$$

$$T_M = J R_{Я} \omega_H^2 / P_H = 0,053 \cdot 1,8 \cdot 262^2 / 780^2 = 0,72 \text{ с}; \quad I_{К.З} = U_H/R_{Я} = 110/1,8 = 61 \text{ А};$$

$$k\Phi_H = (U_H - I_H R_{Я})/\omega_H = (110 - 8,2 \cdot 1,8)/262 = 0,36 \text{ В}\cdot\text{с/рад}; \quad k_I = I_{К.З}/I_H = 61/8,2 = 7,4;$$

$$k_I T_M = 7,4 \cdot 0,72 = 5,33 \text{ с}.$$

У рівняннях використано позначення:

T_{Π} , $T_{Я}$ – електромагнітні сталі часу ТПН та якорного кола; $L_{Я}$, $R_{Я}$ – індуктивність та активний опір обмотки якоря; $R_{Я}^*$ – активний опір якоря у відносних одиницях; ω_H – номінальна частота обертання якоря двигуна; T_M – електро механічна стала часу; ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу;

$I_{к.з}$ – струм короткого замикання; k – конструктивний коефіцієнт; Φ_H – номінальний магнітний потік; k_I – кратність струму короткого замикання.

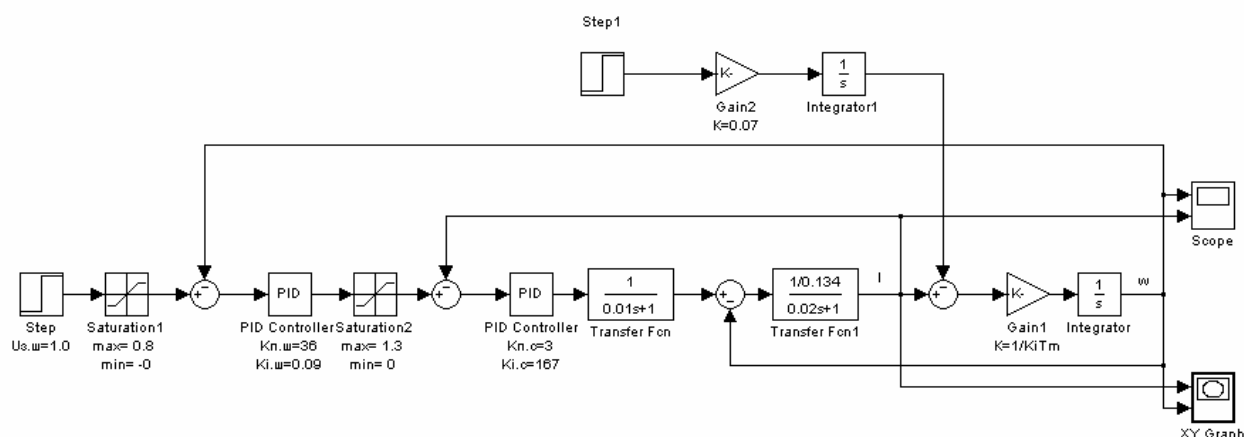
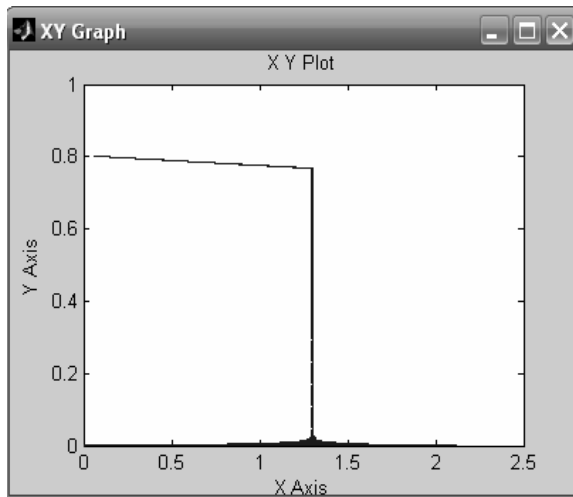


Рис. 3. Комп'ютерна модель електропривода постійного струму з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю

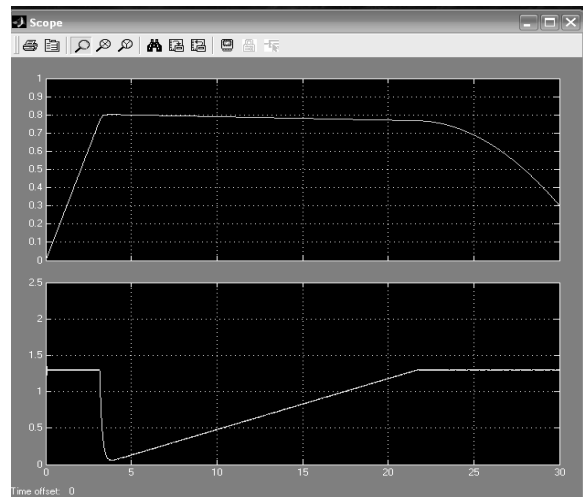
Вхідні параметри моделі задаються у відносних одиницях. Для переведення їх з відносних одиниць в іменовані необхідно перемножити отримані результати на відповідні базові величини U_H , I_H , R_H та ω_0 .

У наведеній моделі блок Transfer Fcn1 моделює ланку якоря двигуна ($T_J = 0,02$ с та коефіцієнт підсилення $1/R_d$), а блок Transfer Fcn – ланку тиристорного перетворювача напруги ($T_P = 0,01$ с). Блоки Integrator і підсилювач Gain1 з коефіцієнтом підсилення $K_1 = 1/k_I T_M$ реалізують рівняння руху електропривода. Струм навантаження формується як інтеграл від постійного сигналу блоками Step1, Gain2 з коефіцієнтом підсилення $K_2 = 0,07$ та Integrator1). Модель двоконтурна. Основою першого контуру є ПІ-регулятор з коефіцієнтами підсилення $k_{п.с} = 3$ та $k_{і.с} = 167$, ланки ТПН та якоря двигуна, які охоплені від'ємним зворотним зв'язком за струмом якоря. Другий контур з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю має також пропорційно-інтегральний ПІ-регулятор з коефіцієнтами підсилення $k_{п.ш} = 36$ та $k_{і.ш} = 0,09$. Тип регуляторів і їх коефіцієнти визначено згідно з [2, 3]. У вибраних регуляторах контур струму налаштовано на технічний оптимум, а контур швидкості – на симетричний. За допомогою регулятора T_i , який встановлений на лицевій панелі ТРН (див. рис. 1), можна змінювати коефіцієнт підсилення інтегральної складової ПІ-регулятора швидкості, що дає можливість змінювати час перехідного процесу. Керування моделлю здійснює блок Step, який задає напругу на виході ТРН. Модель має два обмежувальних блоки Saturation. Saturation1 призначений для обмеження максимальної n_{max} і мінімальної n_{min} швидкості, Saturation2 – для обмеження максимального струму I_{max} . Для візуалізації електромеханічної (механічної) характеристики використано блок XYGraph, а осцилограф Scope дає можливість спостерігати миттєві значення швидкості та струму якоря.

Результати моделювання роботи електропривода наведено на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Результати досліджень роботи електропривода на моделі в MatLab:

а – електромеханічна характеристика; б – графіки миттєвих значень швидкості (верхній) та струму (нижній)

Процес моделювання проходить так. Запуск двигуна відбувається без навантаження (рис 4, б), а через 3 с починає зростати навантаження. Згідно з завданням встановлено обмеження швидкості до $0,8\omega_0$, а максимального струму – на рівні $1,3I_H$.

Встановлені граничні значення модель точно відслідковує, що видно з отриманої електромеханічної характеристики (рис. 4, а).

На рис. 5 наведено електро-механічну характеристику, яка знята на лабораторній установці. Аналіз графіків підтверджує адекватність результатів, отриманих на моделі і реальній установці.

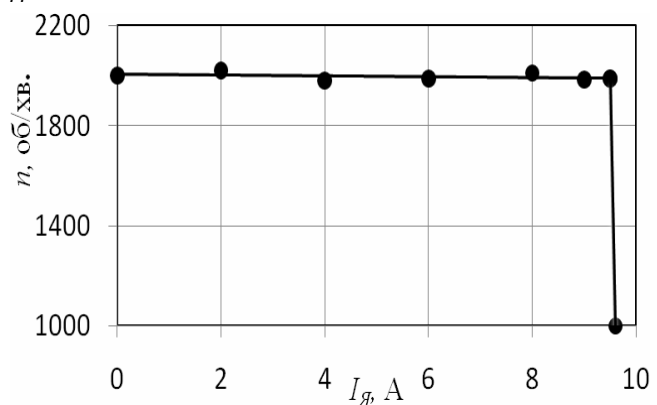


Рис. 5. Електромеханічна характеристика, знята на лабораторній установці

Висновки

Створено комп'ютерну модель в MatLab електропривода з ТПН серії Lenze 530, в якій передбачено обмеження максимальної і мінімальної швидкостей та максимального струму, стабілізацію заданої швидкості, зміну часу перехідного процесу, що відповідає технічним параметрам вказаного пристрою. Аналіз результатів досліджень підтвердив адекватність змодельованих перехідних процесів в електроприводах реальним.

Список літератури

1. Инструкция по эксплуатации электропривода постоянного тока серии Lenze 530: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lenze.org.ua/pdf/530_Speed_controllers_1202_EN.pdf
2. Регульований електропривод. Теорія. Моделювання: [підруч. для студ. вищ. навч. закладів] / [І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, М.В. Синявський та ін.]; за ред. І.М. Голодного. – К.: Аграр Медіа Груп, 2011. – 513 с.
3. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: Учеб. пособие / С.Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2002. – 304 с.

Приведена компьютерная модель электропривода постоянного тока с тиристорным регулятором напряжения Lenze 534 и результаты исследований электромеханической характеристики.

Переходной процесс, тиристорный преобразователь напряжения, обратная связь, ПИ-регулятор, электромеханическая характеристика, модель.

DC drive model with thyristor voltage regulator Lenze 534 and results of investigations of electromechanical properties are presented.

Transition process, semiconductor voltage converters, feedback, PI-controls, electromechanical characteristics, model.

УДК 621.313.8 : 631.53.027

ПЕРЕДПОСАДКОВА ОБРОБКА КАРТОПЛІ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ

***В.В. Савченко, О.Ю. Синявський, кандидати технічних наук
В.В. Савченко, студент магістратури***

Наведено результати досліджень зміни біопотенціалу, рН та урожайності картоплі при магнітній обробці. Визначено найефективніший режим обробки. Розроблено установку для магнітної обробки картоплі та проведено її дослідження.

Магнітна обробка, магнітна індукція, швидкість, біопотенціал, рН картоплі, режим обробки.

Для підвищення ефективності вирощування картоплі необхідно впроваджувати енерго- та ресурсозберігаючі технології, серед яких однією з перспективних є магнітна обробка картоплі. Порівняно з іншими електрофізичними методами це високопродуктивний, енергозберігаючий, екологічний та безпечний для обслуговуючого персоналу метод.

Впровадження технології магнітної обробки картоплі зумовлює вибір параметрів обробки та створення відповідного обладнання, які спри-

Список літератури

1. Инструкция по эксплуатации электропривода постоянного тока серии Lenze 530: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lenze.org.ua/pdf/530_Speed_controllers_1202_EN.pdf
2. Регульований електропривод. Теорія. Моделювання: [підруч. для студ. вищ. навч. закладів] / [І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, М.В. Синявський та ін.]; за ред. І.М. Голодного. – К.: Аграр Медіа Груп, 2011. – 513 с.
3. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: Учеб. пособие / С.Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2002. – 304 с.

Приведена компьютерная модель электропривода постоянного тока с тиристорным регулятором напряжения Lenze 534 и результаты исследований электромеханической характеристики.

Переходной процесс, тиристорный преобразователь напряжения, обратная связь, ПИ-регулятор, электромеханическая характеристика, модель.

DC drive model with thyristor voltage regulator Lenze 534 and results of investigations of electromechanical properties are presented.

Transition process, semiconductor voltage converters, feedback, PI-controls, electromechanical characteristics, model.

УДК 621.313.8 : 631.53.027

ПЕРЕДПОСАДКОВА ОБРОБКА КАРТОПЛІ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ

***В.В. Савченко, О.Ю. Синявський, кандидати технічних наук
В.В. Савченко, студент магістратури***

Наведено результати досліджень зміни біопотенціалу, рН та урожайності картоплі при магнітній обробці. Визначено найефективніший режим обробки. Розроблено установку для магнітної обробки картоплі та проведено її дослідження.

Магнітна обробка, магнітна індукція, швидкість, біопотенціал, рН картоплі, режим обробки.

Для підвищення ефективності вирощування картоплі необхідно впроваджувати енерго- та ресурсозберігаючі технології, серед яких однією з перспективних є магнітна обробка картоплі. Порівняно з іншими електрофізичними методами це високопродуктивний, енергозберігаючий, екологічний та безпечний для обслуговуючого персоналу метод.

Впровадження технології магнітної обробки картоплі зумовлює вибір параметрів обробки та створення відповідного обладнання, які спри-

яють підвищенню урожайності та якості товарної продукції, що є актуальною проблемою.

Мета досліджень – підвищення урожайності картоплі шляхом безпосередньої дії на неї магнітним полем перед посадкою.

Матеріали та методика досліджень. Теоретичні дослідження впливу магнітного поля на зміну біопотенціалу та рН картоплі проведене з використанням положень теорії зіткнень.

Експериментальні дослідження виконувалися із застосуванням методу планування експерименту на лабораторній установці з електромагнітами. Періодичне магнітне поле створювалося чотирма індукторами, увімкненими зустрічно-паралельно. Магнітну індукцію у повітряному зазорі індуктора регулювали зміною напруги постійного струму, прикладеної до котушок індукторів. Величину магнітної індукції вимірювали тесламетром. Швидкість руху картоплі через магнітне поле, створюване індукторами, змінювали за допомогою перетворювача частоти Delta VFD004EL43A. Платиновий та скляний вимірювальні та хлорсрібний допоміжний електроди встромлювали у картоплю і за допомогою іономіра вимірювали окислювально-відновний потенціал та рН картоплі до магнітної обробки і після неї.

При дослідженнях використовувався ортогональний центральноконфігураційний план (план ПФЕ 2^2 і зіркові точки) [1]. Магнітну індукцію змінювали у межах від 15 до 45 мТл, а швидкість стрічки транспортера – від 0,5 до 1,5 м/с.

Полеві дослідження із картоплею сорту «Луговська» виконувалися за такою схемою: 1-й варіант (контрольний) – картоплю вирощували без обробки у магнітному полі; 2-й варіант – картоплю перед посадкою оброблювали у магнітному полі з магнітною індукцією 13 мТл; 3-й варіант – з магнітною індукцією 20 мТл; 4-й варіант – з магнітною індукцією 30 мТл; 5-й варіант – з магнітною індукцією 45 мТл.

Досліди виконувалися у чотирикратній повторності. Дослідні ділянки площею 20 м² розміщувалися методом звичайних повторень. Вплив магнітної обробки картоплі оцінювали за біометричними показниками рослин та урожайністю.

Результати досліджень. У бульб картоплі протікають різноманітні хімічні та біохімічні реакції, які за своєю суттю є переважно окислювально-відновними. Стимуляція картоплі пов'язана із дією на іони сили Лоренца [4,6], яка змінює нормальну складову їх швидкості:

$$\Delta v_n = v(\cos\beta_m - \cos\beta), \quad (1)$$

або

$$\Delta v_n = rqB(\cos\beta_m - \cos\beta)/m, \quad (2)$$

де r – радіус кола, по якому відбувається рух іона, м; q – заряд іона, Кл; B – магнітна індукція, Тл; m – маса іона, кг; β і β_m – кут між вектором швид-

кості і лінією, яка з'єднує центри часток, відповідно без обробки і при магнітній обробці.

При цьому змінюється кінетична енергія відносного руху іонів вздовж лінії центрів:

$$\Delta E_n = \frac{\mu \Delta v_{nm}^2}{2} + \mu v_n \Delta v_{nm}, \quad (3)$$

де μ – зведена маса часток.

Із урахуванням (2) вираз (3) прийме вигляд:

$$\Delta E_n = \frac{\mu K^2 B^2}{2} + \mu K B v_n, \quad (4)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від виду іонів та кількості переманічунів:

$$K = r q B (\cos \beta_m - \cos \beta) / m. \quad (5)$$

Зміна кінетичної енергії відносного руху іонів викликає зміну біопотенціалу та рН картоплі [3]:

$$\Delta \text{БП} = -2,3^2 \frac{\Delta E_n}{zF}; \quad (6)$$

$$\Delta pH = 2,3 \frac{\Delta E_n}{RT}, \quad (7)$$

де z – валентність іона; F – число Фарадея, Кл/моль; R – універсальна газова стала, Дж/(К·моль); T – температура, К.

Тоді з урахуванням (4) зміна біопотенціалу та рН:

$$\Delta \text{БП} = -\frac{2,3^2 K \mu}{zF} \left(\frac{KB^2}{2} + v_n B \right), \quad (8)$$

$$\Delta pH = \frac{2,3 K \mu}{RT} \left(\frac{KB^2}{2} + v_n B \right). \quad (9)$$

Коефіцієнти в рівняннях (8) і (9) були визначені експериментально. На основі багатофакторного експерименту отримали рівняння регресії зміни біопотенціалу та рН, які для 5 %-ного рівня значущості мають вигляд (рис.1):

$$\Delta \text{БП} = 24,12 + 1,44B - 19,66v + 9,57Bv - 0,027B^2, \quad (10)$$

$$\Delta pH = -0,0282 + 0,0116B - 0,05v + 0,0017Bv - 0,0002B^2. \quad (11)$$

де B – магнітна індукція, мТл; v – швидкість руху стрічки транспортера, м/с.

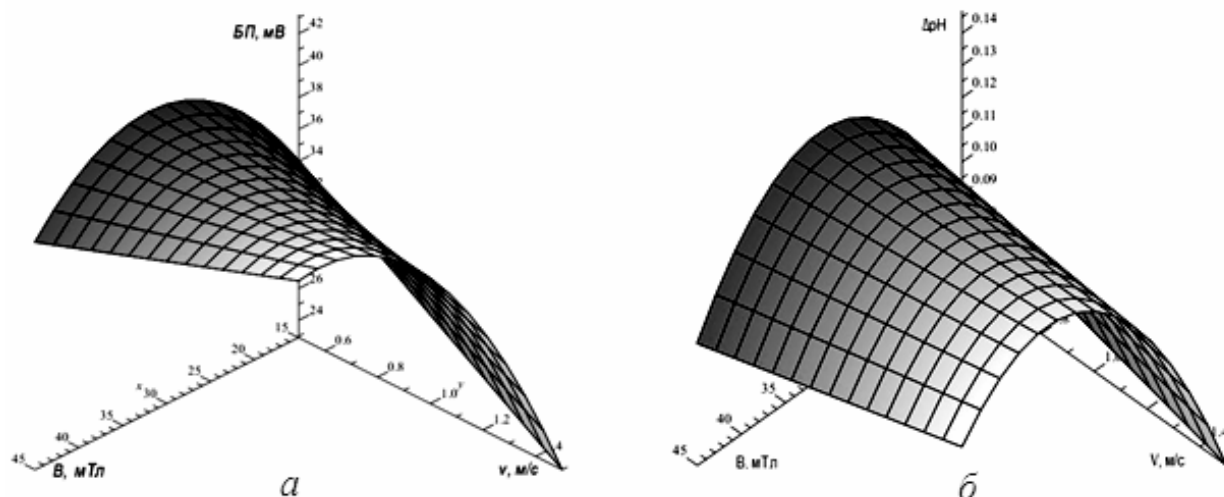


Рис.1. Залежність зміни біопотенціалу (а) та рН (б) картоплі від магнітної індукції і швидкості руху стрічки транспортера при магнітній обробці

Проведений багатофакторний експеримент дав можливість встановити вплив енергетичної дози обробки на зміни біопотенціалу та рН картоплі. Енергетичну дозу обробки картоплі у магнітному полі визначали за формулою:

$$D = \frac{B_m^2 l}{6 \mu \mu_0 \rho v}, \quad (12)$$

де B_m – значення магнітної індукції у площині установки магнітів, Тл; l – шлях, який проходить картопля у магнітному полі при обробці, м; ρ – густина картоплі, кг/м³.

Залежність зміни біопотенціалу та рН картоплі від енергетичної дози обробки наведено на рис.2. Найбільше біопотенціал та рН картоплі змінюються при енергетичній дозі обробки 0,23 Дж·с/кг, яка відповідає магнітній індукції 30 мТл і швидкості стрічки транспортера 1 м/с. Цей режим є найефективнішим при магнітній обробці картоплі.

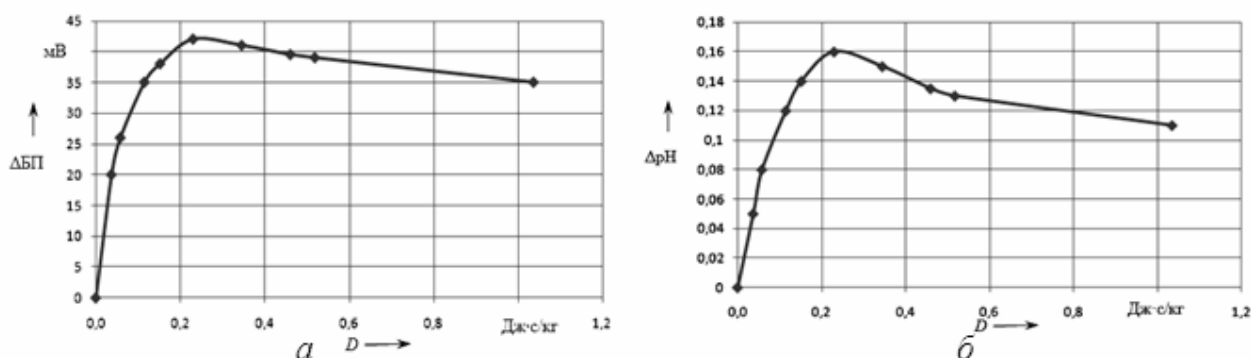


Рис. 2. Залежність зміни біопотенціалу (а) та рН (б) картоплі від енергетичної дози обробки

Визначений режим магнітної обробки картоплі на основі зміни її біопотенціалу та рН був перевірений шляхом дослідження урожайності і

біометричних показників рослин картоплі при магнітній обробці відповідно до відомої методики польового дослідження [2].

Встановлено, що найкращі біометричні показники та урожайність картоплі були при магнітній індукції 30 мТл і швидкості руху стрічки транспортера 1 м/с (доза обробки 0,23 Дж·с/кг). При збільшенні або зменшенні дози обробки біометричні показники та урожайність картоплі зменшуються, але залишаються вищими, порівняно з необробленою у магнітному полі картоплею (рис. 3).

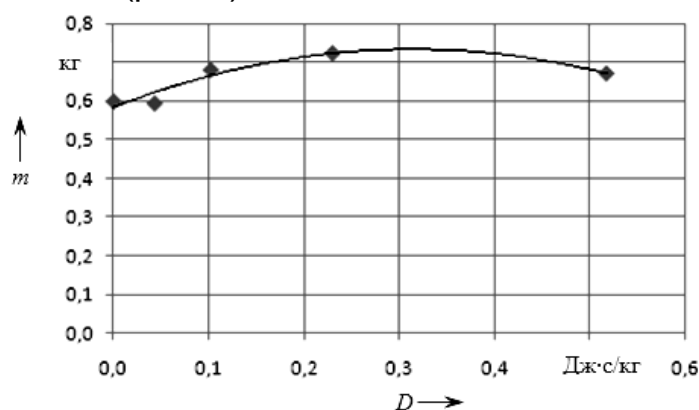


Рис.3. Залежність середньої урожайності з куща картоплі від енергетичної дози обробки

Визначений режим передпосадкової обробки картоплі у магнітному полі був покладений в основу створення установки для магнітної обробки картоплі (рис.4).

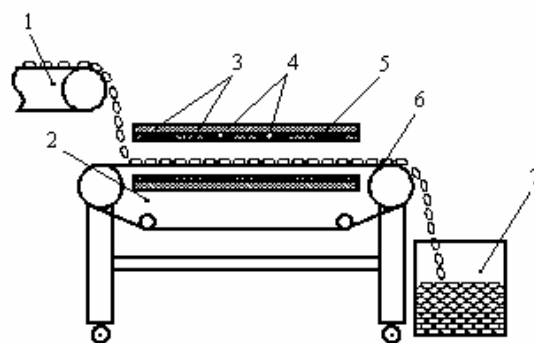


Рис. 4. Функціональна схема електротехнологічного комплексу для магнітної обробки картоплі:

1 – завантажувальний транспортер ТЗК-30; 2 – транспортер електротехнологічного комплексу для магнітної обробки картоплі; 3 – текстолітові вставки; 4 – постійні магніти; 5 – плита з електротехнічної сталі; 6- об'єкт обробки; 7 – контейнер

Конструкція установки для магнітної обробки картоплі передбачає встановлення чотирьох пар постійних магнітів з інтерметалічного композита NdFeB паралельно над і під стрічкою транспортера зі змінною полярністю. Магніти приклеєні до сталевих плит, проміжки між ними заповнені текстолітом. З лицевих сторін плити обшиті нержавіючою сталлю. Привод транспортера здійснюється від трифазного асинхронного електродвигуна через знижувальний редуктор.

Проведені дослідження установки для магнітної обробки картоплі показали, що відхилення магнітної індукції в робочій зоні від розрахункового значення 30 мТл не перевищує 5 %, а швидкості руху транспортерної стрічки при зміні навантаження і відхиленні напруги – 4 %.

Висновки

На основі проведених досліджень встановлено, що найефективнішим режимом магнітної обробки картоплі перед посадкою є магнітна індукція 30 мТл при чотирикратному перемагнічуванні і швидкості руху стрічки транспортера 1 м/с. Урожайність картоплі при передпосадковій обробці у магнітному полі підвищується на 17 – 21 %, кількість товарних бульб збільшується на 15 %, у бульбах картоплі, оброблених у магнітному полі, збільшується вміст крохмалю, вітаміну С, сухої речовини на 3 – 4 %, а концентрація нітратів зменшується на 6 %.

Застосування електротехнологічного комплексу для магнітної обробки картоплі забезпечує на площі 4 га чистий дисконтований прибуток 3164 грн. при терміні окупності 1 рік. Індекс прибутковості у перший рік експлуатації більший за одиницю, що підтверджує високу ефективність розробки.

Список літератури

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. – М.: Наука, 1976. – 278 с.
2. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований / Б.А. Доспехов – М.: Колос, 1985. – 351 с.
3. Савченко В.В. Вплив електромагнітної обробки на фізико-хімічні процеси в картоплі / В.В. Савченко // Науковий вісник НУБіП України. – 2010. – № 148. – С. 86–92.
4. Синявський О.Ю. Магнітна обробка картоплі / О.Ю. Синявський, В.В. Савченко // Праці Таврійського держ. агротехнологічного університету. – Мелітополь, 2010. – Вип. 10, т.10 – С. 170-173.
5. Физическая химия. Теоретическое и практическое руководство / Б.П. Никольский, Н.А. Смирнова, М.Ю. Панов и др.]; под ред. акад. Б.П.Никольского – Л.: Химия, 1987. – 880 с.
6. Sinyavsky A. Magnetic treatment of potato tubers / A. Sinyavsky, V. Savchenko // Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. – Agriculture (Agricultural and Forest Engineering). – Warsaw: 2011. – № 57. – P. 57-64.

Приведены результаты исследований изменения биопотенциала, pH и урожайности картофеля при магнитной обработке. Определен наиболее эффективный режим обработки. Разработана установка для магнитной обработки картофеля и проведено ее исследование.

Магнитная обработка, магнитная индукция, скорость, биопотенциал, pH картофеля, режим обработки.

The results of the research of the changes of potato biopotential, pH and yield at magnetic treatment are resulted. The most effective mode of treatment is certain. A plant for the magnetic treatment of potato is constructed and conducted his research.

Magnetic treatment, magnetic induction, speed, biopotential, pH potato, mode of treatment.

УДК 631.147:635.82

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ПЕРЕМІШУВАННЯ СУБСТРАТУ В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ

Г.М. Борщ, кандидат технічних наук

В.В. Устимчук, інженер

Наведено результати досліджень залежності впливу конструкції системи перемішування на інтенсивність перемішування, склад субстрату та вихід біогазу.

Біогаз, субстрат, система перемішування, частотний регулятор.

Нині все більшу увагу привертають нетрадиційні, з точки зору, джерела енергії: сонячне випромінювання, морські припливи і хвилі тощо. Деякі з них, як наприклад вітер, знаходили широке застосування і в минулому, а в наш час переживають друге народження. Одним із «забутих» видів енергії є біогаз, що використовувався ще в Стародавньому Китаї і тепер знову «відкритий». Терміном біогаз позначають газоподібний продукт, що отримується в результаті анаеробного бродіння, тобто без доступу повітря, ферментації органічних речовин різного походження. У будь-якому селянському господарстві протягом року збирається значна кількість гною, стебел рослин, листя дерев і різних відходів. Зазвичай після розкладання їх використовують як органічне добриво. Однак невідомо, яка кількість біогазу та тепла виділяється при ферментації.

Біогаз – енергоносіє, який є сумішшю метану (60 – 70 %), діоксиду вуглецю (30 – 40 %), невеликої кількості сірководню, водню, аміаку та оксиду азоту (5 %). Склад біогазу може змінюватися залежно від сировини

Приведены результаты исследований изменения биопотенциала, pH и урожайности картофеля при магнитной обработке. Определен наиболее эффективный режим обработки. Разработана установка для магнитной обработки картофеля и проведено ее исследование.

Магнитная обработка, магнитная индукция, скорость, биопотенциал, pH картофеля, режим обработки.

The results of the research of the changes of potato biopotential, pH and yield at magnetic treatment are resulted. The most effective mode of treatment is certain. A plant for the magnetic treatment of potato is constructed and conducted his research.

Magnetic treatment, magnetic induction, speed, biopotential, pH potato, mode of treatment.

УДК 631.147:635.82

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ПЕРЕМІШУВАННЯ СУБСТРАТУ В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ

Г.М. Борщ, кандидат технічних наук

В.В. Устимчук, інженер

Наведено результати досліджень залежності впливу конструкції системи перемішування на інтенсивність перемішування, склад субстрату та вихід біогазу.

Біогаз, субстрат, система перемішування, частотний регулятор.

Нині все більшу увагу привертають нетрадиційні, з точки зору, джерела енергії: сонячне випромінювання, морські припливи і хвилі тощо. Деякі з них, як наприклад вітер, знаходили широке застосування і в минулому, а в наш час переживають друге народження. Одним із «забутих» видів енергії є біогаз, що використовувався ще в Стародавньому Китаї і тепер знову «відкритий». Терміном біогаз позначають газоподібний продукт, що отримується в результаті анаеробного бродіння, тобто без доступу повітря, ферментації органічних речовин різного походження. У будь-якому селянському господарстві протягом року збирається значна кількість гною, стебел рослин, листя дерев і різних відходів. Зазвичай після розкладання їх використовують як органічне добриво. Однак невідомо, яка кількість біогазу та тепла виділяється при ферментації.

Біогаз – енергоносіє, який є сумішшю метану (60 – 70 %), діоксиду вуглецю (30 – 40 %), невеликої кількості сірководню, водню, аміаку та оксиду азоту (5 %). Склад біогазу може змінюватися залежно від сировини

(біомаси), мікроорганізмів, що беруть участь у процесі, добавок та фізичних факторів.

Коефіцієнт трансформації біомаси у метан досягає 90 %. Найрентабельнішим є використання біогазу для отримання електроенергії (загальний ККД з урахуванням тепла, яке утворюється при виробництві енергії, становить 80 – 85 %). Безпосередньо в електричну перетворюється приблизно 33 % енергії метану.

Мета досліджень – встановлення закономірностей виходу біогазу та концентрації в ньому метану від інтенсивності перемішування і конструкції системи перемішування для забезпечення ефективного режиму роботи біогазової установки.

Матеріали та методика досліджень. Для проведення експериментальних досліджень було розроблено дослідну лабораторну установку, змонтовану у ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція», конструкція якої наведена на рис. 1.

Установка складається з підготовчої камери, яка обігривається, і реактора у формі горизонтально розміщеного циліндра, що дає можливість кращого переміщення субстрату, а це в свою чергу дозволяє уникнути утворення так званої «кірки», і тим самим збільшити вихід біогазу. Реактор обладнаний трубопроводами для подачі підготовленого субстрату і відведення переродженої маси, системою обігрівання сировини, має обладнання для перемішування субстрату та обладнання для збору, попереднього очищення і нагромадження біогазу. На всій площі реактора розміщено нагрівачі з труб, які забезпечують однакову температуру у всьому об'ємі реактора. Для перемішування субстрату використовується фекальний циркуляційний насос з системою труб, які розміщені в реакторі.

Установка складається з підготовчої камери 1, звідки субстрат переміщується в реактор 2. В реакторі 2 проходить процес ферментації за допомогою анаеробних бактерій, в результаті чого утворюється біогаз. Після завершення процесу ферментації, він надходить в ємкість для біодобив 4.

Щоб процес ферментації проходив стабільно з максимальним виходом біогазу і концентрації в ньому метану, необхідно підтримувати стабільну температуру до вибраного температурного режиму.

Підтримання стабільної температури забезпечується за рахунок системи обігрівання, яка складається з водогрійного котла 5, циркуляційного насоса 6, який подає теплоагент на обігрівання реактора 7, і підготовчої камери 8. Обігрівання реактора 7 здійснюється трубою, яка укладена по внутрішній поверхні реактора 2 через рівні проміжки, що забезпечує рівномірне нагрівання субстрату. В підготовчій камері 1 розміщено трубчастий обігрів 8, що дає можливість підігрівати субстрат до температури робочого режиму.

Перемішування субстрату в реакторі відбувається за допомогою циркуляційного насоса 3, двигун якого під'єднаний до мережі через частотний регулятор фірми Lenze ETM L 4TXA, наданий СВ «Альтера». На дні реактора 2 розміщена забірня гребінка 18, через яку проходить всмоктування субстрату насосом 3. Насос 3 під тиском подає субстрат на розпилюючу гребінку 17, яка розташована вище рівня субстрату. Розпилююча гребінка 17 виконана з труби, по довжині якої є отвори, що дозволяють розпилювати субстрат, тим самим запобігаючи утворення «кірки».

Біогаз, що утворився, накопичується у верхній частині реактора 2, звідки він надходить в осушувач 9 і фільтр 10. При тиску, заданому електроконтактним манометром 11, вмикається компресор 12, який нагнітає газ у газгольдер 13. Для контролю тиску газу в газгольдері 13 встановлено манометр 14, а для запобігання аварії – клапан 15. Для нормальної роботи газового обладнання встановлено газовий редуктор 16.

Для проведення експериментів кожного разу в реактор завантажувалося 3 м³ гною великої рогатої худоби при температурі +37 °С. Режим перемішування субстрату наведено в табл. 1.

1. Характеристики інтенсивності перемішування субстрату

№ з/п	Кількість перемішувань за добу	Час одного перемішування, хв	Швидкість обертання робочого колеса насоса, об/хв
1	12	15	705
2	12	15	352,5
3	24	10	705
4	24	10	352,5

Результати досліджень. Для визначення інтенсивності перемішування субстрату були проведені дослідження залежності швидкості обертання робочого колеса насоса від його кількості і часу його включення.

Результати досліджень наведено в табл. 2.

2. Результати досліджень виходу біогазу і вмісту метану при різній інтенсивності перемішування субстрату в біогазовій установці

№ з/п	Параметр	Час запуску установки t, діб	Час включення t, діб							
			14	16	18	22	26	30	33	35
1	V, м ³ /доб		2,8	4,0	5,8	6,0	6,1	6,1	6,0	4,9
	CH ₄ , %		40	60	62	65	65	64	62	60
2	V, м ³ /доб		3,0	4,3	6,2	6,6	7,0	7,0	6,8	6,3
	CH ₄ , %		43	62	64	66	66	65	62	60
3	V, м ³ /доб		2,8	4,1	5,9	6,1	6,3	6,3	6,2	5,2
	CH ₄ , %		42	66	70	70	70	70	70	68
4	V, м ³ /доб		3,2	4,6	6,5	7,0	7,5	7,5	7,2	6,4
	CH ₄ , %		48	65	72	73	73	73	72	70

Дослідження, проведені при різній інтенсивності перемішування субстрату (чотири режими роботи насоса) в реакторі біогазової установки показали, що найкращий режим роботи насоса при 352,5 об/хв і частотою включення 24 рази/добу протягом 10 хв. При використанні цього режиму відбувається максимальний вихід біогазу з найбільшою концентрацією метану в ньому. На рис. 2 показано вихід біогазу, а на рис. 3 – концентрацію метану в ньому при різній інтенсивності перемішування.

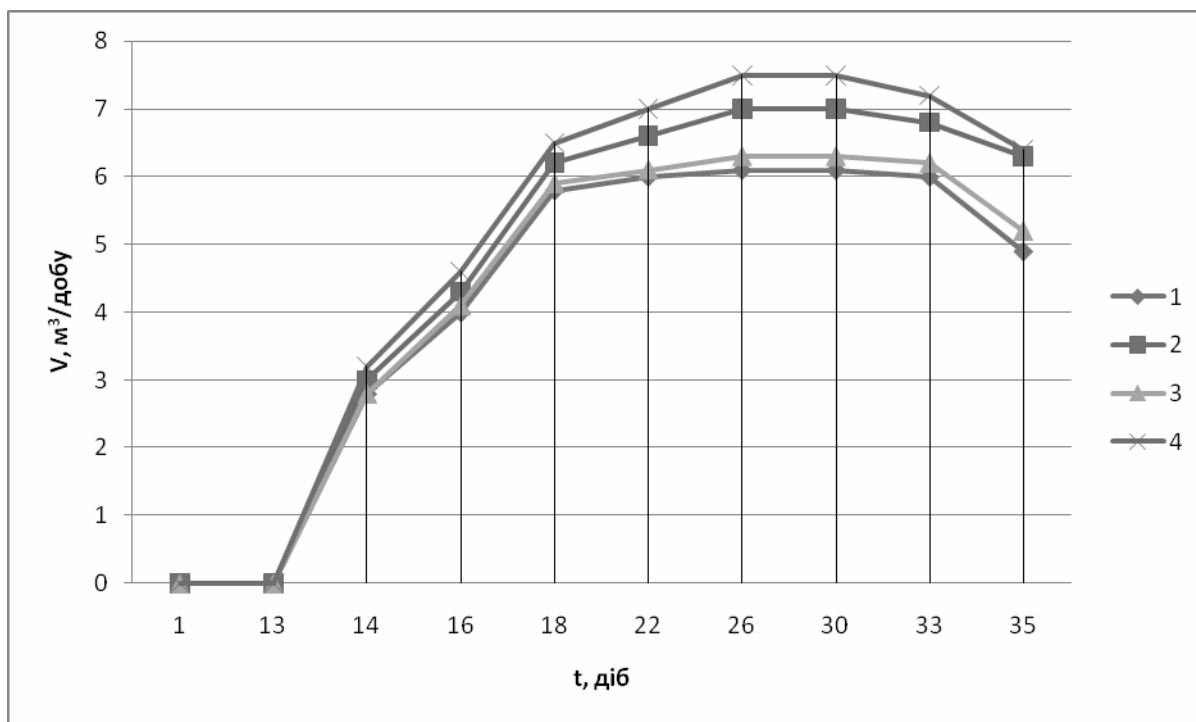


Рис. 2. Залежність виходу біогазу при різних інтенсивностях перемішування:

- 1 – частота обертання насоса 705 об/хв при включенні 12 раз/добу на 15 хв;
- 2 – частота обертання насоса 352,5 об/хв при включенні 12 раз/добу на 15 хв;
- 3 – частота обертання насоса 705 об/хв при включенні 24 раз/добу на 10 хв.;
- 4 – частота ротора насоса 352,5 об/хв при включенні 24 раз/добу на 10 хв

Висновки

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено закономірності зміни виходу біогазу та концентрації в ньому метану від інтенсивності перемішування субстрату. Встановлено, що в біогазових установках при використанні гідравлічної системи перемішування доцільно використовувати насос з частотою обертання робочого колеса 352,5 об/хв при включенні 24 раз/добу на 10 хв.

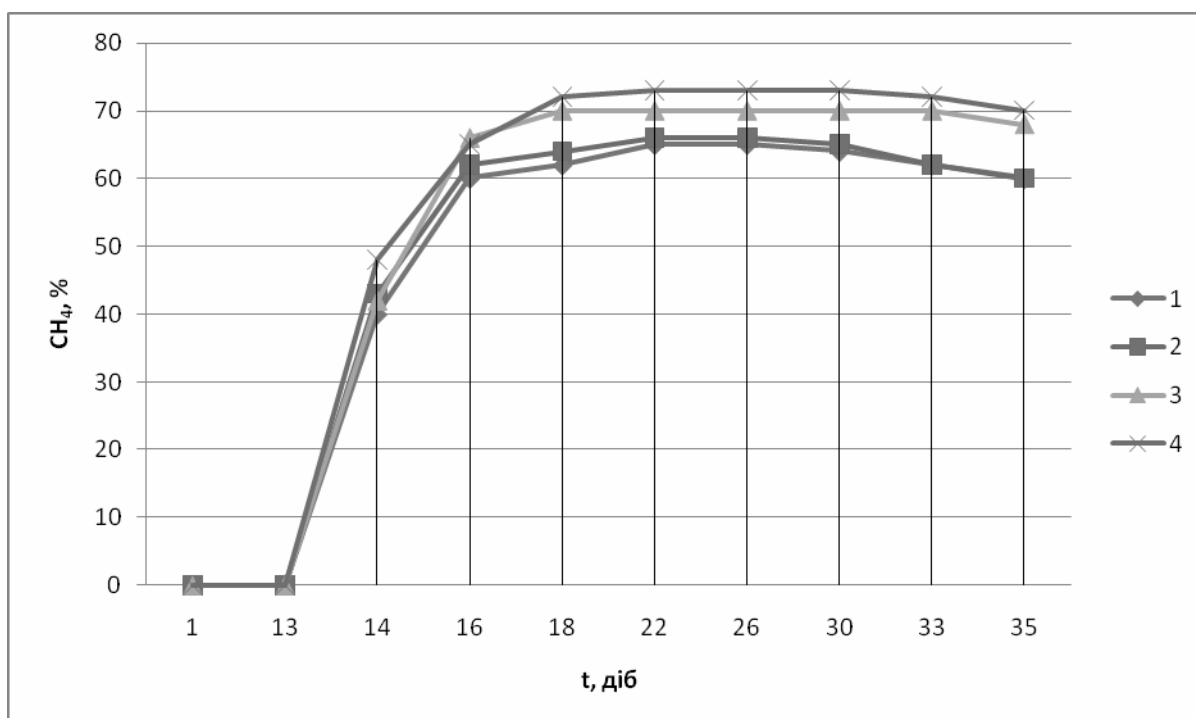


Рис. 3. Залежність концентрація метану в біогазі при різних інтенсивностях перемішування:

- 1 – частота обертання насоса 705 об/хв при включенні 12 раз/добу на 15 хв;
- 2 – частота обертання насоса 352,5 об/хв при включенні 12 раз/добу на 15 хв;
- 3 – частота обертання насоса 705 об/хв при включенні 24 раз/добу на 10 хв.;
- 4 – частота ротора насоса 352,5 об/хв при включенні 24 раз/добу на 10 хв

Список літератури

1. Бааде В. Биогаз: теория и практика / Бааде В., Доне Е., Бренндерфер М.; пер. с нем. – М.: Колос, 1982. – 148 с.
2. Эдер Б. Биогазовые установки. Практ. пособ. / Б. Эдер, Х. Шульц; пер. с нем. – Zorg Biogas, 2008. – 268 с.
3. Шеина О.А. Биохимия процесса производства биогаза как альтернативного источника энергии / О.А. Шеина, В.А. Сысоев // Вестник ТГУ. – 2009. – Т.14, вып.1. – С. 73 – 76.

Приведены результаты исследований зависимости влияния конструкции системы перемешивания на интенсивность перемешивания, состав субстрата и выход биогаза.

Биогаз, субстрат, система перемешивания, частотный регулятор.

The results of research design effects depending on the intensity of mixing, the composition of the substrate and biogas yield.

Biogas, substrate, mixing system, frequency controller.

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ МЕТОДИ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ

Л.С. Червінський, доктор технічних наук

*О.І. Романенко, аспірант**

Систематизовано методи передпосівної обробки насіння з метою підвищення схожості та урожайності сільськогосподарських культур. Визначено перспективні методи передпосівної обробки насіння.

Передпосівна обробка, насіння, посівні якості насіння, енергія проростання насіння, схожість.

Нині стратегічно важливим питанням в Україні є підвищення урожайності сільськогосподарських культур, яким приділяється значна увага як при наукових дослідженнях, так і виробниками. Інтегрованим результатом роботи сільськогосподарських підприємств є якість насіння та урожайність, що залежать від багатьох факторів, а саме: агрокліматичних умов, посівних кондицій посівного матеріалу, якісних характеристик ґрунту, урожайних властивостей насіння тощо. Дотримування агротехнічних прийомів, які рекомендовані для певної зони вирощування та своєчасне проведення необхідних заходів щодо захисту насіння і рослин завжди дадуть позитивні результати на насінницьких посівах [7].

Забезпечення стійких урожаїв сільськогосподарських культур неможливе без передпосівної обробки насіння, яка сприяє підвищенню якості посівного матеріалу, створенню умов для поліпшення зростання і розвитку рослин, а також передбачає знезараження насіння.

Мета досліджень – аналіз і систематизація методів передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур.

Матеріали та методика досліджень. Для оздоровлення насіння та активізації ростових процесів у них в основному використовуються такі прийоми: обробка фунгіцидами; протравлення насіння плівкотвірними препаратами з використанням рідких комплексних добрив; протравлення насіння препаратами з використанням натрієвої солі (NaNO_3) і т. д.

Ці прийоми погіршують родючість ґрунту та якість наземної і підземної води, отруюють їжу і викликають зростання захворюваності, тобто вони не є екологічно чистими способами.

Для передпосівної обробки застосовують також термічні, термохімічні і хімічні методи, тривалість яких досягає 2–72 год. Ці методи не лише дуже праце- та енергоємні, але і не екологічно чисті [3].

Існують достатньо вивчені такі електротехнологічні способи передпосівної обробки насіння електричним полем коронного розряду (ЧІ-

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Л.С. Червінський

© Л.С. Червінський, О.І. Романенко, 2013

МЕСГ, ЦНГГСГ, Кіровський політехнічний інститут та ін.); магнітним полем (Челябінський НДІ та ін.); лазерним випромінюванням (Казахський державний університет ім. СМ. Кірова та ін.); гамма-випромінюванням (Ленінградський агрофізичний НДІ, Інститут біологічної фізики АН СРСР, Харківський фізико-технічний інститут та ін.); ультрафіолетовим випромінюванням (УФВ) (Іжевська ДСГА) [3]. За даними Центрального науково-дослідного і проектно-технологічного інституту механізації і електрифікації тваринництва, дія УФВ забезпечує підвищення урожаю зернових культур на 10–12 %, збільшення вмісту протеїну в зеленій масі кукурудзи на 6–10 %, цукрів – на 12–16 %. Ефективність такого методу передпосівної обробки підтверджена перевіркою на насіннєвих дослідних станціях [3, 5].

Відома також ефективність передпосівної обробки насіння електромагнітним полем низької частоти (Тбіліський державний університет); імпульсним концентрованим сонячним світлом (Казахський сільськогосподарський інститут); інфрачервоним випромінюванням (Сибірський НДІ механізації і електрифікації сільського господарства); воднево-плазмовою обробкою (ВНІІ електрифікації сільського господарства); градієнтним магнітним полем (Об'єднаний інститут ядерних досліджень, АФІ) та ін. [3].

На думку С.А. Станка (1997) дія на рослинні об'єкти фізичними чинниками ефективна, оскільки викликає активне утворення супероксидних, гідроксильних і перекисних радикалів, що мають високотоксичний окислювальний стрес [10].

У працях Л.Г. Прищепа проаналізовано можливі моделі електромагнітної взаємодії між біологічними об'єктами, і показано необхідність обліку цієї взаємодії при теоретичних і експериментальних дослідженнях останніх [8].

Таким чином, одним із основних заходів, який сприяє подальшому підвищенню посівних якостей та врожайності продукції рослинництва при комплексній технології вирощування зернових і овочевих культур є передпосівна обробка насіння, що дає можливість реалізувати три основні задачі:

- зниження впливу зовнішньої та внутрішньої фітопатогенної мікрофлори;
- активізація процесів життєдіяльності насіння;
- створення екологічних передумов для захисту рослин у вегетаційний період.

Результати досліджень. На основі обґрунтованого аналізу літератури з застосування передпосівної обробки і стимуляції насіння розроблено класифікаційну структурну схему. Згідно зі схемою передпосівну обробку насіння сільськогосподарських культур проводять хімічними та фізичними методами.

До хімічних методів передпосівної обробки належить протруювання фунгіцидами чи інсектофунгіцидами або дражування насіння. Але разом з досягненням позитивних результатів, використання хімічних методів обробки насіння має ряд негативних наслідків, серед яких забруднення

навколишнього середовища отрутохімікатами і їх накопичення як у ґрунті, так і у продукції рослинництва, трудомісткість при виконанні робіт тощо. [1,4]

Крім цього протруювання насіння негативно впливає на інтенсивність його проростання та продуктивність рослин. Слід зазначити, що рослини, які розвиваються не з протруєного насіння, зазвичай мають більш значну інтенсивність початкового росту, а тому більш стійкі до хвороб у період вегетації [7].

До фізичних методів обробки насіння належать: термічні, фізико-механічні, фотоенергетичні, радіаційні, магнітні та електрофізичні.

Вітчизняні дослідники Г.Б. Іноземцев, О.М. Берека, Н.Н. Нецадим, і зарубіжні А.А. Шахов, В.В. Терещенко, В.В. Фомин та ін. розробили та дослідили велику кількість способів і методик обробки насіння фізичними способами дії з метою активації внутрішньоклітинних процесів, як у насінні, так і безпосередньо у вегетуючих рослинах. Розглянемо основні з них.

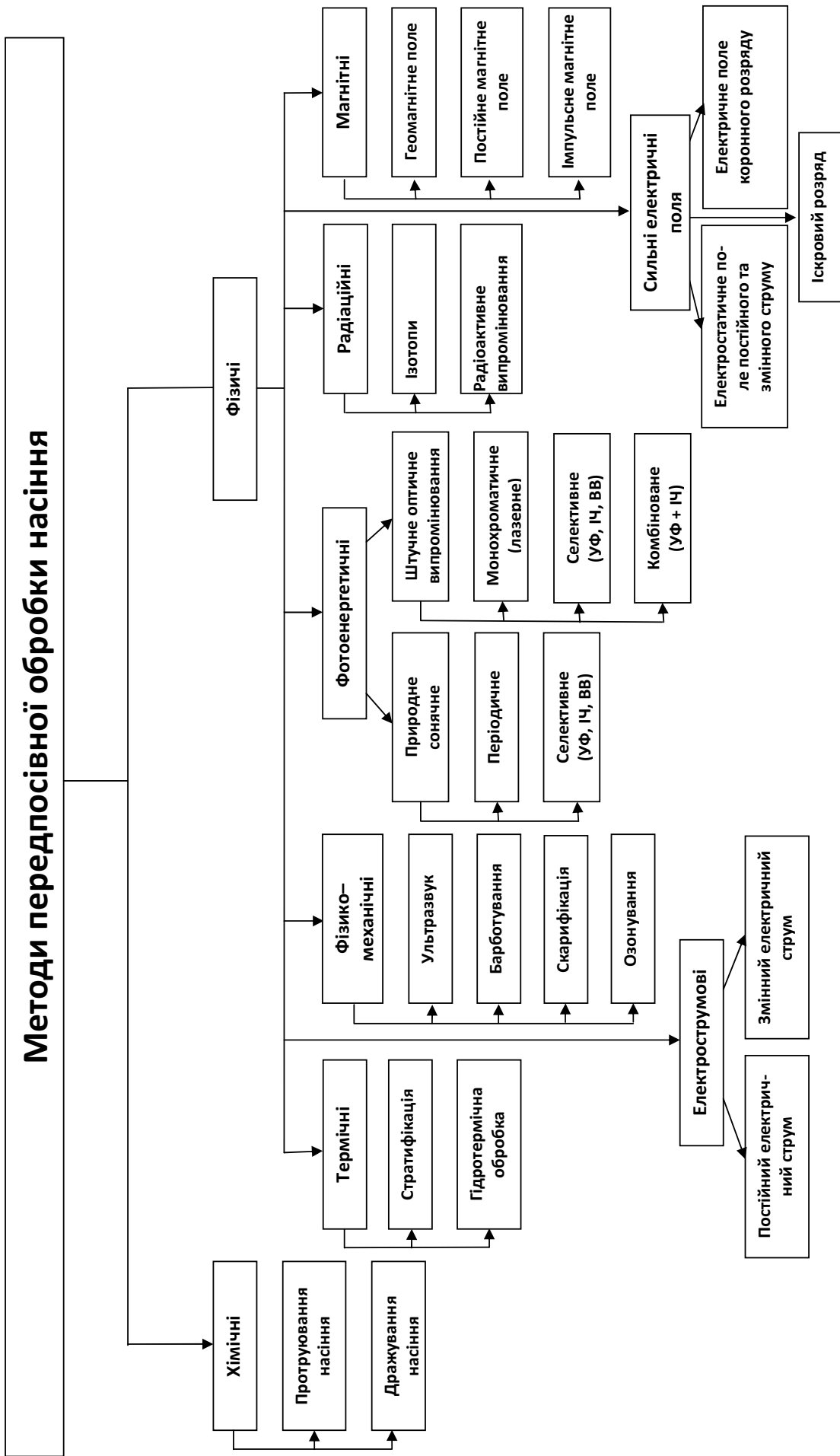
Термічні методи обробки застосовуються до насіння різних сільськогосподарських культур з метою підвищення їх схожості і зниження їх зараженості патогенною мікрофлорою. До цього виду дії належить гідротермічна обробка насіння і стратифікація (витримка насіння при постійній температурі впродовж тривалого періоду)

Термічні методи дії – це тривалі способи обробки насінного матеріалу, що забезпечують збільшення схожості і сили проростання. Завдяки термічній обробці насіння (1–2 год при температурі 70–80 °С) знижується їх зараженість вірусною інфекцією – фімозом, бактеріозом, альтернаріозом.

Обробка підігрітим паром температурою 150 °С також підвищує схожість насіння. Головним недоліком термічного методу дії є тривалість обробки посівного матеріалу (від декількох годин до декількох місяців), а також цей спосіб обробки є дуже енергоємним і багатоступінчастим [7].

Фізико-механічні методи включають зовнішню передпосівну обробку насінного матеріалу методом барботації насіння у водному середовищі повітрям або киснем при нормальній фізіологічній температурі 18–20 °С, підвищується проникність насінної шкірки для подальшого поглинання вологи, призводячи до збільшення схожості (у початковий період). Проте, незважаючи на простоту циклу обробки, цей спосіб дуже тривалий (декілька годин) і важко контрольований – для зниження травматичного ефекту у проростків потрібне своєчасне визначення насіння, що виклювалося, візуальним способом. Особливі вимоги при барботуванні ставлять до устаткування – підвищена надійність, автоматичний контроль, вибухо – та пожежобезпечність (робота з O₂) [6].

Досліди з обробки насіння ультразвуком проводилися рядом дослідників, що відмічали неоднозначність впливу звукових коливань на внутрішньоклітинні процеси, що проходять у насінні [9]. Значна вартість устаткування, джерел ультразвукових коливань не сприяє їх широкому застосуванню.



Структурна схема методів передпосівної обробки насіння

Стратифікація та озонування теж належить до фізико–механічних методів обробки. Першу зазвичай поєднують з "гідравлічним ударом", що призводить до механічного пошкодження насіннєвої оболонки. Озонування ж ефективно знезаражує насіння перед посівом і засновано на використанні бактерицидної дії озону (O_3), що дозволяє зменшувати бактеріологічну зараженість в 2,7 раза і збільшити врожайність на 16,6 % [1,12].

Радіаційні методи опромінення насіння джерелами іонізуючих випромінювань та ізотопами давно проводилися як вітчизняними, так і зарубіжними ученими і дослідниками з метою з'ясування реакції рослин на зовнішню дію і при вивченні метаболічних і фотосинтетичних процесів [4].

Результати досліджень свідчать про незначне зростання врожайності при опроміненні γ – променями насіння і рослин. Конструктивні особливості установок з обробки насіння іонізуючими випромінюваннями та ізотопами не дозволяють широко використовувати їх як устаткування в сільськогосподарському виробництві, оскільки їх експлуатація зв'язана з підвищеним ризиком радіоактивного зараження як об'єкта, що опромінюється, так і обслуговуючого персоналу.

Магнітні методи обробки є дією на насіння і вегетуючі рослини зовнішнім постійним магнітним полем (ПМП) різної напруженості (до 300 Ерстед [12]) з метою підвищення проникності мембран кліткових структур, вплив на мембранний потенціал і прискорення ферментативних реакцій. Величину магнітної індукції в зразках дослідних установок регулюють шляхом зміни робочого проміжку між полюсами постійних магнітів. Насіння, що пройшло обробку в постійному магнітному полі помітно покращує схожість, а вегетуючі рослини – стають життєздатнішими і більш стійкішими до зміни зовнішніх погодних умов [11].

Імпульсні магнітні поля за своєю дією на насіння аналогічні дії постійних магнітних полів, різниця полягає в часі обробки – на порядок нижче [1,12].

Останніми роками з'явилася значна кількість публікацій про використання "живильної" або магнітообробленої води – води, що пройшла обробку в полі постійного магніту. Зволоження посівного матеріалу і поливання вегетуючих рослин магнітоактивованою водою збільшує енергію проростання до 3–8 % і зростання врожайності до 16 %. У зв'язку з тим, що незрозумілим залишається механізм дії, цей метод обробки недостатньо вивчений теоретично, але знайшов практичне застосування в приватному секторі (магнітні насадки, магнітні активатори тощо). У сільськогосподарському виробництві спосіб обробки води і поживних розчинів у постійному магнітному полі не набув масового застосування [11].

Електрострумкові методи обробки – це дія на насіння постійним або змінним електричним струмом.

Результати досліджень показали, що при обробці спостерігався бактерицидний ефект (пригнічення мікроорганізмів), а також підвищення інтенсивності дихання, обміну речовин у насінні, яке проростає. Цей метод не набув широкого застосування, оскільки дуже складно визначити опти-

мальну величину струму, яка позитивно впливає як на насіння, так і на середовище, в якому воно проростає. [12].

При передпосівній обробці насіння в сильних електричних полях головними факторами впливу на насіння є напруженість електричного поля та величина заряду, яку отримує насіння. Результати досліджень показали, що при обробці цим методом підвищуються посівні якості насіння (енергія проростання, схожість), зростає врожайність. Однією з головних причин, яка гальмує впровадження цих методів, є велика розбіжність експериментального матеріалу та недостатньо чітка відтворюваність отриманих результатів, що не дає гарантії найбільшого зростання врожаю [1].

Видатними вченими в області електрифікації сільськогосподарського виробництва Л.Г. Прищепом, І.Ф. Бородіним, Д.С. Стребковим, Н.М. Протасовою, І.І. Свентицьким, А.К. Лямцовим, Ю.М. Жилінським, В.М. Німаном, Г.С. Саричевим, О.А. Тихомировим, А.П. Примаком, В.М. Короповим, В. П. Шарупичем, С. О. Овчуковою, А.П. Коломійцем, Л.К. Алферовою, Н.Ф. Кожевниковою, В.А. Козинським, О.А. Косициним, Р. Mekkel, B. Singh, M. Fischer, J. Bonnet, P. Harris та іншими доведена ефективність застосування оптичного випромінювання для отримання додаткової рослинницької продукції.

Фотоенергетичні методи обробки, з метою стимуляції ростових процесів застосовують як до насіннєвого матеріалу, так і до вегетуючих рослин. Дія імпульсним сфокусованим сонячним випромінюванням на насіння дає зростання урожаю до 11 %, на вегетуючі рослини – збільшення інтенсивності протікання фотосинтетичних процесів. Максимальний приріст урожаю складає до 17,6 % для овочевих культур [5].

Короткочасна і повторно–короткочасна обробка насіння сфокусованим хвильовим ультрафіолетовим випромінюванням дає приріст врожайності зернових культур до 10–15 % [2].

До фотоенергетичних методів також належать і лазерна обробка посівного матеріалу та рослин у період вегетації [9]. Оптичні квантові генератори мають такі переваги як: хороша керованість параметрами світлових хвиль, потужністю випромінювання, широкі межі можливої концентрації енергії (від мВт/см² до мкВт/см²), здатність уповільнювати або прискорювати біохімічні і фізіологічні процеси на клітинному рівні.

Дослідженнями встановлено, що опромінення насіння овочевих культур лазерним випромінюванням малої інтенсивності до 0,4 мВт/см² дозволило збільшити врожайність до 11–12 %), а у зернових культур сприяло збільшенню схожості на 19 %) і енергії проростання на 30–31 %). Обробка рослин може проводитися за принципом сканування фотосинтетично–активної поверхні (насіння, листової пластини, стебла). Головною перевагою цього методу є екологічна чистота обробки. Рослини, що пройшли обробку лазерним випромінюванням, відрізняються підвищеною стійкістю до хвороб, прискореним зростанням, вищою продуктивністю. Створені на базі лазерних установок (з вихідною потужністю в 90–110 мВт) промислові лінії з передпосівної обробки насіння мають продуктив-

ність щодо зернових до 300 – 500 кг/год [2]. Є дані, що при обробці посівного матеріалу насіння огірка ультрафіолетовим та інфрачервоним опроміненням безпосередньо перед посівом зменшує на 70–80 % або зовсім виключає передпосівну обробку хімічними препаратами, що призводить до значної економії матеріальних ресурсів [5].

Висновки

Методи передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур з використанням оптичного випромінювання за даними досліджень є мало енерго– та ресурсозатратними.

Встановлено, що насіння сільськогосподарських культур чутливе до впливу електромагнітного опромінювання, при правильному виборі дози і режиму опромінювання врожайність зернових зростає на 10 % і більше, забезпечуються більш ранні (на 2–3 дні) сходи, густина рослин при цьому підвищується на 5–10 % і відповідно збільшується врожайність.

Застосування комбінованого УФ та ІЧ випромінювання для передпосівної обробки насіння тепличних культур є актуальним екологічно чистим методом підвищення їх врожайності та має науково–практичну перспективу.

Список літератури

1. Берека О.М. Обробка насіння сільськогосподарських культур в сильному електричному полі. / О.М. Берека. – К.: ЦП „КОМПРИНТ”, 2011. – 335 с.
2. Вельский А. И. Магнитно-лазерная технология в растениеводстве / А. И. Вельский, А.Н. Плавинская // Зерновое хозяйство. – 2003. – №1. – С. 10.
3. Владыкин И.Р. Повышение эффективности предпосевной обработки семян овощных культур ультрафиолетовым излучением: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук / И.Р. Владыкин. – М.: РГАЗУ, 1999. – 158 с.
4. Дмитриев И. И. Предпосадочное гамма-облучение семенных клубней и влияние на урожай, товарное качество и пищевую ценность картофеля / И. И. Дмитриев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2002. – №8. – С. 26–28.
5. Дубров А.П. Действие ультрафиолетовой радиации на растения / А.П. Дубров. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 124 с.
6. Никифорова Л.Є. Огляд існуючих способів підвищення врожайності овочевої продукції в захищеному ґрунті / Л.Є. Никифорова. // Вісник Харків. держ. техн. ун-ту. сільськ. госп-ва. «Проблеми енергозбереження в АПК України». – Х.: ХДТУСГ, 2004. – Вип. 27, т. 2. – С. 85–89.
7. Озонова технологія передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур / В.В. Кириченко, В.Г. Діндорого, В.П. Петренкова [та ін.] // Посібник українського хлібороба. – Харків, 2009. – С. 128 – 131.
8. Прищеп Л.Г. Эффективная электрификация защищенного грунта. / Л.Г. Прищеп // М.: Колос, 1980. – 208 с.
9. Савельев В.А. Физические способы обработки семян и эффективность их использования / В.А. Савельев // Сибирский вестник с-х. науки. – 1981. – № 5. – С. 26 – 29.
10. Станко С.А. Световая и гормональная активация растений и мутагенез: автореф. дис. в виде научного доклада на соискание уч. степени доктора биол. наук / С.А. Станко. – М., 1997. – 106 с.

11. Щербаков К.Н. Стимуляция ростовых процессов растений низкоэнергетическим магнитным полем / К.Н. Щербаков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. – №7. – С. 26–29.

12. Ярошенко П.Е. Электрическое и магнитное воздействие при переработке с.-х. продукции / П.Е. Ярошенко, Б.С. Монахов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – №4. – С. 27–28

Систематизированы методы предпосевной обработки семян с целью повышения всхожести и урожайности сельскохозяйственных культур. Определены перспективные методы предпосевной обработки семян.

Предпосевная обработка, семена, посевные качества семян, энергия прорастания семян, всхожесть.

The methods of preseed treatment of seed are systematized with the purpose of increase of germination and productivity of agricultural cultures. The perspective methods of preseed treatment of seed are certain.

Preseed treatment, seed, sowing internalss of seed, energy of germination of seed, germination.

УДК 543.27.08.632.24:631.563.9:631.24

ГАЗОВИЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГНИТТЯ В ОВОЧЕСХОВИЩАХ

***В.В. Бойко, Г.І. Булах, кандидати фізико-математичних наук
Г.І. Подпрятков, кандидат сільськогосподарських наук
С.М. Гунько, кандидат технічних наук***

Наведено результати дослідження щодо розробки спеціального газового детектора, здатного реєструвати леткі органічні сполуки (ЛОС), які виділяються в процесі псування плодоовочевої продукції. Реєстрація за допомогою розробленого приладу сумарної концентрації цих речовини дозволяє визначити початкову стадію процесів гниття і на основі цієї інформації приймати рішення про необхідність проведення сортування продукції, яка зберігається, з метою видалення інфікованої (гнилої), що буде сприяти скороченню втрат під час зберігання.

Плодоовочева продукція, газовий детектор, леткі органічні сполуки, маркери гниття.

Картопля – один із основних продуктів харчування. За кількістю поживних речовин, що можна одержати з одиниці площі, серед сільськогосподарських культур картопля займає одне з перших місць. Поживних речовин з гектара вона дає в 2–4 рази більше, ніж жито або ячмінь, і поступається лише перед цукровими буряками і кукурудзою. Бульби в

11. Щербаков К.Н. Стимуляция ростовых процессов растений низкоэнергетическим магнитным полем / К.Н. Щербаков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. – №7. – С. 26–29.

12. Ярошенко П.Е. Электрическое и магнитное воздействие при переработке с.-х. продукции / П.Е. Ярошенко, Б.С. Монахов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – №4. – С. 27–28

Систематизированы методы предпосевной обработки семян с целью повышения всхожести и урожайности сельскохозяйственных культур. Определены перспективные методы предпосевной обработки семян.

Предпосевная обработка, семена, посевные качества семян, энергия прорастания семян, всхожесть.

The methods of preseed treatment of seed are systematized with the purpose of increase of germination and productivity of agricultural cultures. The perspective methods of preseed treatment of seed are certain.

Preseed treatment, seed, sowing internalss of seed, energy of germination of seed, germination.

УДК 543.27.08.632.24:631.563.9:631.24

ГАЗОВИЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГНИТТЯ В ОВОЧЕСХОВИЩАХ

**В.В. Бойко, Г.І. Булах, кандидати фізико-математичних наук
Г.І. Подпрятков, кандидат сільськогосподарських наук
С.М. Гунько, кандидат технічних наук**

Наведено результати дослідження щодо розробки спеціального газового детектора, здатного реєструвати леткі органічні сполуки (ЛОС), які виділяються в процесі псування плодоовочевої продукції. Реєстрація за допомогою розробленого приладу сумарної концентрації цих речовини дозволяє визначити початкову стадію процесів гниття і на основі цієї інформації приймати рішення про необхідність проведення сортування продукції, яка зберігається, з метою видалення інфікованої (гнилої), що буде сприяти скороченню втрат під час зберігання.

Плодоовочева продукція, газовий детектор, леткі органічні сполуки, маркери гниття.

Картопля – один із основних продуктів харчування. За кількістю поживних речовин, що можна одержати з одиниці площі, серед сільськогосподарських культур картопля займає одне з перших місць. Поживних речовин з гектара вона дає в 2–4 рази більше, ніж жито або ячмінь, і поступається лише перед цукровими буряками і кукурудзою. Бульби в

середньому містять 75 – 80 % води і до 25 % сухих речовин. Крохмалю в бульбах міститься від 14 до 25 %, а в окремих сортів – до 30 %, а сирого протеїну в середньому до 2 %. Цінність картоплі визначається високими смаковими якість та сприятливим для організму людини хімічним складом. Особливе значення має білок картоплі, який ціниться значно вище білка інших сільськогосподарських культур.

Велика кількість бульб картоплі закладається на зберігання для реалізації та переробки. Основною проблемою під час зберігання є досить значні втрати бульб картоплі, які в окремі роки становлять до 20–30 %.

Одним із шляхів запобігання втрат врожаю при зберіганні картоплі, окрім профілактичних заходів, можна вважати виявлення процесів гниття на ранніх стадіях та знешкодження їх осередків. Пошук засобів виявлення та локалізації початкових стадій псування сільськогосподарської продукції триває багато років, як за кордоном, так і в Україні.

Одним із способів вирішення цього питання став аналіз проб повітря, викачаного із товщі плодоовочевої продукції через спеціальну газовідбірну трубку. Аналіз відібраної проби летких компонентів життєдіяльності плодоовочевої продукції проводять шляхом визначення кількості етилену, що виділився і за результатами цього аналізу здійснюють оцінку придатності продукції до тривалого зберігання [Патент РФ, №2143682, МПК G 01 N 33/02, A 01 F 25/00, опубл. 27.12.1999, «Способ определения пригодности плодов, коренеплодов и картофеля к длительному хранению»].

Іншим перспективним засобом є контроль газового середовища в місцях зберігання плодоовочевої продукції за допомогою газоаналізуючих приладів. Відомо, що основною причиною псування, наприклад картоплі, є зараження такими гнилісними бактеріями, як *Erwinia carotovora*, *Bacillus polymyxa*, *Arthrobacter* sp., грибами *Phytophthora infestans*, *Fusarium coeruleum* та ін. Високочутливими та коштовними методами газової хроматографії та мас-спектрометрії встановлено, що в процесі життєдіяльності цих шкідливих мікроорганізмів виділяється більше сотні різних летких органічних сполук (ЛОС) [1–2]. Зокрема у випадку зараження бактеріями *Erwinia carotovora* реєструються десятки різних летких сполук із складу алканів (парафіни), алкенів (олефіни), альдегідів, сульфідів, кетонів, спиртів тощо. Найбільш інтенсивними і характерними сполуками є етанол, метанол, ацетон та бутан-1-ol, котрі можуть слугувати маркерами процесів гниття вже на початковій стадії [3]. Однак методи та прилади контролю газового середовища, що застосовуються у наукових дослідженнях, зовсім не прийнятні для практичного застосування в овочесховищах завдяки великій вартості обладнання, тривалості проведення вимірювань, потребі у висококваліфікованому персоналі і тому довгий час не виходили за межі лабораторій.

Потужний розвиток технології газових сенсорів, що відбувся наприкінці 20-го сторіччя, призвів до суттєвого покращення чутливості, економічності, стабільності характеристик та зменшенню габаритів газочутливих сенсорів [4]. Освоєння масового виробництва таких сенсорів

спричинило їхню широку доступність та сприяло суттєвому зниженню вартості до рівня декількох десятків, а зараз і до одиниць доларів США. Тому в останні роки в Великій Британії, Канаді та США почались розробки технічних засобів контролю газового середовища в сховищах, що використовують сучасні газові сенсори. Застосування таких недорогих приладів обіцяє суттєвий економічний ефект та підвищення якості продукції, що споживається населенням. Наприклад, у Великій Британії щорічний економічний ефект від впровадження таких засобів при зберіганні тільки картоплі оцінюється в межах 5,7 млн. фунтів стерлінгів.

Мета досліджень – розробка спеціалізованого газового детектора для виявлення процесів гниття в овочесховищах. Тому, цей напрям наукових досліджень є актуальним та перспективним.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження проводилися на кафедрах фізики та технології зберігання, переробки та стандартизації продукції рослинництва ім. проф. Б.В. Лесика НУБіП України.

Дослідження газового детектора для виявлення процесів гниття в овочесховищах проводили із використанням спеціального скляного боксу.

Бокс виготовлений із прозорого органічного скла завтовшки 6 мм, має верхню кришку з ущільнювачем, що затягується гайками, циліндричну бокову шлюзову камеру, яка закривається ущільненою кришкою з притискним механізмом для швидкого відкривання-закривання, декілька гвинтових пробок для введення проб ззовні. Для введення сигнального кабелю та дротів живлення приладу в кришці шлюзової камери була вмонтована кабельна муфта з ущільнюючим сальником. Всередині камери при випробуваннях розміщувались газовий детектор, поліетиленовий сітчастий ящик для продукції. Вихідний сигнал з газового сенсора детектора подавався на аналоговий вхід записуючого пристрою. Він забезпечує автономний запис у внутрішню пам'ять аналогового сигналу в діапазоні 0 – 2 В із періодичністю від 1 хв. до 255 хв.

Результати досліджень. У Національному університеті біоресурсів та природокористування України розробка газового детектора для виявлення процесів гниття в овочесховищах розпочалась декілька років тому [5].

Результатом цієї роботи став експериментальний газовий детектор (рис. 1). На рис. 2 наведено принципову схему будови приладу.



Рис. 1. Загальний вигляд газового детектора для виявлення процесів гниття в овочесховищах

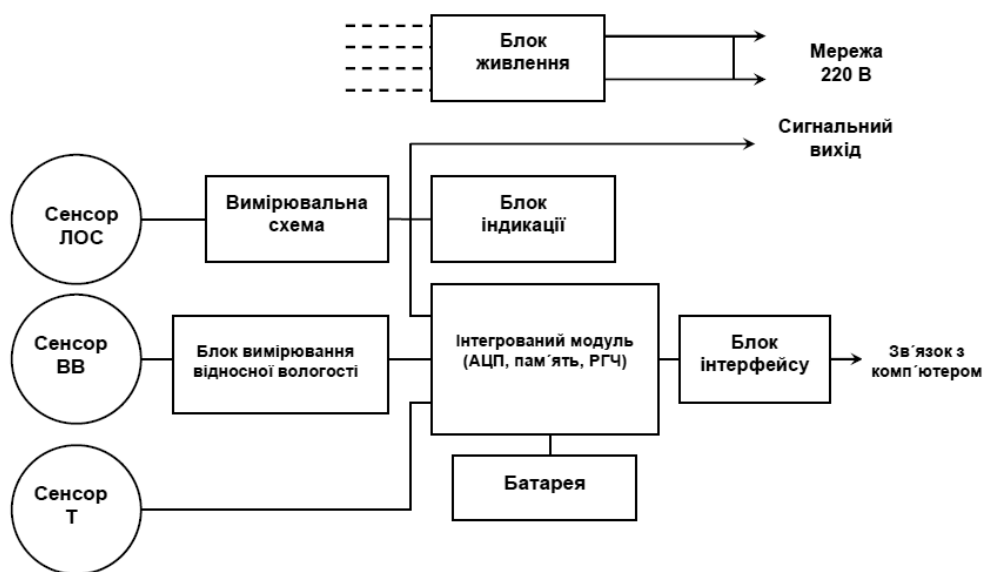


Рис. 2. Принципова схема будови газового детектора для виявлення процесів гниття в овочесховищах:

АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ВВ – відносна вологість; РГЧ – годинник реального часу; ЛОС – леткі органічні сполуки; Т – температура

Основним елементом приладу (рис. 2) є напівпровідниковий газовий сенсор на основі оксиду метала з підігрівом, який чутливий до концентрації ЛОС у широкому діапазоні речовин (у тому числі ЛОС, які є специфічними речовинами що виділяються при гнитті плодоовочевої продукції). Сенсор з'єднаний із вимірювальною схемою, яка нормує та обробляє сигнал від нього і видає його на зовнішній роз'єм для контролю. Блок індикації забезпечує можливість встановлення порогового рівня сигналу із сенсора та вмикає індикацію (сигналізацію) при перевищенні цього порогу. Індикатором сигналізації є світлодіод червоного кольору, вмикання якого і сигналізує про перевищення порогового значення концентрації ЛОС. Детектор обладнано сенсором відносної вологості та електронним блоком, що забезпечує його роботу та обробку сигналу, і сенсором температури.

Для реєстрації результатів вимірювання детектор обладнано інтегрованим модулем аналого-цифрового перетворення та запису у внутрішню пам'ять одночасно трьох оцифрованих сигналів із сенсорів впродовж тривалого часу, відлік якого забезпечує внутрішній годинник реального часу. Блок інтерфейсу призначений для приєднання зовнішнього комп'ютера для зчитування даних з пам'яті детектора та програмування режимів його роботи. Мережевий блок живлення детектора забезпечує всі його схеми стабілізованою напругою. Крім того, пам'ять та годинник реального часу мають окрему батарею для роботи та збереження даних при зникненні мережевої напруги. Встановлений у сховищі прилад реєструє леткі органічні сполуки, що виділяються при гнитті продукції. При цьому, величина вихідного сигналу приладу свідчить про величину

концентрації летких сполук в атмосфері сховища і таким чином може бути кількісним мірилом розвитку процесу гниття.

При використанні детектора в овочесховищі реєструється сумарна концентрація ЛОС, які є маркерами процесів гниття, що дозволяє робити певні висновки про глибину розвитку процесів гниття продукції під час зберігання. Одночасне фіксування концентрації ЛОС та показників атмосфери сховища (температури та відносної вологості повітря) дозволяє із більшою точністю оцінити ступінь загрози псування плодоовочевої продукції, оскільки коливання температури та вологості повітря можуть помітно змінювати величину вихідного сигналу приладу і таким чином впливати на достовірність його показів. Якщо зростання вихідного сигналу приладу збіглося в часі із зміною кліматичних показників у сховищі (температура, вологість), то потрібно зробити висновок, що це спрацювання сигналізації приладу є хибним. Наявність у приладу власної пам'яті, в якій фіксуються результати вимірювань, дає змогу документально підтверджувати значення параметрів режиму протягом зберігання.

Випробування роботи приладу в лабораторних умовах у герметичному боксі показали його високу здатність до розпізнання здорової та інфікованої (гнилої) продукції, зокрема бульб картоплі (рис. 3). Сигнал приладу від інфікованої бульби більш ніж у 8 разів перевищив сигнал від здорової, що засвідчило його високу чутливість до ЛОС, які виділяються в процесі гниття.

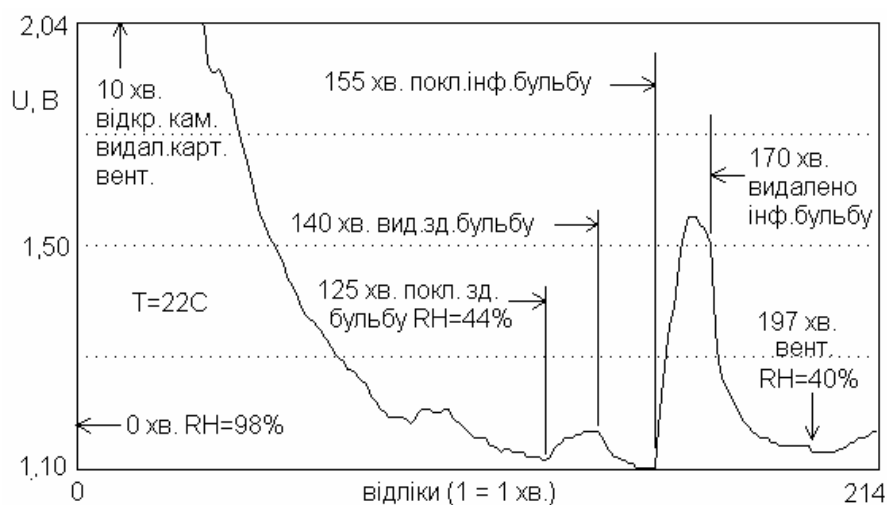


Рис. 3. Динаміка сигналу газового сенсора із детектора при його випробуванні в герметичному боксі в присутності здорових та інфікованих бульб картоплі

Висновки

1. Розроблено газовий детектор для виявлення процесів гниття в овочесховищах.
2. Випробування роботи детектора в лабораторних умовах у герметичному боксі показали його високу здатність до розпізнання здорової та інфікованої (гнилої) продукції

Список літератури

1. Перспективи застосування сучасних газових сенсорів в технології зберігання сільськогосподарської продукції / В.В.Бойко, Г.І.Булах, Г.І. Подпряттов, С.М.Гунько. // Науковий вісник НАУ. – 2007. – №105. – С. 237– 341.
2. Varns J. L., Glynn V. Detection of disease in stored potatoes by volatile monitoring. American Potato Journal. 56, 1979, 185-197.
3. Waterer D.R., Pritchard M.K. Monitoring of volatiles: A technique for detection of soft rot (*Erwinia carotovora*) in potato tubers. Canadian Journal of Plant Pathology. 6, 1984, 165-171.
4. de Lacy Costello B. P. J., Evans P., Ewen R. J., Gunson H. E., Ratcliffe N., Spencer-Phillips M. P. T. N. Identification of volatiles generated by potato tubers (*Solanum tuberosum* CV:Maris Piper) infected by *Erwinia carotovora*, *Bacillus polymyxa* and *Arthrobacter* sp. Plant Pathology. 48, 1999, 345-351.
5. Fine G.F., Cavandagh L.M., Afonja A., Binions R. Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors in Environmental Monitoring. Sensors. 10, 2010, 5469-5502.

Представлены результаты исследований по разработке специального газового детектора, способного регистрировать летучие органические соединения (ЛОС), которые выделяются в процессе порчи плодоовощной продукции. Регистрация с помощью разработанного прибора суммарной концентрации этих веществ позволяет определить начальную стадию процессов гниения и на основе этой информации принять решение о необходимости проведения сортировки сберегаемой продукции с целью удаления инфицированной (гнилой), что способствует сокращению потерь во время сберегания.

Плодоовощная продукция, газовый детектор, летучие органические соединения, маркеры гниения.

The results of researches are presented on development of the special gas detector, able to register volatile organic compounds (LOS) which are produced in the process of spoilage of fruit and vegetable products. Registration by the developed device of total concentration of these substances allows to define the initial stage of rotting processes and on the basis of this information to make decision about the necessity of product sorting with the purpose of remove of infected (rotten) one, that is instrumental in reduction of losses during the storage.

Vegetable products, gas detector, volatile organic compounds, markers of decay.

ГЕОПРОСТОРОВА СКЛАДОВА ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ СИСТЕМИ У ГАЛУЗІ РОСЛИННИЦТВА

О.М. Ткаченко, кандидат технічних наук

Розглянуто можливості модуля геопросторових даних інформаційної системи підтримки прийняття рішень у галузі рослинництва.

Інформаційна система, геопросторові дані, прийняття рішень, управління, база, дані.

Останні роки засвідчили значне зростання популярності сервісів на основі ГІС-технологій [4], зокрема в системах моніторингу інфраструктури та природних ресурсів. Доступність джерел якісних (для широкого класу задач) космічних знімків (наприклад, серії "Січ" чи "Landsat") дозволяє розширити перелік задач, які їх використовують, та впроваджувати нові методи їх автоматизованої обробки. Зрозуміло, це знайшло своє відображення в сучасних інформаційних системах, орієнтованих на використання у сільському господарстві.

У загальному випадку виділяють шість базових модулів, що реалізують функції ГІС [2]:

- 1) введення і верифікації даних;
- 2) зберігання і маніпулювання даними;
- 3) перетворення систем координат і трансформації картографічних проєкцій;
- 4) аналізу і моделювання;
- 5) виведення і подання даних;
- 6) взаємодії з користувачем

Оскільки основним видом даних у геоінформаційних системах (ГІС) є просторово-розподілена інформація, то програмне забезпечення ГІС є досить специфічним. Реалізація зазначених функцій вимагає розробки спеціалізованого програмного забезпечення. Будь-яка ГІС працює з даними двох типів – просторовими та атрибутивними. Для їх ведення програмне забезпечення повинно включати систему управління базами обох типів даних, модулі управління введенням і виведенням, систему візуалізації та модулі для виконання просторового аналізу.

Нині на ринку є ряд виробників програмного забезпечення ГІС-спрямування або з подібними підсистемами: "ГІС Панорама", "Digitals", "IDRISI", "ERDAS", "ENVI", "ArcGIS", "Гіс 6", "AgroClever". Кожен з пакетів відрізняється функціональністю та позиціонуванням (призначенням). Типовим недоліком існуючих системи, з точки зору використання в рослинництві, є, з одного боку, надлишковість саме ГІС-складової для задач управління агротехнологічними операціями, з іншого – відсутність доста-

тньої для агровиробництва функціональності та інтеграції з ERP-системами, уже встановленими в господарствах. Картина доповнюється високою ціною таких програмних пакетів, що є важливим для аграрної сфери.

Інформаційно-аналітична система "AgroMine" для управління сільськогосподарським підприємством у галузі рослинництва, розглянута в [3], містить модуль геопросторової прив'язки, інтегрований з іншими модулями системи.

Мета досліджень – огляд можливостей та перспектив використання модуля геопросторової прив'язки в інформаційно-аналітичній системі підтримки прийняття рішень "AgroMine" для сільгосппідприємства в галузі рослинництва.

Матеріали та методика досліджень. Розробка системи ґрунтується на використанні прийнятих стандартів проектування і розробки ПЗ (ДСТУ ISO/IEC 15288:2005 "Інформаційні технології. Процеси життєвого циклу системи", ДСТУ 3149-95 "Система стандартів з баз даних. Мова баз даних SQL з розширенням цілісності", ДСТУ 4302:2004 "Інформаційні технології. Настанови щодо документування комп'ютерних програм", ДСТУ ISO/IEC 12119-2003 "Інформаційні технології. Пакети програм. Тестування і вимоги до якості", ДСТУ ISO/IEC 14764-2002 "Інформаційні технології. Супроводження програмного забезпечення" тощо). Технологічною програмною платформою розробки модуля геопросторових даних є платформа "K-Mine" [1].

Модуль було апробовано на космічному знімку високої роздільної здатності району полів відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України "Агрономічна дослідна станція" в с. Пшеничне Васильківського району Київської області (рис.1).

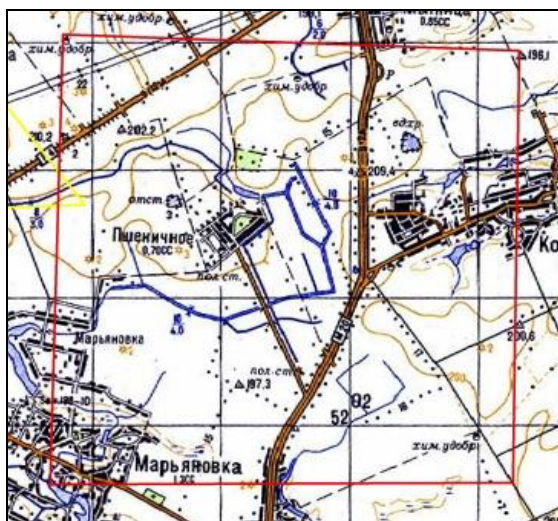


Рис. 1. Космічний знімок високої роздільної здатності (с. Пшеничне)

Специфікації знімку наведено в таблиці.

Специфікація космічного знімка для апробації модуля геопросторових даних інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття рішень у галузі рослинництва "AgroMine"

Космічний апарат	GeoEYE-1 (GeoEye Inc., США)
Номери кадрів	2010090409090181603031600472_003
Тип замовлення	Стандартне, архівні дані
Дата зйомки	04 вересня 2010 року
Хмарність	7%
Кут відхилення від надиру	14°
Продукт	Standard Ortho Ready Bundle (PAN+MSI)
Радіометричне розрізнення	16 біт/піксель
Формат даних	GeoTIFF, точність прив'язки – 6.5 м CE90 без опорних точок
Територія зйомки	с.Пшеничне, Васильківський район
Площа зйомки	49 км ²
Проекція, еліпсоїд	UTM, WGS84, Zone 36, North

Результати досліджень. ГІС-модуль програмної системи дозволяє здійснювати геопросторову прив'язку атрибутивних даних про поля, пасовища та інші угіддя господарства. Структурно цей модуль є окремим додатковим компонентом програмної системи, що розширює її функціональність. До основних задач модуля входять:

- побудова карт контурів полів, у т.ч. з можливістю використання GPS-навігаційних пристроїв;
- побудова рельєфних карт на основі фотознімків;
- побудова карт господарства з розділенням угідь за призначенням, типом засіяної культури тощо;
- кольорове розділення ділянок за вмістом речовин та іншими агротехнологічними характеристиками;
- побудова об'ємних проекційних зображень із розміщеними в просторі об'єктами господарства;
- накладання векторних картографічних об'єктів на растрові зображення, у т.ч. отримані після обробки космічних знімків;
- побудова ґрунтово-агрохімічних карт;
- побудова карт диференційованого внесення добрив, засобів захисту тощо.

Геопросторова прив'язка використовується також у блоці "Господарство" програмної системи при веденні реєстру полів.

Для більш точного ведення атрибутивних показників полів необхідні періодичні наземні вимірювання.

При веденні реєстру полів господарства передбачено опис контурів полів (рис.2).

[illegible]

Рис. 3. Зв'язок атрибутивних і геопросторових даних

Модуль дозволяє автоматично будувати модель рельєфу за даними зйомки, контури полів, у т.ч. на основі використання GPS-навігації (рис. 4).

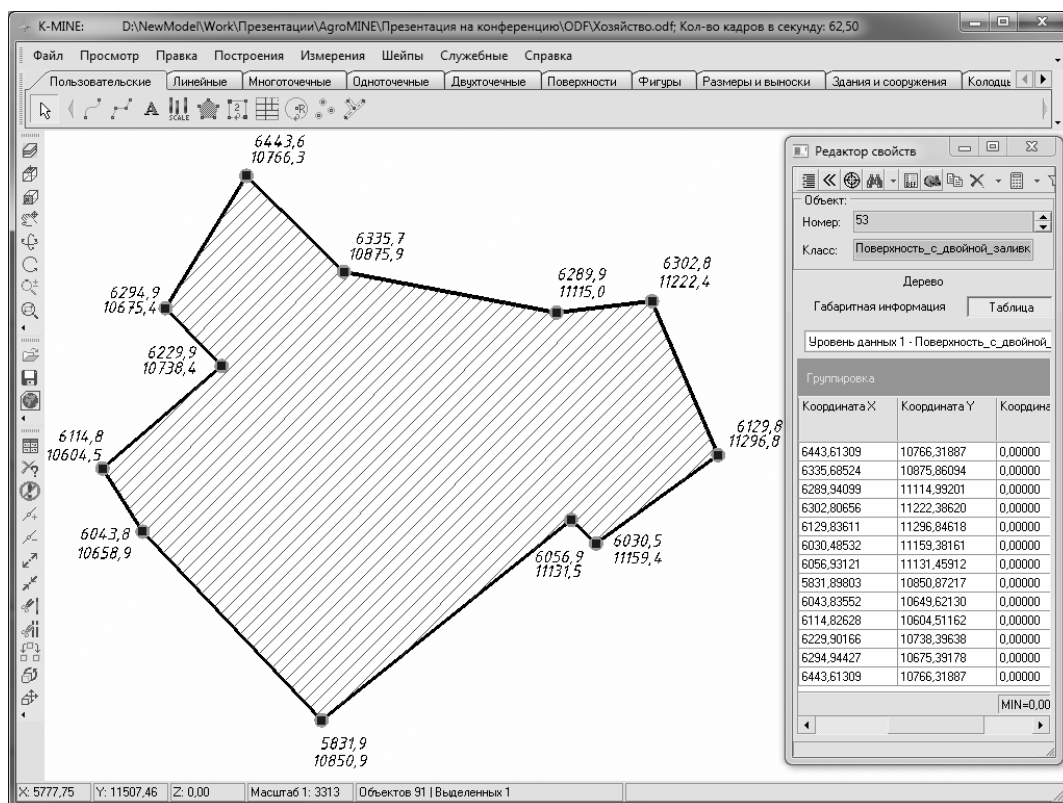


Рис. 4. Побудова контурів поля за допомогою GPS-навігатора

Реалізовано можливість асоціації окремих ділянок з відповідним типом угідь: поля, пасовиська, водні угіддя, лісосмуги тощо (рис. 5)

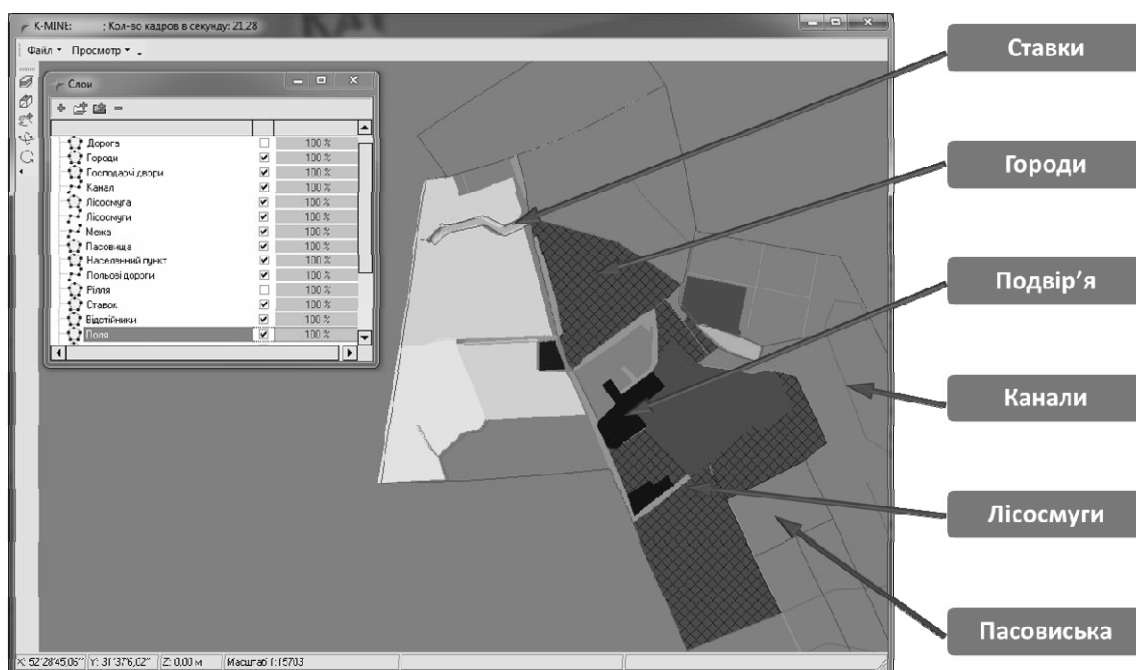


Рис.5. Кольорове розділення ділянок за типом

Для кожної ділянки існує можливість ведення сукупності її якісних і кількісних характеристик (характеристики ґрунту, площа тощо, рис. 6).

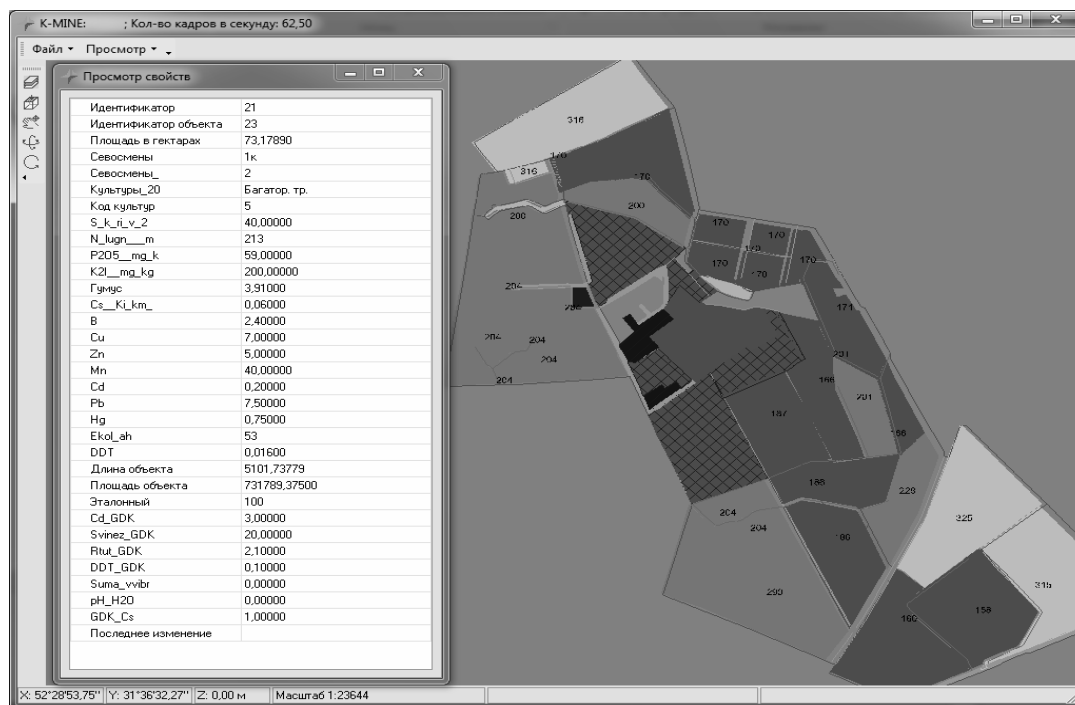


Рис. 6. Характеристики ділянок на карті

Реалізовано генерування карт на основі атрибутивних показників ґрунту (даних питомої електропровідності, аналізу проб ґрунту) для формування задач оптимального використання ресурсів (добрив, режиму сівозміни тощо) при здійсненні агротехнологічних операцій (рис. 7, 8).

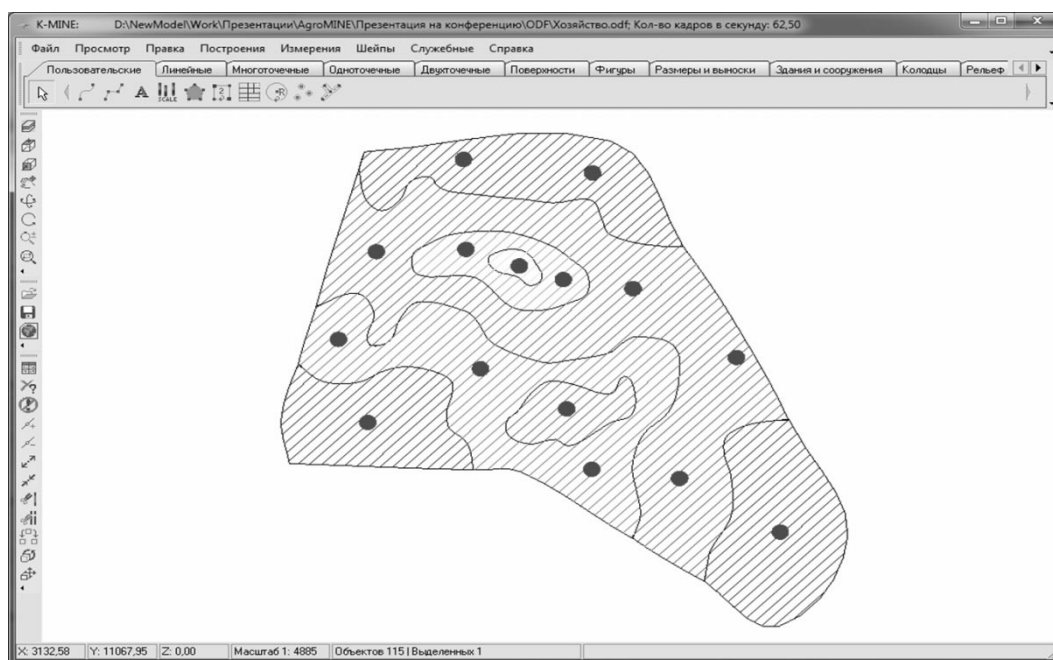


Рис. 7. Карта на основі відбору проб ґрунту

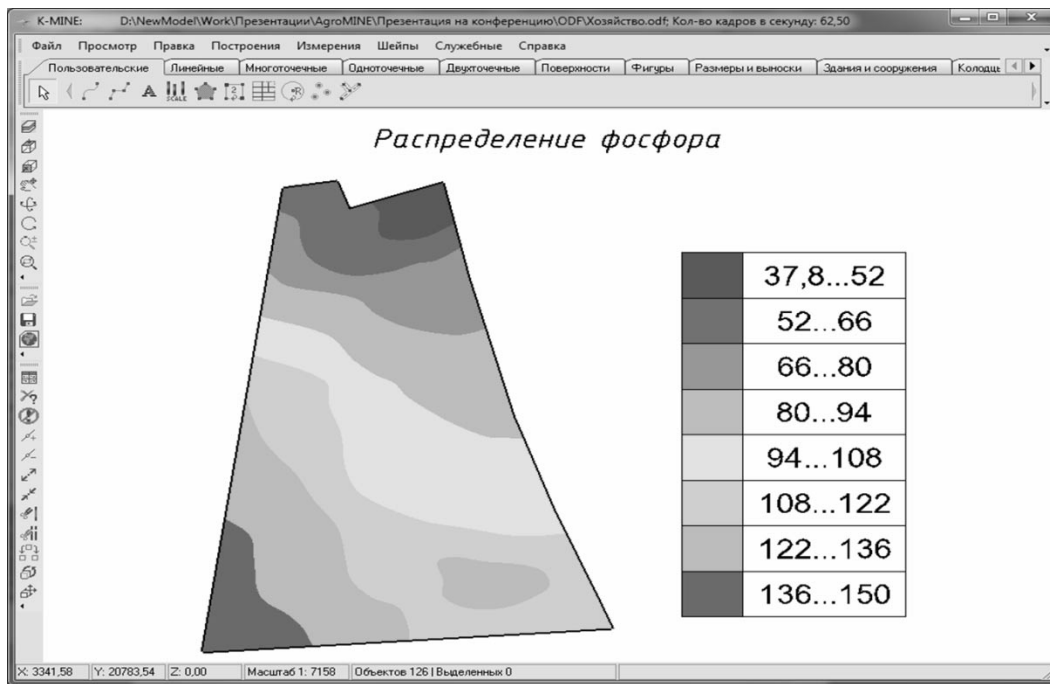


Рис.8. Приклад ґрунтово-агрохімічної карти

На основі даних дистанційного зондування Землі та наземних вимірювань модуль дозволяє визначати окремі області на карті з параметрами, відмінними від сусідніх областей, будувати карти диференційованого внесення добрив (рис. 9) та ін.

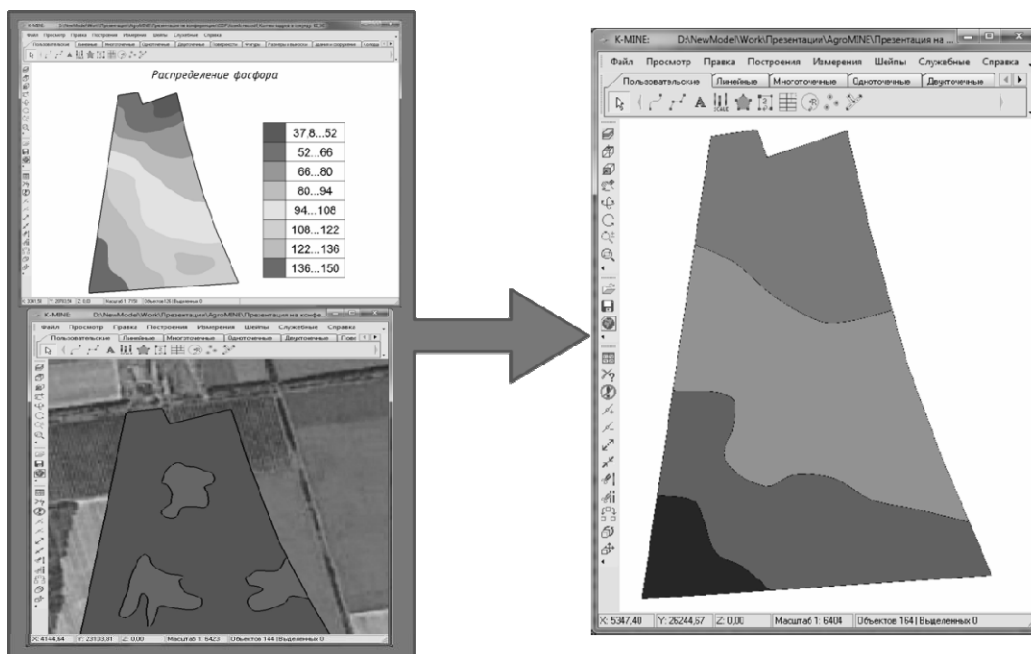


Рис. 9. Карта для диференційованого внесення добрив

Висновки

ГІС-модуль інформаційно-аналітичної системи "AgroMine" для виробників у галузі рослинництва є ефективним розширенням базової системи. Його функціональність є достатньою і збалансованою стосовно практичних потреб підприємства. Основними функціями модуля є робота з векторними картами різного призначення, обробка і накладання растрових знімків, можливість використання GPS-навігаційних пристроїв, побудова карт для диференційованого обробітку ґрунту тощо.

Використання цього модуля дозволить забезпечити більш ефективний моніторинг та використання наявних ресурсів господарства. Гнучкість системи дозволяє також розглядати її як автоматизовану платформу випробування нових наукових підходів до здійснення агротехнологічних операцій, а також як програмну базу для запровадження точного землеробства у господарстві.

Список літератури

1. Геоінформаційна система (ГІС) K-MINE [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ua.kai.com.ua/rozrobki/gis-k-mine>.
2. Світличний О.О. Основи геоінформатики: навч. посіб. / О.О. Світличний, С.В. Плотницький, за заг. ред. О.О. Світличного. – Суми: ВТД "Університетська книга", 2006. – 295 с.
3. Ткаченко О.М. Інформаційно-аналітична система підтримки прийняття рішень у галузі рослинництва // Науковий вісник НУБіП України. Серія "Техніка та енергетика АПК". – 2012. – Вип.174, ч.2. – С. 86–93.
4. Шипулін В.Д. Основні принципи геоінформаційних систем: навч. Посібник / В.Д. Шипулін. – Х.: ХНАМГ, 2010. – 313 с.

Рассмотрены возможности модуля геопространственных данных информационной системы поддержки принятия решений в растениеводстве.

Информационная система, геопространственные данные, принятие решений, управление, база, данные.

The opportunities of geo-spatial module of decision support information system for crop are considered.

Information system, geo-spatial data, decisions, management, database, data.

ПОБУДОВА СХОВИЩА ДАНИХ ДЛЯ ПІДСИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПРОМИСЛОВОГО ПТАШНИКА

***Б.Л. Голуб, кандидат технічних наук
В.Л. Щербатюк, асистент***

Запропоновано методи і засоби створення структури сховища даних, яке дозволяє інтегрувати раніше роз'єднані деталізовані дані, що містяться в різних традиційних OLTP-системах, архівах, які надходять із зовнішніх джерел в єдину базу даних, здійснюючи їх попереднє узгодження і, можливо, агрегацію. Відповідні дані можуть бути використані в автоматизованій системі управління параметрами ефективності роботи промислового пташника для прийняття рішення щодо оптимальної стратегії управління, а також для аналізу та статистичної обробки отриманих даних.

Сховище даних, система OLTP, система підтримки прийняття рішень, автоматизована система управління, промисловий пташник, OLAP технологія.

В останні роки тенденція переходу аграрної галузі від дрібних і середніх до великих високопродуктивних промислових підприємств посилюється все більше. Це супроводжується ускладненням взаємопов'язаних комплексів технологічних, економічних, біологічних і соціальних факторів. В умовах глобалізації ринків виробник аграрної продукції має працювати високорентабельно, а це можливо лише за умови виробництва конкурентоспроможної продукції, що і викликає необхідність підвищення рівнів автоматизації основних процесів, контролю та обліку всіх параметрів виробництва, створення умов для прийняття правильних стратегічних рішень адміністрацією аграрного підприємства. Одночасно з цим сучасний рівень можливостей комп'ютерних технологій дозволяє реалізовувати потужні автоматизовані системи, що можуть використовуватися на всіх ланках життєвого циклу господарства. На основі цих систем будують аналітичні середовища, що спроможні «підказати» керівникові напрям розвитку підприємства, який дозволить досягти зростання продуктивності.

Птахівництво належить до однієї з важливих і перспективних галузей сільського господарства. На більшості сучасних птахівничих підприємств застосовується автоматизація на різних ділянках виробництва продукції. Сутність проблемної ситуації полягає в тому, що виробник не

має можливості проведення комплексного безперервного аналізу стану параметрів ефективності роботи пташника.

Донині в багатьох промислових пташниках накопичені значні обсяги даних, на основі яких є можливість вирішення різноманітних аналітичних і управлінських завдань. З іншого боку, проблеми збереження та обробки аналітичної інформації стають все більш актуальними і привертають увагу фахівців і організацій, які працюють в області інформаційних технологій, що призвело до формування повноцінного ринку технологій бізнес-аналізу.

Мета досліджень – розробка методів і засобів створення структури сховища даних, яке б дозволило інтегрувати раніше роз'єднані деталізовані дані, що містяться в різних традиційних OLTP-системах, архівах, що надходять із зовнішніх джерел в єдину базу даних, здійснюючи їх попереднє узгодження і, можливо, агрегацію.

Матеріали та методика досліджень. В ідеалі робота аналітиків і керівників різних рівнів повинна бути організована так, щоб вони могли мати доступ до всієї потрібної їм інформації і користуватися зручними і простими засобами подання та роботи з цією інформацією. Саме на досягнення цих цілей і спрямовані інформаційні технології, які об'єднуються під загальною назвою сховищ даних і бізнес-аналізу [1].

Результати досліджень. На основі Microsoft SQL Server Management Studio як інструментального середовища для створення оперативних баз даних та сховищ даних та Microsoft SQL Server Business Intelligence Development Studio як засобу для побудови системи аналізу подано структуру OLAP-куба, яка містить одну таблицю фактів та шість таблиць вимірів. Така структура дозволяє отримувати відповіді на запити керівництва щодо ефективності роботи як окремого підрозділу, так і підприємства в цілому.

Відповідно до прийнятого визначення [6] бізнес-аналіз (BI, Business Intelligence) – це категорія програм і технологій для збору, збереження, аналізу та публікації даних, що дозволяє корпоративним користувачам приймати кращі рішення. У російськомовній та україномовній термінологіях подібні системи називаються також системами підтримки прийняття рішень (СППР).

Збір і збереження інформації, а також рішення задач інформаційно-пошукового запиту ефективно реалізуються засобами систем управління базами даних (СУБД). В OLTP (Online Transaction Processing) – підсистемах реалізується транзакційна обробка даних. Безпосередньо OLTP-системи непридатні для повноцінного аналізу інформації через суперечливість вимог, що ставляться до OLTP-систем та СППР.

Для надання необхідної для прийняття рішень інформації зазвичай доводиться збирати дані з кількох транзакційних баз даних різної структури та змісту. Наприклад, інформація, що накопичується безпосередньо в одному із пташників, може бути подана у вигляді реляційної бази даних на SQL Server. У той же час, у бухгалтерії промислового пташника інформація, яка необхідна для аналізу, наведена, як правило, в 1С. Основна

проблема при цьому полягає в неузгодженості і суперечливості цих баз-джерел, відсутності єдиного логічного погляду на корпоративні дані.

Тому, для об'єднання в одній системі OLTP та СППР для реалізації підсистеми зберігання використовуються концепція сховищ даних (СД). В основі концепції лежить ідея розділення даних на такі, що використовуються для оперативної обробки, і такі, що використовуються для вирішення задач аналізу. Це і дозволяє оптимізувати структури зберігання. СД дозволяє інтегрувати раніше роз'єднані деталізовані дані, що містяться в різних традиційних OLTP-системах, архівах, надходять із зовнішніх джерел, в єдину базу даних, здійснюючи їх попереднє узгодження і, можливо, агрегацію.

Таким чином, підсистема аналізу може бути побудована на основі:

- 1) підсистеми інформаційно-пошукового аналізу на базі реляційних СУБД і статичних запитів з використанням мови SQL;
- 2) підсистеми оперативного аналізу; для реалізації таких підсистем застосовується технологія оперативної аналітичної обробки даних OLAP, що використовує концепцію багатовимірного подання даних;
- 3) підсистеми інтелектуального аналізу, що реалізують методи і алгоритми Data Mining.

На рис. 1 зображено архітектуру системи аналізу.



Рис. 1. Архітектура системи аналізу

Крім можливості працювати з єдиним джерелом інформації, керівники та аналітики повинні мати зручні засоби візуалізації даних, агрегування, пошуку тенденцій, прогнозування. Незважаючи на різноманіття аналітичної діяльності, можна виділити типові технології аналізу даних, кожній з яких відповідає певний набір інструментальних засобів. Разом зі сховищем даних ці засоби забезпечують повне рішення для автоматизації аналітичної діяльності та створення корпоративної інформаційно-аналітичної системи.

Сховище даних – це основа OLAP (Online Analytical Processing) – технології, яка в свою чергу, є технологією оперативної аналітичної об-

робки даних з використанням методів і засобів для збору, зберігання та аналізу багатовимірних даних для підтримки процесів прийняття рішень.

Основне призначення OLAP-систем – підтримка аналітичної діяльності, довільних запитів користувачів-аналітиків. Мета OLAP-аналізу – перевірка гіпотез.

Сховище даних, яке є основою OLAP, використовує багатовимірні моделі даних, що дозволяє виконувати складні аналітичні та спеціалізовані запити за короткий проміжок часу. Вони запозичують окремі аспекти навігаційних та ієрархічних баз даних, які є швидшими за реляційні бази даних, що є надзвичайно важливим фактором при управлінні технологічними процесами у реальному часі. Результати OLAP-запитів подаються у формі матриць, де виміри складають рядки та стовпці, а значеннями матриці є розміри. Ядром системи підтримки прийняття рішень є ідея OLAP-куба (багатовимірний куб або гіперкуб). OLAP-структура, створена з робочих даних, називається OLAP-кубом. Він складається з чисельних фактів (мір), розподілених за вимірами. Зазвичай куб створюється за допомогою з'єднання таблиць із застосуванням схеми «зірка» або схеми «крижинка». В центрі «зірки» знаходиться таблиця, яка містить ключові факти, за якими робляться запити. Множинні таблиці з вимірами приєднані до таблиці фактів. Ці таблиці показують, як можуть аналізуватися агреговані реляційні дані. Кількість можливих агрегацій визначається кількістю способів, якими первинні дані можуть бути ієрархічно відображені.

Таким чином, для побудови системи аналізу або СППР необхідно в першу чергу побудувати сховище даних.

Як зазначалося в [2–5], для реалізації підсистеми моніторингу та підтримки прийняття рішення було розроблено реляційну базу даних, яку впроваджено у пташнику №4 Державного підприємства «Навчально-дослідний племінний птахівничий завод ім. Фрунзе НАУ» НУБіП України, розташований в селищі Фрунзе Сакського району АР Крим. Інформація, що надходить до бази даних, накопичується протягом п'яти років (починаючи з 2008 року). Це значний обсяг даних, і тому було прийнято рішення на основі цієї бази даних розробити сховище даних.

Виходячи з того, що реляційну базу даних було реалізовано в середовищі Microsoft SQL Server 2005, сховище даних розроблювалося в середовищі Microsoft SQL Server Management Studio. Для цього створено нову базу даних з назвою ASCMap, в яку імпортовано таблиці з бази даних ASCDB, що використовується у вищезазначеному пташнику, а саме:

- таблиця FODDER_HOUR – зберігає інформацію щодо витрат кормів у пташнику щогодини;
- таблиця POWER_DISCHARGE_HOUR – зберігає інформацію щодо витрат електроенергії щогодини;
- таблиця WATER_DISCHARGE_HOUR – зберігає інформацію щодо витрат води щогодини;
- таблиця TEMPERATURE_HOUR – зберігає інформацію щодо температурних показників усередині та зовні пташника;

- таблиця WATER_DISCHARGE_HOUR – зберігає інформацію щодо значень вологості всередині пташника;
- таблиця Eggs_Day – зберігає інформацію щодо кількості знесених за день яєць.

Таблицею фактів є таблиця Eggs_Day. Усі інші таблиці використовуються як виміри.

У середовищі Microsoft SQL Server Business Intelligence Development Studio було створено проект ASCMap, в якому визначено джерело даних (Ascmap.ds), подання даних (Ascmap.dsv), спроектований куб AC-Cube.cube) та певні виміри. На рис. 2 наведено вікно проекту ASCMap.

Як можна побачити на рис. 2, крім зазначених таблиць-вимірів додано ще одну таблицю виміру – Time.dim. Це, так званий, часовий вимір, який дозволить отримувати дані за день, місяць, рік тощо.

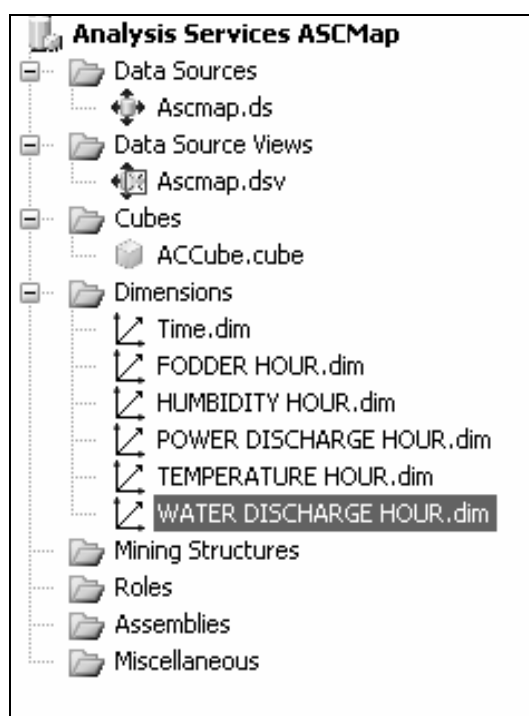


Рис. 2. Вікно проекту ASCMap

На рис. 3 показано структуру розробленого куба.

Як можна побачити на рис. 3, куб містить одну таблицю фактів Eggs_Day, яка за допомогою стовпчиків ValuedFodder, ValuedHumidity, ValuedPower, ValuedTemperature, ValuedWater, ValueDate пов'язана із відповідними таблицями-вимірами. Такі зв'язки між таблицями куба дозволяють дати відповідь на такі запити керівництва: яку кількість яєць отримано за певну добу, тиждень, місяць, рік; які зафіксовано при цьому температуру, вологість повітря; скільки було витрачено електроенергії, води, кормів тощо.

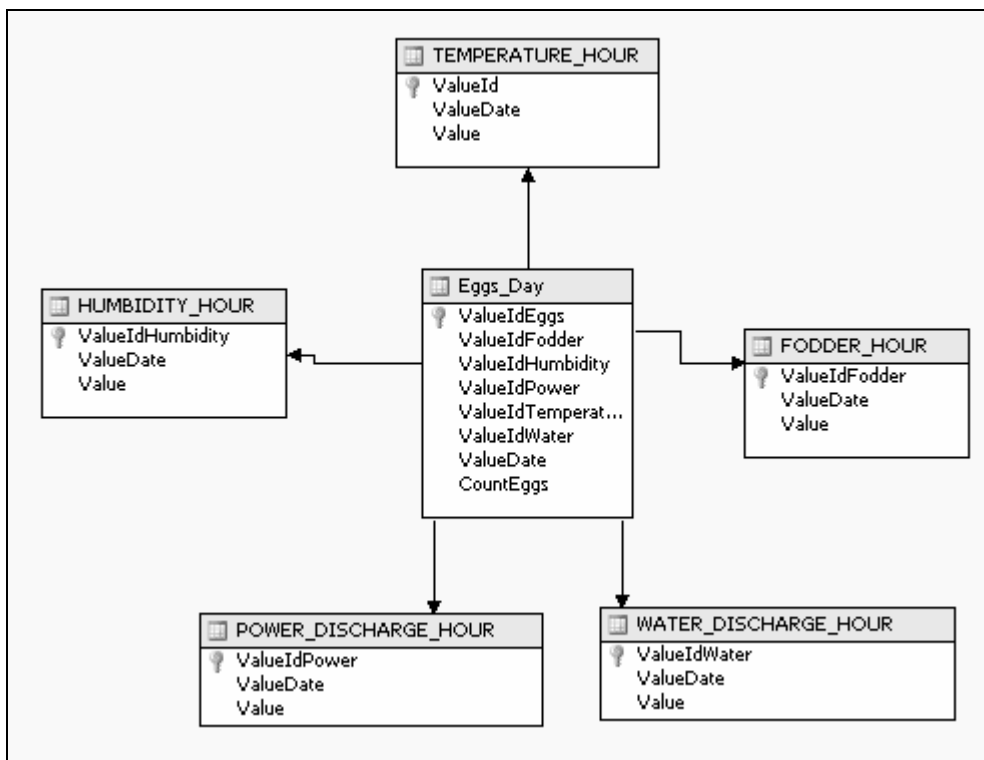


Рис. 3. Структура куба

Побудова сховища даних дає також можливість виконувати і більш складні аналітичні запити. Можна додавати обчислення до куба, які будуть динамічно виконуватись за вимогою користувача. Наприклад, можна додати обчислення, що дозволить визначити прибуток пташника за день, місяць тощо. При цьому цінові показники не зберігатимуться у кубі, а будуть кожного разу надходити зовні.

У середовищі Microsoft SQL Server Business Intelligence Development Studio є можливість розрахувати ключовий індикатор продуктивності (KPI), який означає кількісно обчислювану міру успішності бізнесу. Простий об'єкт KPI складається з основної інформації, цілі, фактично досягнутого значення, значення стану, значення тренду і папки, в якій можна виконати перегляд ключового індикатора продуктивності.

Наступні кроки пов'язані зі спеціальною технологією – Data Mining [7]. У перекладі з англійської мови цей термін визначають як «добування знань». Знання отримують із даних, які містяться в базах та сховищах даних у великих обсягах. На практиці спрацьовує закон філософії «перехід кількості у нову якість».

Висновки

1. В останні роки спостерігається бурхливий розвиток автоматизованих систем управління в аграрній галузі. Це дає можливість говорити про те, що має місце накопичення значних обсягів інформації, на основі якої розроблятимуться системи аналізу.

2. Для об'єднання в одній системі оперативних баз даних та систем аналізу використано концепцію сховищ даних. Останні є основою

OLAP-технології, яка в свою чергу, є технологією оперативної аналітичної обробки даних з використанням методів і засобів для збору, зберігання та аналізу багатовимірних даних з метою підтримки процесів прийняття рішень.

3. Пропонується Microsoft SQL Server Management Studio як інструментальне середовище для створення оперативних баз даних та сховищ даних, та Microsoft SQL Server Business Intelligence Development Studio як засіб для побудови системи аналізу.

4. Подано структуру OLAP-куба, яка містить одну таблицю фактів та шість таблиць вимірів. Така структура дозволяє отримувати відповіді на запити керівництва щодо ефективності роботи як окремого підрозділу, так і підприємства в цілому.

Список літератури

1. Борисов В.В. Компьютерная поддержка сложных организационно-технических систем / Борисов В.В., Бычков И.А., Дементьев А.В. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 154 с.

2. Голуб Б.Л. Автоматизоване управління параметрами ефективності роботи промислового пташника з підсистемою моніторингу та підтримки прийняття рішення: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Б. Л. Голуб. – К., 2011. – 22 с.

3. Лисенко В.П. Інформаційне забезпечення та його використання в автоматизованих системах управління птахівничими підприємствами / В.П. Лисенко, Б.Л. Голуб, В.Л. Щербатюк // Науковий вісник НУБіП України. – 2010. – №148. – С. 28–35.

4. Лисенко В.П. Проектування бази даних та програмного забезпечення в процесі оперативного управління пташником / В.П. Лисенко, Б.Л. Голуб // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2006. – №1(16). – С. 63–69.

5. Методи і засоби сучасного автоматизованого управління: навч. пос. / [Лисенко В.П., Головінський Б.Л., Голуб Б.Л., Руденський А.А.] – К.: Видавничий центр НАУ, 2007. – 62 с.

6. Полубояров В.В. Использование MS SQL Server Analysis Services 2008 для построения хранилищ данных [Электронный ресурс] : курс лекций / В.В. Полубояров // Интернет-университет информационных технологий. – Режим доступа: www.intuit.ru/department/database/mssqlsas2008.

7. Чубукова И.А. Data Mining / И.А. Чубукова. – М.: «Интернет-университет информационных технологий – ИНТУИТ.ру», БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 615 с.

Предложены методы и средства создания структуры хранилища данных, которое позволяет интегрировать прежде разъединенные детализированные данные, содержащиеся в разных традиционных OLTP-системах, архивах, поступающие из внешних источников в единую базу данных, осуществляя их предварительное согласование и, возможно, агрегацию. Соответствующие данные могут быть использованы в автоматизированной системе управления параметрами эффективности работы промышленного птичника для принятия решений относительно оптимальной стратегии

управления, а также для анализа и статистической обработки полученных данных.

Хранилище данных, система OLTP, система поддержания принятия решений, автоматизированная система управления, промышленный птичник, OLAP технология.

Techniques and means for the data warehouse structure development are presented. The data warehouse integrates detailed data (disengaged before) contained in different traditional OLTP-systems, archives, coming from outside sources into the only data base. The data warehouse conducts preliminary concordance of the data and aggregation if possible. The data can be used in the automated control system of an industrial poultry house to make control decisions and statistical data processing.

Data warehouse, OLTP system, decision support subsystem, automated control system, industrial poultry house, OLAP technology.

УДК 330.567.224.004.13:621.3:330.567.2.003.12.004.12(470.319)

ПРИНЦИП КОРРЕКТИРОВКИ СТОИМОСТИ ПОТРЕБЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЁ КАЧЕСТВА

**М.В. Бородин, старший преподаватель
ФГБОУ ВПО Орел ГАУ**

Обоснована актуальность определения стоимости электроэнергии в зависимости от ее качества, приведены результаты исследования и оценка качества электроэнергии в 100 точках общего присоединения, блок-схема осуществления расчета стоимости электроэнергии в зависимости от ее качества и разработаны необходимые для этого математические выражения.

Электроэнергия, стоимость, зависимость, качество электроэнергии.

Современное производство требует качественного электроснабжения. Качество электроэнергии (КЭ) является одним из факторов, непосредственно влияющих на энергоэффективность. В Российской Федерации существует большое количество нормативных документов (ГОСТ 13109-97(ГОСТ Р 54149-2010), Федеральный закон «Об электроэнергетике», Постановление Правительства Российской Федерации от 1 декабря 2009 г. № 982, ст. 7 Федерального закона "О защите прав потребителей", гражданский кодекс РФ статья 542, инструкция о порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию), которые устанавливают требования к КЭ, но на практике они не всегда эффективно работают. В

© М.В. Бородин, 2013

управления, а также для анализа и статистической обработки полученных данных.

Хранилище данных, система OLTP, система поддержания принятия решений, автоматизированная система управления, промышленный птичник, OLAP технология.

Techniques and means for the data warehouse structure development are presented. The data warehouse integrates detailed data (disengaged before) contained in different traditional OLTP-systems, archives, coming from outside sources into the only data base. The data warehouse conducts preliminary concordance of the data and aggregation if possible. The data can be used in the automated control system of an industrial poultry house to make control decisions and statistical data processing.

Data warehouse, OLTP system, decision support subsystem, automated control system, industrial poultry house, OLAP technology.

УДК 330.567.224.004.13:621.3:330.567.2.003.12.004.12(470.319)

ПРИНЦИП КОРРЕКТИРОВКИ СТОИМОСТИ ПОТРЕБЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЁ КАЧЕСТВА

**М.В. Бородин, старший преподаватель
ФГБОУ ВПО Орел ГАУ**

Обоснована актуальность определения стоимости электроэнергии в зависимости от ее качества, приведены результаты исследования и оценка качества электроэнергии в 100 точках общего присоединения, блок-схема осуществления расчета стоимости электроэнергии в зависимости от ее качества и разработаны необходимые для этого математические выражения.

Электроэнергия, стоимость, зависимость, качество электроэнергии.

Современное производство требует качественного электроснабжения. Качество электроэнергии (КЭ) является одним из факторов, непосредственно влияющих на энергоэффективность. В Российской Федерации существует большое количество нормативных документов (ГОСТ 13109-97(ГОСТ Р 54149-2010), Федеральный закон «Об электроэнергетике», Постановление Правительства Российской Федерации от 1 декабря 2009 г. № 982, ст. 7 Федерального закона "О защите прав потребителей", гражданский кодекс РФ статья 542, инструкция о порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию), которые устанавливают требования к КЭ, но на практике они не всегда эффективно работают. В

© М.В. Бородин, 2013

то же время необходимость поддержания нормируемого КЭ становится все более актуальной задачей в связи с применением современного электрического оборудования и систем автоматизации, чувствительных к отклонению каждого показателя качества электроэнергии (ПКЭ). Возросло количество обращений потребителей в энергоснабжающие организации по поводу некачественной электроэнергии. Несоответствие КЭ нормативным документам приводит к экономическому ущербу из-за недоотпуска продукции, ее порчи, снижения производительности предприятий, простоя оборудования, увеличения электрических потерь и к другим негативным последствиям.

Цель исследований – разработка принципа корректировки стоимости электроэнергии в зависимости от её качества, который позволит создать эффективный механизм экономического регулирования взаимоотношений энергоснабжающей организации с потребителями, основанный на заинтересованности той и другой стороны в поддержании нормируемого качества электроэнергии на границе балансового разграничения.

Материалы и методика исследований. Исследуются результаты измерений качества электроэнергии на соответствие требованиям нормативных документов в точке общего присоединения и на границе балансового разграничения между потребителем и энергосистемой, принципы корректировки стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от её качества. Методика исследования заключается в разработке математических моделей, алгоритмов регулирования стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от её качества. Объект исследования - качество электрической энергии, поставляемой потребителям.

Результаты исследований. Для оценки КЭ на соответствие требованиям [4] в Орловской области были произведены измерения в 100 точках общего присоединения (ТОП) в зимнее и летнее время. Измерения проводились с помощью измерителей ПКЭ «Ресурс-UF2» №2785, 2010 г., №2747, 2010 г., №3279, 2011, период испытаний - одни сутки. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ Р 53333-2008 "Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения". По результатам испытаний была произведена оценка КЭ, а её результаты представлены на рис. 1 - 6.

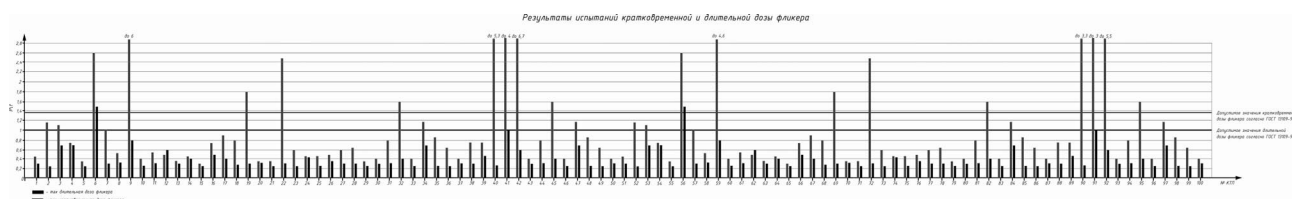


Рис. 1. Результаты испытаний кратковременной и длительной дозы фликера

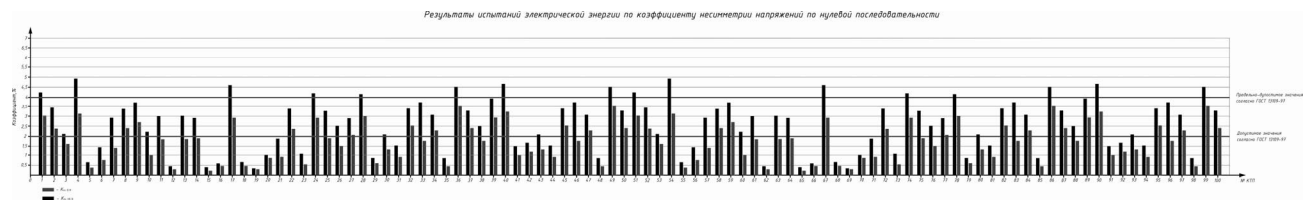


Рис. 2. Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по нулевой последовательности

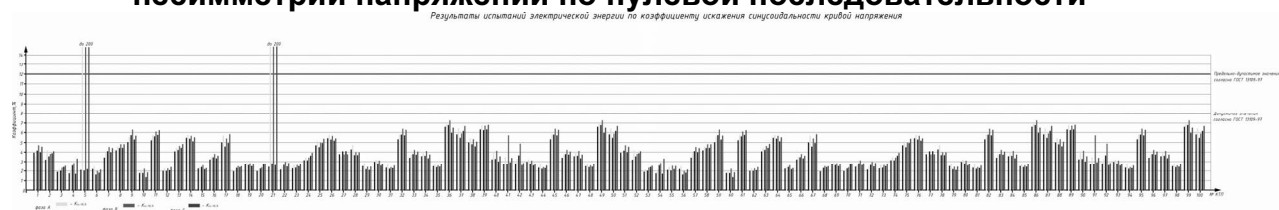


Рис. 3. Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения

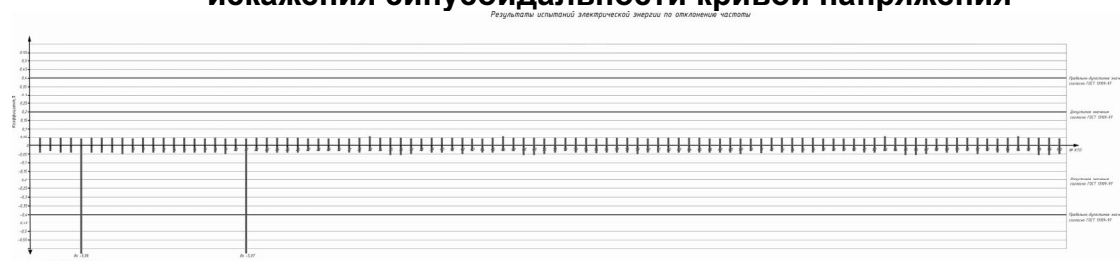


Рис. 4. Результаты испытаний электрической энергии по отклонению частоты

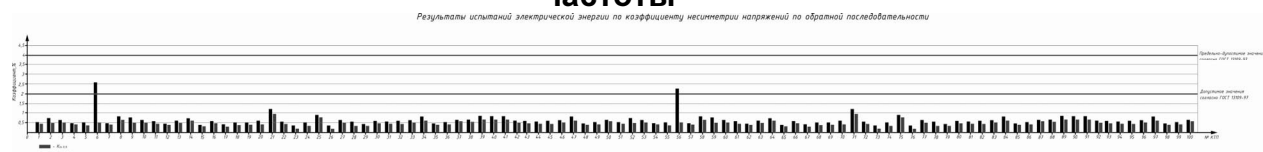


Рис. 5. Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности

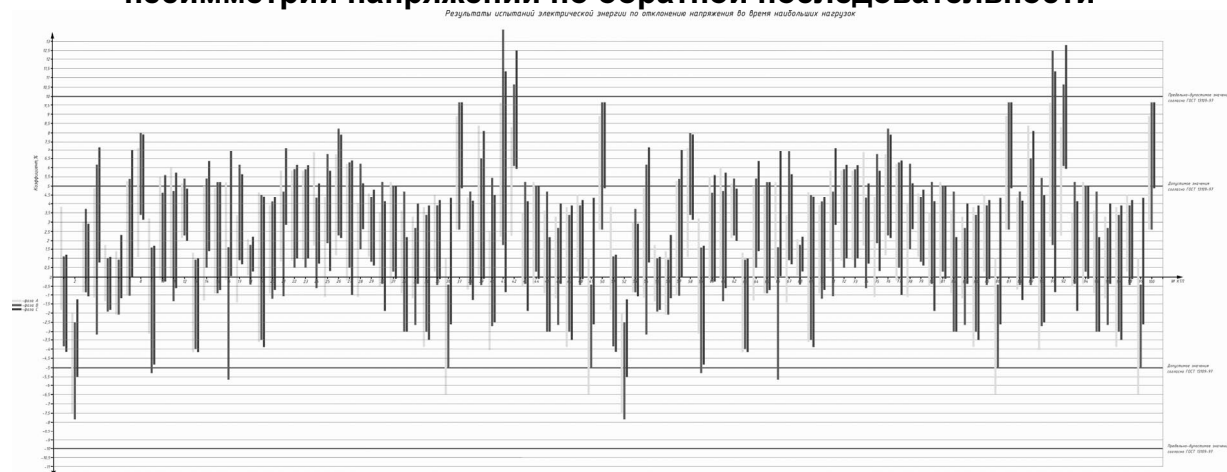


Рис. 6. Результаты испытаний электрической энергии по отклонению напряжения

В 52 ТОП по коэффициенту n -х гармонических составляющих фазных напряжений в нормальном режиме ПКЭ не соответствовали требованиям нормативных документов. Изменение ПКЭ, провал напряжения, импульсное напряжение, временное перенапряжение за время измерений не зафиксировано.

Результаты измерений показали, что в 87 ТОП в нормальном режиме ПКЭ не соответствовали требованиям нормативных документов. Исходя из свойств электрической энергии, были определены наиболее вероятные виновники искажения КЭ. В 19 ТОП искажения в КЭ вносит энергоснабжающая организация, в 28 точках потребитель и в 40 точках искажения вносят как потребитель, так и энергоснабжающая организация.

Большое количество точек, в которых ПКЭ отклонялись от нормативных показателей связано с:

- неравномерным распределением по фазам нагрузки;
- изменением величины генерируемой и (или) потребляемой мощности в энергосистеме;
- применением оборудования, искажающего КЭ;
- изношенностью основного сетевого оборудования;
- значительной (выше нормативной) протяженностью электрических сетей;
- отсутствием заинтересованности сетевых организаций, а иногда и потребителей, в поддержании и контроле КЭ.

С вступлением в силу ГОСТ Р 54149-2010 требования к КЭ изменились. Произведем оценку полученных измерений применительно к новым значениям ПКЭ, предусмотренных ГОСТ, но интервал времени испытаний оставим прежним.

По результатам оценки в 81(уменьшение на 7) точках балансового разграничения потребителя и энергоснабжающей организации и 70(уменьшение на 17) ТОП в нормальном режиме ПКЭ не соответствовали требованиям ГОСТ Р 54149-2010. Исходя из свойств электрической энергии, были определены наиболее вероятные виновники искажения КЭ. В 2 ТОП искажения в КЭ вносит энергоснабжающая организация, в 66 точках потребитель и в 2 точках искажения вносят как потребитель, так и энергоснабжающая организация.

Со вступлением в действие ГОСТ Р 54149-2010 снижается уровень ответственности энергоснабжающей организации за КЭ. С другой стороны в ГОСТ Р 54149-2010 увеличены допустимые интервалы отклонения ПКЭ и время их отклонения, что будет способствовать снижению уровня КЭ в системах электроснабжения, тем самым снижая энергоэффективность как потребителей так и энергоснабжающих организаций. В свою очередь, это повлечет за собой негативные изменения в процессах проектирования и эксплуатации (выбор заниженного сечения проводов линий электропередачи, рост потерь электроэнергии). Переход на новый стандарт приведёт к необходимости приобретения электротехническими лабораториями новых приборов и в большем количестве для измерения

КЭ, дополнительного обучения специалистов, и всё это потребует значительных затрат времени и средств.

Использование существующей системы скидок и надбавок не дает гарантии постоянного и повсеместного обеспечения требуемого уровня КЭ, так как применяется эпизодически и на ограниченном числе объектов. Поэтому проблема обеспечения КЭ в большей мере обоснована отсутствием эффективной методики корректировки стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от её качества и технических способов и средств, позволяющих реализовать эту методику [3].

Авторами разработан принцип корректировки стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от её качества, проиллюстрированный блок-схемой (рис. 7). Предполагается выполнять корректировку стоимости электроэнергии на границе балансового разграничения между потребителем и энергосистемой. Соответствующая функция должна быть встроена в счетчик электроэнергии [1].



Рис. 7. Блок-схема функционального блока определения стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от её качества

В соответствии с блок-схемой разработан «Способ измерения потребления электроэнергии и корректировки ее стоимости с учетом качества и источника искажений» [2]. Этот способ позволяет автоматически производить учет количества потребленной электрической энергии и определять её стоимость, в зависимости от качества потребленной электрической энергии и источника искажений.

Разработанный способ является технико-экономическим механизмом стимулирования как потребителей, так и поставщиков электроэнергии в части поддержания КЭ. Экономическая часть механизма заключается в следующем: если искажения в КЭ вносит потребитель, то он будет вынужден платить за электрическую энергию по более высокой цене, если же электрическая энергия, поступающая потребителю не соответствует требованиям нормативных документов по вине энергоснабжающей организации, то потребитель платит меньше.

Стоимость потребленной электроэнергии предлагается определять по формуле:

$$C_{ПЭЭ} = T_{ИСК} K_{П} K_{ПЭЭ}, \quad (1)$$

где $T_{исх}$ – исходный тариф на электроэнергию, руб.; $K_{п}$ – поправочный коэффициент; $K_{пээ}$ – количество потребленной электроэнергии, кВт·ч.

Если искажения в качество электроэнергии вносят как потребитель, так и энергосистема одновременно, тогда:

$$C_{пээ} = T_{исх} \frac{K_{пэс} + K_{пэл}}{2} K_{пээ}, \quad (2)$$

где $K_{пэс}$ – поправочный коэффициент для энергосистемы; $K_{пэл}$ – поправочный коэффициент для электропотребителя.

Выводы

Разработанный принцип позволяет производить учет количества потребленной электрической энергии и определять её стоимость, в зависимости от качества потребленной электрической энергии и источника искажения. Поправочные коэффициенты разработаны для всех показателей КЭ [3], но их обоснование требует дополнительных исследований, которые в настоящее время проводятся.

Для практического использования принципа определения стоимости электроэнергии в зависимости от её качества решаются такие приоритетные задачи.

1. Оценка фактического КЭ на границе балансового разграничения между потребителем и энергоснабжающей организацией (статистические исследования по итогам измерений).

2. Разработка правового механизма расчета между поставщиком и потребителем электроэнергии с учетом КЭ.

3. Разработка методики определения “виновника” искажений показателей КЭ на границе балансового разграничения.

4. Разработка математической модели системы учета электроэнергии, позволяющей определять стоимость электроэнергии в зависимости от ее качества.

5. Обоснование поправочных коэффициентов к стоимости электроэнергии в зависимости от значения отклонения одного или нескольких показателей КЭ от нормальной величины.

6. Разработка функционального блока и соответствующего программного обеспечения для новых типов электрических счетчиков, что позволит выполнять автоматический расчет стоимости электроэнергии в зависимости от ее качества.

Список литературы

1. Виноградов А.В. Определение стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от её качества / А.В. Виноградов, М.В. Бородин // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. 8-й международной науч.-техн. конф. (г. Москва, ГНУ ВИЭСХ, 16 – 17 мая 2012 г.): в 5-ти ч., ч. 1. Проблемы энергообеспечения и энергосбережения. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012. – 384 с.

2. Виноградов А.В. Способ коммерческого учета электрической энергии в зависимости от показателей её качества / А.В. Виноградов, М.В. Бородин // Сб.

материалов по результатам конференции, прошедшей в рамках «Недели Науки - 2010». – Орел: Изд-во Орел ГАУ, 2010. – С. 46–50.

3. Виноградов А.В. Экспертная оценка поправочных коэффициентов к стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от её качества / А.В. Виноградов, М.В. Бородин. // Вести высших учебных заведений Черноземья, – Липецк, 2012. – №3 – С. 20–24.

4. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Введен с 01.01.99]. – Минск: Изд-во стандартов, 1998. – 30 с.

Обґрунтовано актуальність визначення вартості електроенергії залежно від її якості, наведено результати дослідження та оцінка якості електроенергії в 100 точках загального приєднання, блок-схема здійснення розрахунку вартості електроенергії залежно від її якості та розроблено необхідні для цього математичні вирази.

Електроенергія, вартість, залежність, якість електроенергії.

The article provides a definition of the relevance of the cost of electricity, depending on its quality, the study and evaluation of the quality of electricity to 100 points of common coupling, the block diagram of the calculation of the cost of electricity, depending on its quality, and the necessary mathematical expressions.

Electricity, cost, dependence, power quality.

УДК 621.311.42.078

УСТРОЙСТВО ЗАПРЕТА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА ДЛЯ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ 20-110/6-10 кВ

А.В. Виноградов, кандидат технических наук

П.Л. Багаев, аспирант*

Орловский государственный аграрный университет

Приведена принципиальная схема осуществления запрета автоматического включения резерва на короткое замыкание. Выполнено для подстанций класса напряжения 20-110/6-10кВ.

Устройство, выключатель автоматического включения резерва, короткое замыкание, двухтрансформаторная подстанция, электромеханические реле.

Короткие замыкания на шинах подстанции приводят к выходу из строя оборудования подстанции и недоотпуску электроэнергии потреби-

*Научный руководитель – кандидат технических наук А.В. Виноградов

© А.В. Виноградов, П.Л. Багаев, 2013

материалов по результатам конференции, прошедшей в рамках «Недели Науки - 2010». – Орел: Изд-во Орел ГАУ, 2010. – С. 46–50.

3. Виноградов А.В. Экспертная оценка поправочных коэффициентов к стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от её качества / А.В. Виноградов, М.В. Бородин. // Вести высших учебных заведений Черноземья, – Липецк, 2012. – №3 – С. 20–24.

4. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Введен с 01.01.99]. – Минск: Изд-во стандартов, 1998. – 30 с.

Обґрунтовано актуальність визначення вартості електроенергії залежно від її якості, наведено результати дослідження та оцінка якості електроенергії в 100 точках загального приєднання, блок-схема здійснення розрахунку вартості електроенергії залежно від її якості та розроблено необхідні для цього математичні вирази.

Електроенергія, вартість, залежність, якість електроенергії.

The article provides a definition of the relevance of the cost of electricity, depending on its quality, the study and evaluation of the quality of electricity to 100 points of common coupling, the block diagram of the calculation of the cost of electricity, depending on its quality, and the necessary mathematical expressions.

Electricity, cost, dependence, power quality.

УДК 621.311.42.078

УСТРОЙСТВО ЗАПРЕТА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА ДЛЯ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ 20-110/6-10 кВ

А.В. Виноградов, кандидат технических наук

П.Л. Багаев, аспирант*

Орловский государственный аграрный университет

Приведена принципиальная схема осуществления запрета автоматического включения резерва на короткое замыкание. Выполнено для подстанций класса напряжения 20-110/6-10кВ.

Устройство, выключатель автоматического включения резерва, короткое замыкание, двухтрансформаторная подстанция, электромеханические реле.

Короткие замыкания на шинах подстанции приводят к выходу из строя оборудования подстанции и недоотпуску электроэнергии потреби-

*Научный руководитель – кандидат технических наук А.В. Виноградов

© А.В. Виноградов, П.Л. Багаев, 2013

телям. Включение резервного трансформатора на поврежденную секцию шин может привести к отключению части потребителей резервной секции шин. Для предотвращения включения резервного трансформатора на короткое замыкание служат способы и средства запрета АВР. В настоящее время на рынке отсутствуют устройства запрета АВР как отдельных функциональных блоков, которыми могут быть дооснащены существующие подстанции. Есть возможность осуществления запрета путем перепрограммирования существующих микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, например Сириус 2Т, но это крайне редко применяется на практике в связи с несовершенством способов запрета АВР и отсутствием готовых алгоритмов для перепрограммирования указанных микропроцессорных устройств. Отсутствуют также надежные схемы осуществления запрета АВР с применением электромеханических реле.

Существующие способы и средства запрета не могут осуществлять запрет при коротком замыкании в отходящей линии, когда коммутирующий ее выключатель остался во включенном положении. Предложенные ранее авторами способы не обеспечивают необходимой надежности. Все это приводит к значительному ущербу, как для энергосистемы, так и для потребителей при каждом включении секционного выключателя на подстанции на короткие замыкания. Поэтому актуальной является задача разработки устройства запрета автоматического включения резерва при коротком замыкании на шинах двухтрансформаторной подстанции или в отходящей линии в случае отказа ее выключателя.

Цель исследований – разработка устройства запрета автоматического включения резерва при коротком замыкании на шинах двухтрансформаторной подстанции или в отходящей линии в случае отказа ее выключателя, способствующего увеличению энергетической эффективности путем снижения возможных ущербов, связанных с выходом из строя оборудования и недоотпуском электрической энергии потребителям.

Материалы и методика исследований. Процессы, протекающие в электрической цепи, характеризуются различными параметрами, в первую очередь – это ток и напряжение. На значения данных параметров влияют многие факторы: оборудование, установленное в линиях и на подстанциях, характер и мощность питаемой нагрузки, состояния коммутирующих аппаратов и другие.

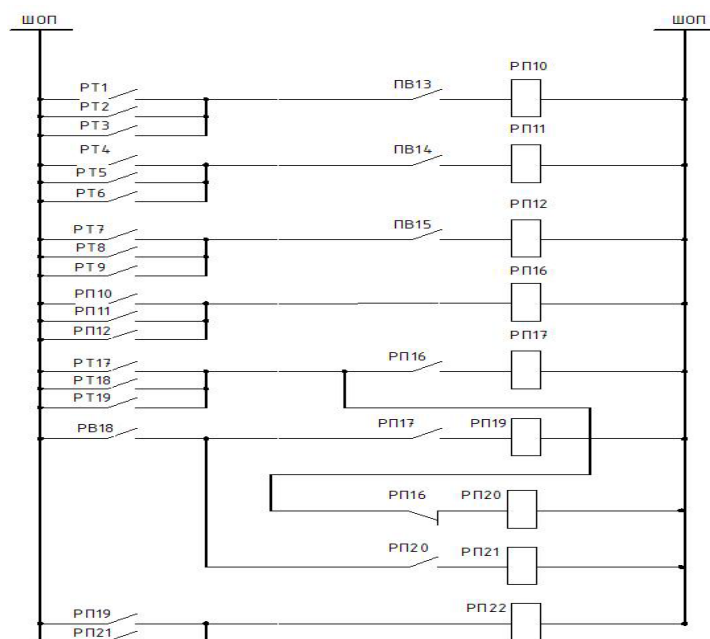
Соответственно по изменению тока и напряжения можно судить о режимах работы сети и работе оборудования, установленного в ней. Это широко используется в различных схемах управления и автоматизации сетей, например на изменение тока реагируют токовые защиты, на изменения напряжения – нулевые защиты и т.д.

В ходе анализа было выявлено, что при трехфазном замыкании порядок изменения тока и напряжения будет следующим:

- появление тока к.з. и одновременно с этим исчезновение всех линейных напряжений;

- Из полученных данных можно выделить характерные признаки случаев замыкания на шинах подстанции, а также в отходящей линии при условии, что не отключился вводной выключатель. Это необходимо, так как именно при данных условиях следует подавать сигнал запрета АВР [2].

На кафедре «Электроснабжение» ОрелГАУ было создано устройство, устраняющее этот недостаток и которое предназначено для подстанций, где используется электромеханические устройства релейной защиты и автоматики [1]. Схема устройства представлена на рис1.



Устройство выдает запрет на включение выключателя автоматического включения резерва при коротком замыкании на шинах подстанции или в отходящей линии в случае отказа ее выключателя.

(на рис.1 РТ), датчик напряжения реле РСВ 18 (на рис.1 РВ), датчик положения выключателя реле РП12 (на рис. 1 ПВ).

Схема работает так:

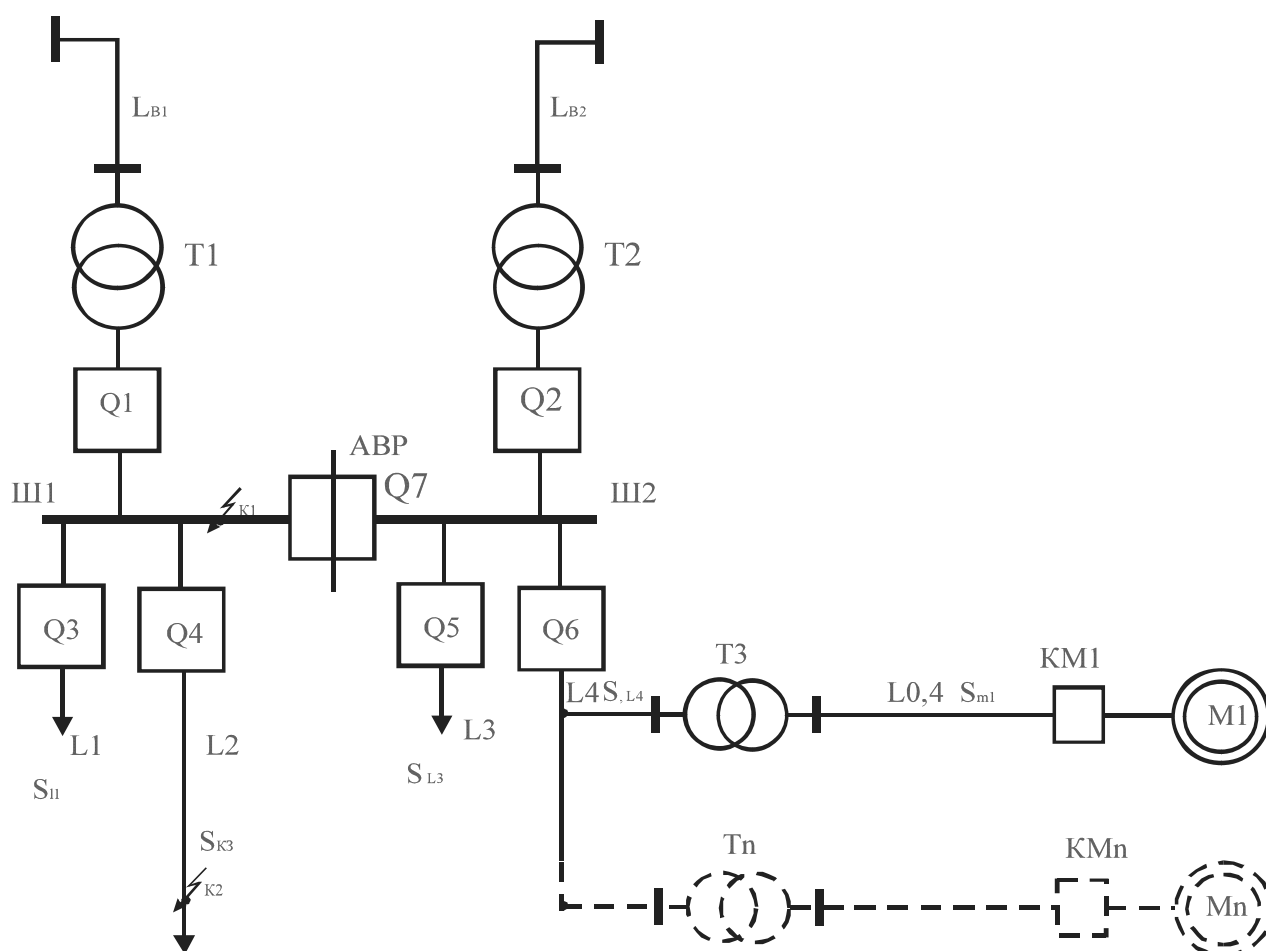


Рис. 2. Поясняющая схема подстанции

При коротком замыкании в отходящей линии (точка K2, рис.2) ее выключатель остался во включенном положении, появляется ток короткого замыкания на вводе питающего трансформатора T1 и в отходящей линии L2, который фиксируется соответствующими датчиками тока, установленными в отходящих линиях PT1-PT9 (см. рис. 1) и на вводе питающего трансформатора PT17-PT19. При срабатывании датчики своими контактами запускают промежуточные реле РП16 и РП17, тем самым подготавливая к запуску реле РП19. При коротком замыкании в точке K2 так же происходит исчезновение или резкое снижение напряжения, фиксируемое соответствующим датчиком напряжения РВ, который при срабатывании и запускает реле РП19, в результате чего происходит запуск реле РП22, которое замыкает контакт в цепи включения выключателя АВР.

При коротком замыкании на шинах двухтрансформаторной подстанции (точка K1, рис. 2) появляется ток короткого замыкания на вводе трансформатора T1, который фиксируется датчиком тока PT17-PT19 и при срабатывании запускает реле РП20. Контакты этого реле включены последовательно с датчиком напряжения. Так как при коротком замыкании происходит отключение головного выключателя Q1 подстанции,

вследствие чего исчезает напряжение и происходит срабатывание датчика напряжения РВ18, который запускает промежуточное реле РП21, оно же в свою очередь своими контактами запускает реле РП22, которое замыкает контакт в цепи включения выключателя АВР [5].

Выводы

Сигнал запрета включения выключателя АВР выдается как при коротком замыкании на шинах двухтрансформаторной подстанции, так и в отходящей линии, когда коммутирующий выключатель не отключился по какой-либо причине.

Список литературы

1. Багаев П.Л. Средства реализации способов запрета АПВ и АВР / П.Л. Багаев, А.В. Виноградов. // Сб. материалов по результатам конференции, прошедшей в рамках «Недели Науки - 2010». – Орел: Изд-во Орел ГАУ, 2010 – 448 с.
2. Виноградов А.В. Совершенствование автоматического резервирования на двухтрансформаторных подстанциях: монография / Виноградов А.В. – Орел.: Изд-во Орел ГАУ, 2007. – 172 с.
3. Пат. №2389104. Способ запрета автоматического включения резерва на короткое замыкание в отходящей линии в случае отказа её выключателя / Виноградов А.В., Астахов С.М., Аминяков С.В., Багаев П.Л. Черных Н.Н. – №2009100528/09; заявл. 11.01.2009; опубл. 10.05.2010, Бюл. № 13
4. Пат. №2389119. Способ запрета автоматического повторного включения на короткое замыкание в отходящей линии в случае отказа её выключателя / Виноградов А.В., Астахов С.М., Семенов А.Е., Багаев П.Л. Черных Н.Н. – №2009100612/09; заявл. 11.01.2009; опубл. 10.05.2010, Бюл. №13.
5. Пат. №24021374. Способ запрета автоматического включения резерва на короткое замыкание на шинах двухтрансформаторной подстанции или в отходящей линии в случае отказа ее выключателя / Виноградов А. В., Багаев П.Л., Черных Н. Н. – №2009125875 /09; заявл. 06.07.2009; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22.

Наведено принципову схему здійснення заборони автоматичного включення резерву на коротке замикання. Виконано для підстанцій класу напруги 20-110/6-10кВ.

Пристрій, вимикач автоматичного включення резерву, коротке замикання, двотрансформаторна підстанція, електромеханічні реле.

The schematic diagram of implementation of a ban of automatic inclusion of a reserve is provided in this article on short circuit. It is executed for substations of a class of tension 20-110/6-10kV.

Device, switch of automatic inclusion of a reserve, short circuit, two-transformer substation, electromechanical relays.

НАДІЙНІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАНЬ РАДІОКАНАЛОМ

А.П.Пузанов, кандидат технічних наук

Виконано моделювання процесу обміну даними при застосуванні радіоканалу в автоматизованій системі контролю та обліку електроенергії. Показано, що достатньо достовірне отримання і розпізнавання даних з імовірністю більше 0,9 можливо при співвідношенні сигнал/шум не менше 12.

Обмін даними, радіоканал, імовірність, автоматична система, контроль, облік електроенергії.

Як відомо, застосування автоматизованої системи контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ) дозволяє одержувати точну і достовірну вимірювальну інформацію, підвищує ефективність управління енергетикою, дає можливість створювати реальні баланси електроенергії і потужності для оцінки поточних режимів електроспоживання, коротко- і довгострокового прогнозування, оформлення економічних і фінансових документів на усіх рівнях енергосистеми держави [2].

У системі АСКОЕ контроль параметрів ліній електропостачання та облік кількості споживаної електроенергії виконується електронними лічильниками із застосуванням мікроконтролерів. Передача даних виконується в цифровому вигляді і може здійснюватися двопровідним інтерфейсом, телефоном або оптичною лінією зв'язку – де це можливо. Але прокладка нових кабелів на десятки кілометрів можлива не всюди і коштує дорого.

Нині найперспективнішим є використання радіоканалу цифрового GSM-стандарту. Однак при передачі цифрового коду на нього впливають різні перешкоди: атмосферні шуми, електромагнітні імпульси від розряду блискавок та ін., що призводить до невірного прийому цифрових даних.

Мета досліджень - теоретичний аналіз процесу передачі даних радіоканалом і визначення імовірнісних характеристик каналу обміну.

Матеріали та методика досліджень. На виході передатчика є тільки корисний сигнал (рис.1,а). На вході приймача діє адитивна суміш корисного сигналу $s(t)$ і шуму $n(t)$ (рис.1,б):

$$x(t) = s(t) + n(t). \quad (1)$$

Згідно з рис.1,в рішення, що прийнятий сигнал є логічна «1», приймається, коли амплітуда сигналу вище порога U_0 ; рішення, що прийнятий сигнал є логічний «0» – коли амплітуда сигналу нижче межі U_0 .

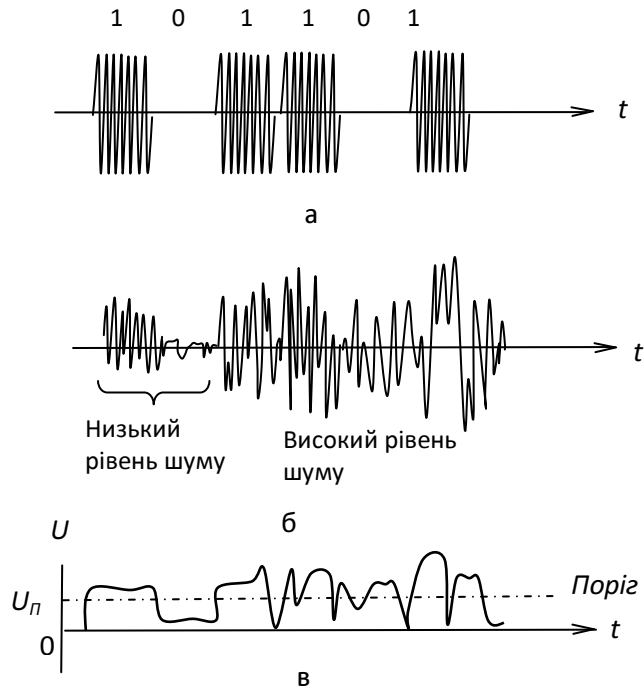


Рис.1. Передача цифрового сигналу радіоканалом:
а – радіосигнал на виході передавача; б – радіосигнал на виході детектора; в – сигнал на виході детектора

Як логічний «0», так і логічна «1» є корисним сигналом, особливо, якщо при передачі даних виконується частотна модуляція, тобто логічна «1» – це сигнал на частоті f_1 , логічний «0» – сигнал на частоті f_2 . Рішення про те, що прийнятий сигнал є логічна «1» приймається, якщо вершина сигналу на виході лінійної частини приймача (до детектора) потрапляє в область X_1 (рис.2), а логічний «0», якщо вершина прийнятого імпульсу знаходиться в області X_0 .

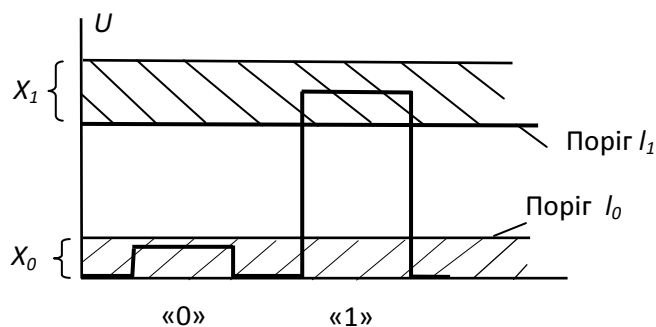


Рис.2. Визначення логічного «0» і логічної «1» на виході детектора

При визначенні рішення можуть бути дві взаємовиключні умови: H_{11} – передана передавачем логічна «1»; H_{01} – було передано логічний «0».

Приймач на основі аналізу сигналу $x(t)$ приймає рішення: було передано «1» або «0». Позначимо рішення: A_{11} – сигнал логічної «1» є, A_{01} – логічної «1» не прийнято, тобто прийнято логічний «0». Одне із рішень правильне, друге – помилка. Тоді можуть бути такі випадки:

$A_{00}H_{00}$ – нічого не передавалось, передатчик було вимкнено, і приймальною стороною було прийнято рішення, що корисного сигналу не було (*правильне невизначення*);

$A_{11}H_{11}$ – передана логічна «1» і прийнято рішення, що прийнята логічна «1» - *правильне визначення логічної «1»*;

$A_{11}H_{00}$ – сигнал не передається, але було прийнято рішення, що прийнята логічна «1» (*помилкове визначення логічної «1»*);

$A_{01}H_{00}$ – сигнал не передається, але було прийнято рішення, що прийнято логічний «0» (*помилкове визначення логічного «0»*);

$A_{01}H_{11}$ – передана логічна «1», а вирішено, що це – логічний «0» – *пропуск логічної «1»*;

$A_{11}H_{01}$ передано логічний «0», а прийнято рішення, що це – логічна «1» – *помилкове визначення логічної «1»*;

$A_{01}H_{01}$ – передано логічний «0» і прийнято рішення, що це – логічний «0», тобто *правильне визначення логічного «0»*.

Ступінь небажання цих помилок різна, але усі вони приводять до перекручення даних, що треба враховувати при обробці даних. Виконують це за допомогою коефіцієнтів, які називають вартістю помилок.

Систему обміну даними можна характеризувати величиною середньої плати за похибку, яка обчислюється за правилами математичного чекання:

$$\bar{r} = r_{1000} \cdot p(A_{10}H_{00}) + r_{0100} \cdot p(A_{01}H_{00}) + r_{0111} \cdot p(A_{01}H_{11}) + r_{1101} \cdot p(A_{11}H_{01}), \quad (2)$$

де r_{1000} – вартість помилкового визначення наявності логічного сигналу «1», коли передатчик був виключений; r_{1101} – вартість за помилкове рішення прийому «1», коли передано 0; r_{0111} – вартість за помилковий прийом 0 коли передано 1; r_{0100} – вартість прийняття рішення, що прийнято сигнал «0» коли передатчик було виключено; $p(A_{xx}H_{xx})$ – відповідні імовірності помилок.

Очевидно, що $r_{1000} = r_{0100} = r_{01}$; $p(A_{10}H_{00}) = p(A_{01}H_{00}) = p(A_c H_0)$, де A_c – прийняття рішення про наявність корисного сигналу на вході детектора; H_0 – відсутність передачі.

Крім того, оскільки плата за помилкове рішення наявності «1» або «0» однакова, то $r_{1101} = r_{0111} = r_{10}$; $p(A_{10}H_{11}) = p(A_{11}H_{01}) = p(A_{np} H_1)$. Тоді рівняння (2) приймає вигляд:

$$\bar{r} = 2r_{01} \cdot p(A_{np} H_1) + 2r_{10} \cdot (p(A_c H_0)), \quad (3)$$

де $p(A_{np} H_1)$ – імовірність помилкового рішення (прийнято «1» або «0») при наявності сигналу передатчика; $p(A_c H_0)$ – ймовірність помилкового рішення, що сигнал є (за відсутності передачі).

Застосуємо правило множення імовірностей:

$$p(A_{np} H_1) = p(H_1) \cdot p(A_{np} | H_1) = p(H_1) F_{пв}; \quad (4)$$

$$p(A_c H_0) = p(H_0) \cdot p(A_c | H_0) = p(H_0) D_{п}, \quad (5)$$

де $F_{ПВ} = p(A_{ПВ}|H_1)$ - імовірність помилкового визначення логічного «0» або «1» ; $D_{П0} = p(A_c H_0)$ – імовірність помилкового рішення про відсутність передачі (пропуску сигналу).

Плата за пропуск переданих даних $D_{П0}$ менше, ніж за помилкове рішення $F_{ПВ}$ («1» замість «0» або навпаки), оскільки інформацію можна передати повторно.

Якщо імовірність правильного прийому даних $D_{ПП}$, то $D_{ПП} + D_{П0} = 1$, тобто $D_{П0} = 1 - D_{ПП}$. Тоді після перетворювань вираз (3) приймає вигляд:

$$\bar{r} = 2r_{10}p(H_1)[1 - (D_{ПП} - l_0 F_{ПВ})], \quad (6)$$

де ваговий множник $l_0 = \frac{r_{10}p(H_0)}{r_{01}p(H_1)} = \text{const}$ містить тільки апіорні імовірності і не залежить від рішення, що прийнято після обробки інформації.

Оптимальною є така обробка, яка дає мінімум середнього ризику $\bar{r}$. Така умова мінімуму сумарної імовірності похибки є відомий *критерій ідеального спостерігача*. Мінімум $\bar{r}$ буде при максимумі різності :

$$(D_{ПП} - l_0 F_{ПВ}) = \max. \quad (7)$$

Шуми атмосфери за відсутністю корисного сигналу (див. рис.1,а) є стаціонарним випадковим процесом Y , щільність розподілу якого відповідає закону Релея [1]:

$$w(Y) = \frac{Y}{\sigma_u^2} e^{-\frac{Y^2}{2\sigma_u^2}} \quad \text{при } 0 < Y < \infty, \quad (8)$$

де $\sigma_u^2 = k_0^2 E_C N_{Ш} / 2$ – дисперсія шуму; k_0 – коефіцієнт пропорційності; E_C – повна енергія сигналу; $N_{Ш}$ – спектральна щільність шуму.

За наявності корисного сигналу щільність суміші сигналу і шуму [1]:

$$w_{cn}(Y) = \frac{Y}{\sigma_u^2} \exp\left(-\frac{Y^2 + k_0^2 E_C^2}{2\sigma_u^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{k_0 E_C Y}{\sigma_u^2}\right), \quad (9)$$

де I_0 – модифікована функція Беселя нульового порядку, $I(x) \cong \frac{e^x}{2\pi x}$.

Тоді імовірність правильного прийому даних може розглядатися як умовна імовірність перевищення межі I_1 прийнятим сигналом логічної «1» (см. рис.2) [3]:

$$D_{ПП} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{v_0}^{\infty} e^{-v^2/2} dv = \frac{1}{2} [1 - \Phi(v_0)], \quad (10)$$

де $\Phi(v) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^v e^{-v^2/2} dv$ – інтеграл імовірності [1]; $v_0 = u_0 - q_0$, u_0 – відносна

межа спрацьовування; $q_0 = \sqrt{\frac{2E_C}{N_0}}$ – відношення сигнал/шум на вході детектора приймача.

Тому імовірність правильного прийому цифрового сигналу

$$D_{\text{пп}} = \frac{1}{2} [1 - \Phi(u_0 - q_0)]$$

і відповідає графікам виявлення сигналу при адитивній суміші корисного сигналу і шуму без накопичування, тобто за відсутності повторних передач.

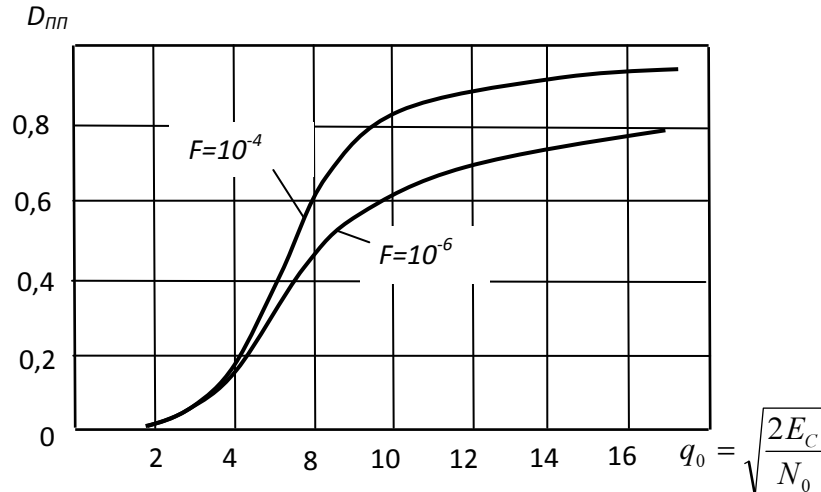


Рис.3. Характеристики правильного прийому цифрового сигналу при обміні даними по радіоканалу

Висновки

При використанні радіоканалу для передачі даних електровимірів у системі АСКОЕ імовірність правильного прийому і розпізнавання цифрових даних може розглядатися як умовна імовірність перевищення межі прийнятим сигналом логічної «1» або «0» і поліпшується при збільшенні відношення енергії сигналу до енергії шуму на вході детектора приймача, при цьому імовірність помилкового виявлення даних зменшується.

Список літератури

1. Заездный А.М. Основы расчетов по статистической радиотехнике / А.М. Заездный. – М.: Связь, 1969. – 448 с.
2. Лапинин И.Г. Эффективность применения двухуровневой АСКУЭ в энергетике Украины / И.Г.Лапинин, А.В.Шестеренко // Энергетика и электрификация. – 2000. – №7. – С. 31–34.
3. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: Учеб. для вузов/ М.И. Финкельштейн – М.: Советское радио, 1973. – 496 с.

Выполнено моделирование процесса обмена данными по радиоканалу в автоматической системе контроля и учета электроэнергии. Показано, что достаточно достоверное получение и распознавание данных при однократной передаче с вероятностью 0,9 возможно при отношении сигнал/шум не менее 12.

Обмен данными, радиоканал, вероятность, автоматическая система, контроль, учет электроэнергии.

Executed modeling of process of exchange given on the radio link in the automatic checking system and account of electric power. Shown that sufficiently reliable reception and recognition given under the one-shot transmission with probability 0,9 possible at the attitude a signal/noise not less than 12.

Exchange by data, radio link, probability, automatic system, checking, account of electric power.

УДК 621.3.066.5/6:636

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОСУ СЕРІЙНИХ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ ПУСКАЧІВ ЯК ФУНКЦІЯ КІЛЬКОСТІ КОМУТАЦІЙ

В.В. Коробський, кандидат технічних наук

Наведено результати досліджень зносостійкості та ерозії серійних контакт-деталей електромагнітних пускачів на основі срібла. Виявлено закономірності ерозійного руйнування розривних мостикових контактів.

Електромагнітний пускач, комутаційні випробування, мостикові контакти, контактний матеріал, електроерозійний знос, ерозійна стійкість.

Пускачі, які випускаються вітчизняною промисловістю, за своїми технічними параметрами, в основному, відповідають сучасному світовому рівню, але з урахуванням тенденцій і динаміки розвитку галузі електромагнітних пускачів за кордоном, можливе відставання за рядом параметрів від зразків іноземних фірм. Новітні вітчизняні пускачі типу ПМЛ випускаються згідно з ліцензією фірми “La Telemecanique Electrique” (Франція) [6, 8] і майже не поступаються французьким пускачам за винятком зручностей безпечного обслуговування та експлуатації (відсутня ступінь захисту IP20), мають масу та габарити в 1,5–2 рази менші, ніж у застарілих пускачів серій ПМЕ та ПАЕ. Тому, для випробування використовуються пускачі ПМЛ 1 та 2 величини, контакт-деталі яких виготовляються з матеріалу на основі срібла (СрН-90, СрМ-0,2+М1, СОК-15).

Мета досліджень – визначення закону ерозійного зносу контактів від величини сили струму та кількості комутаційних циклів.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження для серійних контакт-деталей пускачів ПМЛ-1100О_x4 (А, Б і В), ПМЛ-2100О_x4 В проводяться за методикою, яка викладена в [1, 5].

Загальна кількість комутаційних циклів увімкнення-вимкнення для всіх пускачів приймається однаковою і рівною 300 тис. Необхідні вимірювання проводяться через кожні 50 тис. комутаційних циклів. Струмові навантаження вибираються (для пускачів 1 і 2 величини), виходячи із по-

Executed modeling of process of exchange given on the radio link in the automatic checking system and account of electric power. Shown that sufficiently reliable reception and recognition given under the one-shot transmission with probability 0,9 possible at the attitude a signal/noise not less than 12.

Exchange by data, radio link, probability, automatic system, checking, account of electric power.

УДК 621.3.066.5/6:636

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОСУ СЕРІЙНИХ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ ПУСКАЧІВ ЯК ФУНКЦІЯ КІЛЬКОСТІ КОМУТАЦІЙ

В.В. Коробський, кандидат технічних наук

Наведено результати досліджень зносостійкості та ерозії серійних контакт-деталей електромагнітних пускачів на основі срібла. Виявлено закономірності ерозійного руйнування розривних мостикових контактів.

Електромагнітний пускач, комутаційні випробування, мостикові контакти, контактний матеріал, електроерозійний знос, ерозійна стійкість.

Пускачі, які випускаються вітчизняною промисловістю, за своїми технічними параметрами, в основному, відповідають сучасному світовому рівню, але з урахуванням тенденцій і динаміки розвитку галузі електромагнітних пускачів за кордоном, можливе відставання за рядом параметрів від зразків іноземних фірм. Новітні вітчизняні пускачі типу ПМЛ випускаються згідно з ліцензією фірми “La Telemecanique Electrique” (Франція) [6, 8] і майже не поступаються французьким пускачам за винятком зручностей безпечного обслуговування та експлуатації (відсутня ступінь захисту IP20), мають масу та габарити в 1,5–2 рази менші, ніж у застарілих пускачів серій ПМЕ та ПАЕ. Тому, для випробування використовуються пускачі ПМЛ 1 та 2 величини, контакт-деталі яких виготовляються з матеріалу на основі срібла (СрН-90, СрМ-0,2+М1, СОК-15).

Мета досліджень – визначення закону ерозійного зносу контактів від величини сили струму та кількості комутаційних циклів.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження для серійних контакт-деталей пускачів ПМЛ-1100О_x4 (А, Б і В), ПМЛ-2100О_x4 В проводяться за методикою, яка викладена в [1, 5].

Загальна кількість комутаційних циклів увімкнення-вимкнення для всіх пускачів приймається однаковою і рівною 300 тис. Необхідні вимірювання проводяться через кожні 50 тис. комутаційних циклів. Струмові навантаження вибираються (для пускачів 1 і 2 величини), виходячи із по-

ложення, що номінальні робочі струми пускачів: 4; 6,3; 10 А. Випробування проводяться при впливі спеціального корозивного середовища, яке складається із суміші газів $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S}$. Номінальне верхнє значення концентрації аміаку і сірководню становить відповідно 30 мг/м^3 і 25 мг/м^3 [2]. Контакт-деталі зважуються разом із контактотримачами. Випробування здійснюються для двох пускачів кожної величини відкритого виконання без теплового реле.

Обробка експериментальних даних з метою визначення математичного закону зміни маси контакт-деталей як функції наробітку проводиться за методикою, яка наведена в роботі [3]. Результати обробки і коефіцієнти інтенсивності зношування заносяться до спеціальних таблиць.

Електроерозійний знос визначається на основі зміни маси:

$$m_2 = m_1 - kn, \quad (1)$$

де m_1 – маса контакту перед початком комутаційних випробувань, г; m_2 – маса контакту після серії комутаційних випробувань, г; k – коефіцієнт інтенсивності зношування, г/цикл; n – кількість комутаційних циклів.

Результати досліджень. За результатами досліджень за спеціальними таблицями побудовано залежності електроерозійного зносу серійних контакт-деталей пускачів ПМЛ із різних контактних матеріалів (рис. 1, 2).

На рисунках 3–5 наведено фотографії серійних мостикових контактів пускачів ПМЛ. Надійність електричного контакту здебільшого визначається його складовими компонентами, структурою і властивостями поверхневих шарів, які утворюються в результаті ерозії і переносу контактного матеріалу в електричній дузі [4, 7]. При комутації змінного струму постійно змінюється полярність протікання струму через контакт і за експериментальними даними встановлено негативний (тобто зменшення маси) коефіцієнт інтенсивності електричної ерозії у нерухомих контакт-деталей (1, 2, 3, 4, 5, 6) і в рухомих (мостики 1-2, 3-4, 5-6). Але рухомі контакт-деталі зношуються інтенсивніше на 10–27%. Це явище характерне для контактів змінного струму, його можна пояснити тим, що при випробуваннях температура рухомих мостиків була вища, ніж температура нерухомих контактів, на 25–30 °С. Маса рухомого контакту мостикового типу зменшується трохи більше, ніж маса нерухомих контактів, тому що процеси при дуговій ерозії супроводжуються інтенсивнішим випаровуванням і розбризкуванням матеріалу контакт-деталі з більш високою температурою.

З наведених рисунків видно, що зі збільшенням комутуючого струму ерозійний знос збільшується і досягає свого максимального значення при струмі 10 А. Обумовлюється це тим, що із збільшенням струму в контактних процесах значну роль відіграють фактори плазмової дуги і збільшується дуговий ерозійний знос за рахунок зростання енергії електричної дуги. Причому на дугову ерозію суттєво впливає фазовий склад і структура контактного матеріалу, тому що дуговий канал закріплюється на структурних складових з низькими тепло- і електропровідністю.

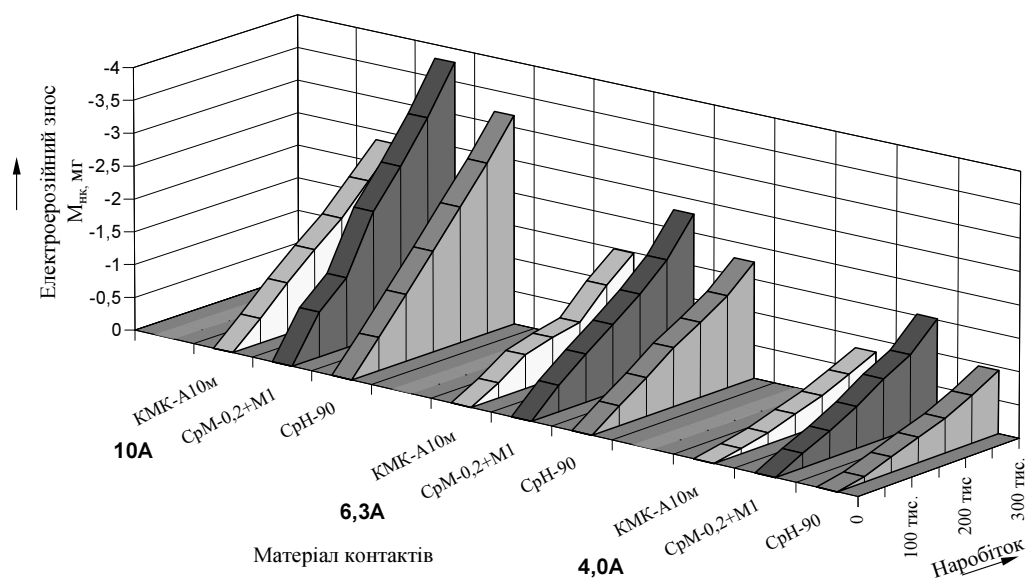


Рис. 1. Залежність електроерозійного зносу серійних нерухомих контакт-деталей пускачів ПМЛ

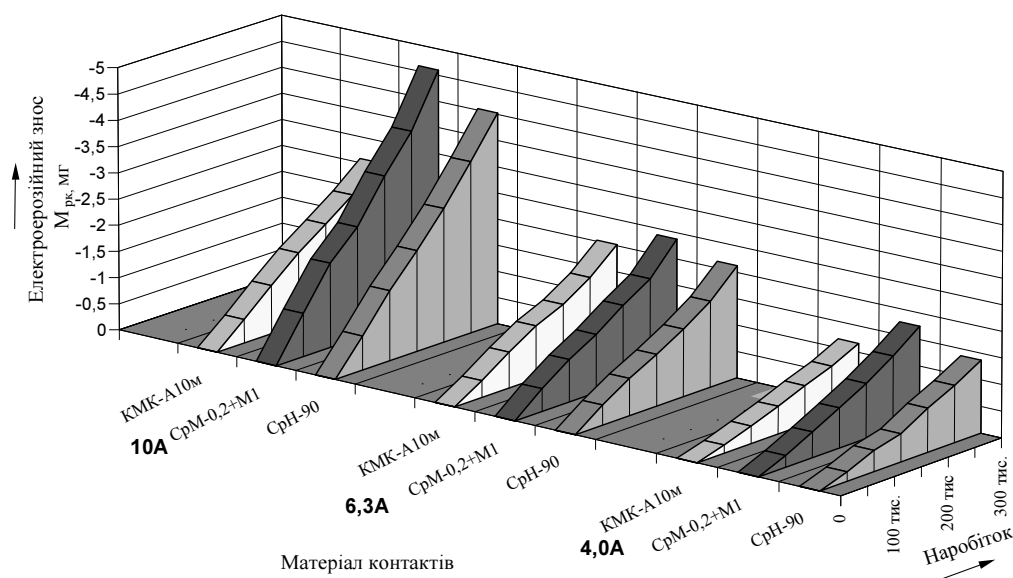
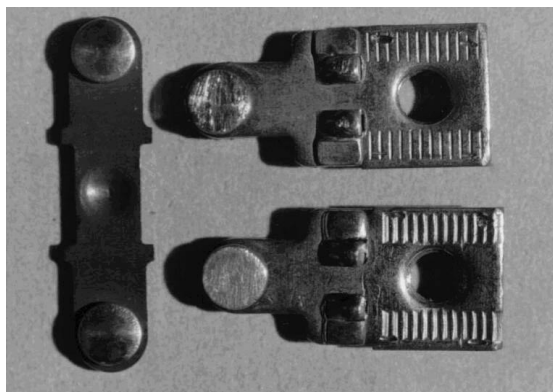
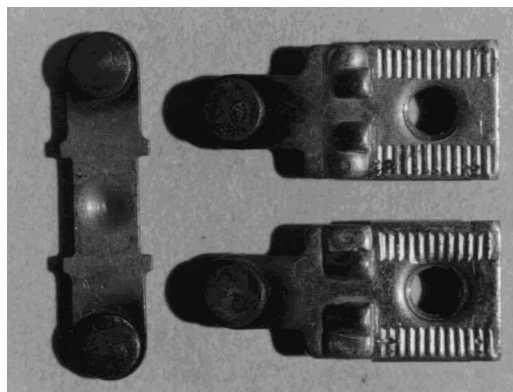


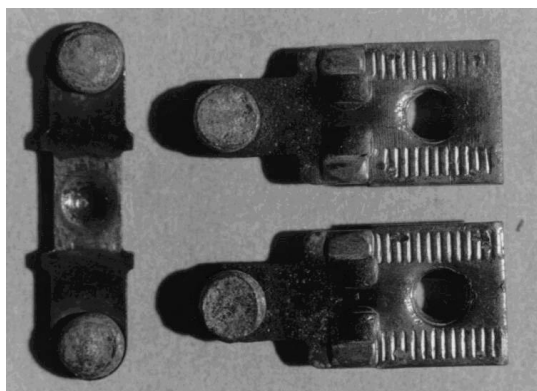
Рис. 2. Залежність електроерозійного зносу серійних рухомих контакт-деталей (мостиків) пускачів ПМЛ



а



б



б

Рис.3. Зовнішній вигляд контактів пускача ПМЛ-1100О_х4 А після наробітку:

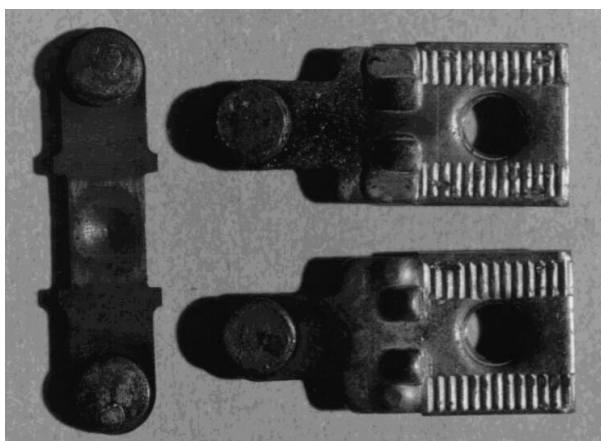
а – 0 тис. комутаційних циклів;

б – 150 тис. циклів;

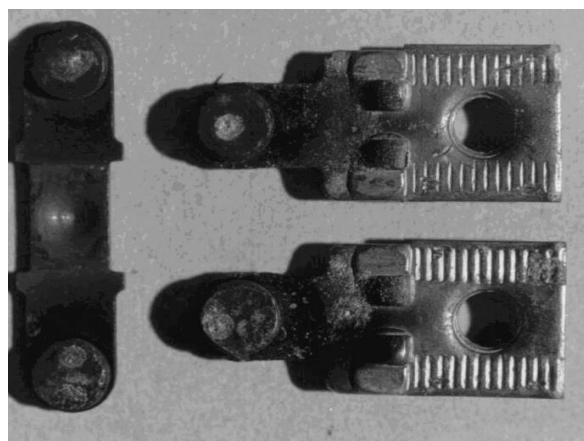
в – 300 тис. циклів.

Категорія АС-3 (U=380 В; I=10А).

Матеріал СrН-90. Збільшення у 4 рази



а

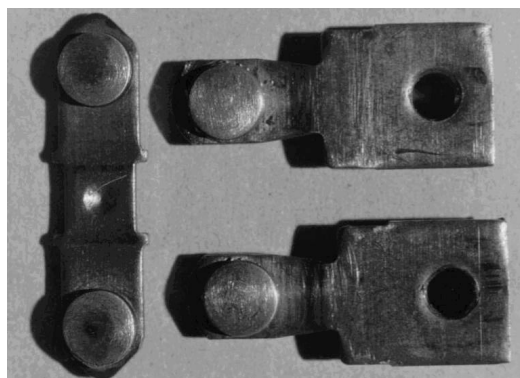


б

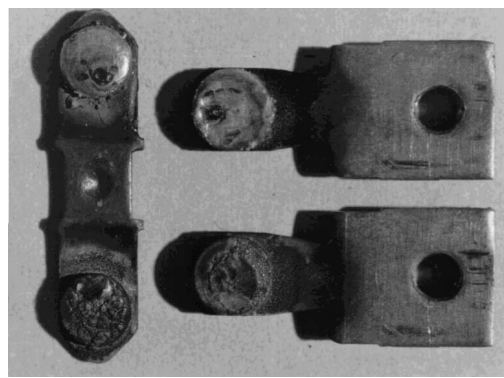
Рис.4. Зовнішній вигляд контактів пускача ПМЛ-1100О_х4 В після наробітку:

а – 150 тис. комутаційних циклів; б – 300 тис. циклів.

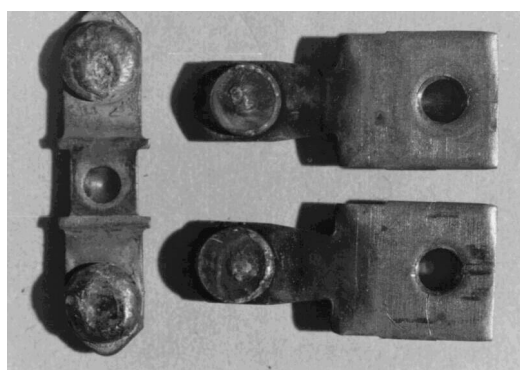
Категорія АС-3 (U=380 В; I=10А). Матеріал СrМ-0,2+М1. Збільшення у 4 рази



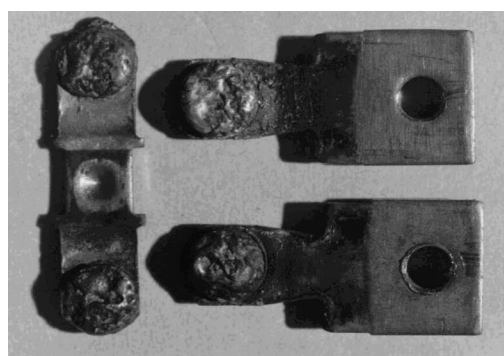
а



б



в



г

Рис.5. Зовнішній вигляд контактів пускача ПМЛ-2100О_х4 В після наробітку:
а – 0 тис. комутаційних циклів; б – 150 тис. циклів; в – 300 тис. циклів;
г – 500 тис. циклів. Категорія АС-3 (U=380 В; I=25 А). Матеріал КМК – А10м.
Збільшення у 4 рази

Найбільшу ерозійну стійкість мають контакти КМК-А10м (пускач ПМЛ 2100.В). Стійкість матеріалу КМК-А10м вища на 13–30 %, ніж контактів із матеріалу СрН-90 і на 35–45 % вища, ніж у біметалевого контакту СрМ-0,2+М1. Висока електроерозійна стійкість контактів КМК-А10м у наших дослідженнях досягається структурою матеріалу та особливостями оксиду кадмію CdO. Також дуга горить в атмосфері парів кадмію та кисню, потенціал іонізації яких вище, ніж парів Ag.

Дещо нижча електроерозійна стійкість у матеріалу СрН-90, що застосовується в пусках ПМЛ-1100О_х4 А. Матеріал СрН-90 включає в себе дві складові фази: срібло – 90 % і нікель – 10 %. Фази нікелю і срібла не змішуються ні в твердому, ні в рідкому стані. Нікель у цьому псевдосплаві підвищує зносостійкість, визначає його міцність і твердість, перешкоджає зварюванню контактів і зменшує мостикоутворення, сприяє тривкості до атмосферної корозії. При нагріванні до 500 °С нікель поступово окислюється, але оксидна плівка – тонка і слабо утримується на металі, внаслідок чого при незначних механічних зусиллях вона руйнується і не порушує електричного контакту. Тому, контакти СрН-90 зберігають металічний вигляд досить тривалий час при роботі. Ця плівка не збільшує контактний опір і під впливом контактних дуг.

Найменш ерозійностійкими є контакти з матеріалу CrM-0,2+M1 . Їх ерозійний знос в 1,4–1,6 рази більший, ніж у контактів з матеріалу КМК-А10м. У цих біметалевих контакт-деталях заклепкового типу нижній прошарок виготовляється з міді М1 і не зазнає ерозії. Робочий плакуючий прошарок виготовляється з матеріалу: $99,8\%\text{Ag}+0,1\%\text{Ni}+0,1\%\text{Cu}$. Мінімальна товщина робочого прошарку обумовлена технічними можливостями зварювального вузла холодновисадкових автоматів і становить $\approx 0,3$ мм.

Термічна дія дуги викликає випаровування і розбризкування матеріалу контактів, поверхні контакт-деталей окислюються. В процесі роботи можливі суттєві зміни в поверхневому шарі. На поверхні контактів утворюються оксиди срібла, міді, нікелю.

Висновки

1. Контакти, які працюють при номінальних струмах до 10–25 А, зазнають руйнування та ерозії в результаті впливу електричної дуги.
2. Встановлено лінійний закон ерозійного зносу контактів від величини сили струму та кількості комутаційних циклів, виявлено негативний коефіцієнт інтенсивності електричної ерозії в нерухомих і рухомих контакт-деталей. Рухомі контакти зношуються на 10–27 % інтенсивніше.
3. Ерозійна стійкість контактів з матеріалу КМК - А10м на 13–30 % вища, ніж в CrH-90 і на 35–45 % вища, ніж в CrM-0,2+M1 . У поверхневих шарах CrH-90 виявлено значну кількість тугоплавкої складової (Ni), що свідчить не тільки про першочерговість випаровування срібла, але й про наявність мостикового переносу.

Список літератури

1. Коробський В.В. Установка для експериментального дослідження електромагнітних пускатрів / Коробський В.В. // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2011. – №161. – С. 78–83.
2. Коррозионная стойкость электроконтактных материалов на основе меди в агрессивных средах / Г.Н.Братерская, В.А.Лавренко, С.П.Кохановский, В.В.Коробский // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1993. – №2. – С. 56–60.
3. Кохановский С.П. Влияние электрической дуги на работу контактов электромагнитных пускателей типа ПМЛ-1200.04 / С.П.Кохановский, В.В.Коробский// Повышение эксплуатационной надежности электрооборудования в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. тр. – К.: УСХА, 1993. – С. 108–118.
4. Мелашенко И.П. Металлокерамические размыкаемые контакты с мелкодисперстной структурой / Мелашенко И.П., Малышев В.М., Румянцев Д.В. // Электротехнические металлокерамические изделия. – М.: ВНИИЭМ, 1965. – С. 57 – 61.
5. Петин О.В. Испытание электрических аппаратов: учеб. пособие для вузов по спец. «Электрические аппараты» / О.В.Петин, Е.Ф.Щербаков. – М.: Высш. шк., 1985. – 215 с.
6. Пускатели электромагнитные низковольтные. Общие технические условия: ГОСТ 2491-82 (СТ СЭВ 5535-86). – [Введен с1983-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 22 с.

7. Справочник по электротехническим материалам. Т.3 / под ред. Ю.В.Корицкого, В.В.Пасынкова, Б.М.Тареева. – [3-е изд., перераб.] – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.

8. Экспериментальные и теоретические исследования по созданию нового поколения магнитных пускателей на токи до 160 А (перспектива до 2005 года): Отчет о НИР (закл.) / ВНИИР. - № ГР01890020984; Инв. №02890053785. - Чебоксары, 1989. – 115 с.

Приведены результаты исследований износоустойчивости и эрозии контакт-деталей электромагнитных пускателей на основе серебра. Выявлено закономерности эрозионного разрушения разрывных мостиковых контактов.

Электромагнитный пускатель, коммутационные испытания, мостиковые контакты, контактный материал, электроэрозионный износ, эрозионная стойкость.

The results of investigations deterioration of stability and erosion of the serial contact details the electromagnetic starters based on silver. The regularity of the erosion frangible bridge contacts.

The electromagnetic starter, switching tests, bridge contacts, contact material, electrical erosion wear, erosion resistance.

УДК 621.314.55(088.8)

РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ ЗВАРЮВАННЯ

***М. В. Брагіда, кандидат технічних наук
Я. О. Тримпол, студентка магістратури***

Наведено конструкцію зварювального трансформатора та запропоновано методику розрахунку параметрів обмотки регулювання струму зварювання.

Зварювальний трансформатор, тороїд, магнітопровід, обмотка регулювання, дросель.

Зварювальні трансформатори на тороїдних магнітних осердях мають суттєві переваги перед трансформаторами класичного виконання:

- зменшені втрати електричної енергії при регулюванні величини струму зварювання;
- відсутні втрати енергії магнітного поля на розсіювання;
- відсутні всякі механічні регулятори струму зварювання, а відповідно і шумові явища;

7. Справочник по электротехническим материалам. Т.3 / под ред. Ю.В.Корицкого, В.В.Пасынкова, Б.М.Тареева. – [3-е изд., перераб.] – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.

8. Экспериментальные и теоретические исследования по созданию нового поколения магнитных пускателей на токи до 160 А (перспектива до 2005 года): Отчет о НИР (закл.) / ВНИИР. - № ГР01890020984; Инв. №02890053785. - Чебоксары, 1989. – 115 с.

Приведены результаты исследований износоустойчивости и эрозии контакт-деталей электромагнитных пускателей на основе серебра. Выявлено закономерности эрозионного разрушения разрывных мостиковых контактов.

Электромагнитный пускатель, коммутационные испытания, мостиковые контакты, контактный материал, электроэрозионный износ, эрозионная стойкость.

The results of investigations deterioration of stability and erosion of the serial contact details the electromagnetic starters based on silver. The regularity of the erosion frangible bridge contacts.

The electromagnetic starter, switching tests, bridge contacts, contact material, electrical erosion wear, erosion resistance.

УДК 621.314.55(088.8)

РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ ЗВАРЮВАННЯ

***М. В. Брагіда, кандидат технічних наук
Я. О. Тримпол, студентка магістратури***

Наведено конструкцію зварювального трансформатора та запропоновано методику розрахунку параметрів обмотки регулювання струму зварювання.

Зварювальний трансформатор, тороїд, магнітопровід, обмотка регулювання, дросель.

Зварювальні трансформатори на тороїдних магнітних осердях мають суттєві переваги перед трансформаторами класичного виконання:

- зменшені втрати електричної енергії при регулюванні величини струму зварювання;
- відсутні втрати енергії магнітного поля на розсіювання;
- відсутні всякі механічні регулятори струму зварювання, а відповідно і шумові явища;

© М.В. Брагіда, Я.О. Тримпол, 2013

– зменшені масо-габаритні показники та спрощене конструктивне виконання.

Переваги досягаються відмінним від класичного технічним рішенням. У статті запропонована методика розрахунку параметрів обмотки регулювання (дроселя).

Мета досліджень – оптимізування параметрів дроселя зварювального трансформатора на тороїдних магнітопроводах.

Матеріали та методика досліджень Запропоноване нове технічне рішення зварювального трансформатора на тороїдних магнітопроводах [3] дозволило регулювати струм зварювання шляхом взаємокомпенсації складових магнітного потоку. Конструкція електрозварювального трансформатора наведена на рис. 1.

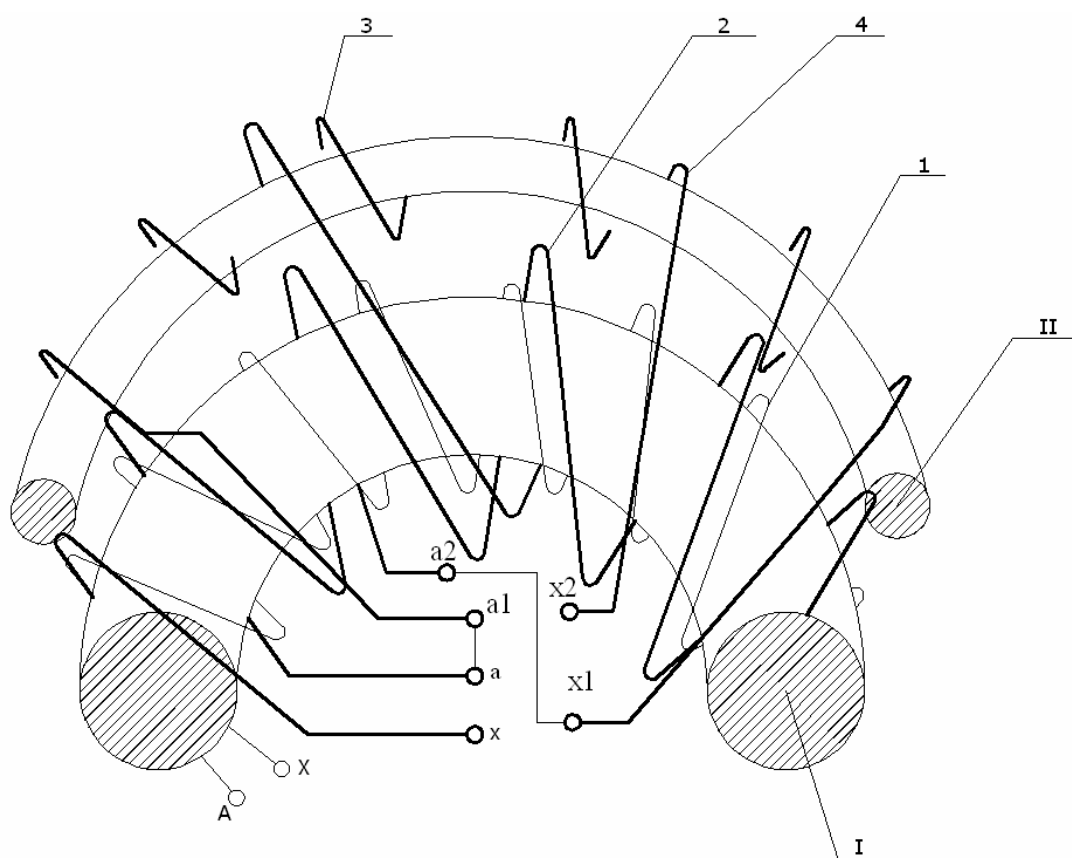


Рис.1. Конструкція зварювального трансформатора

Трансформатор складається із тороїдного магнітопроводу I, на який намотана первинна обмотка 1 (виводи А та Х) і вторинна обмотка 2 (виводи а та х). На другий тороїдний магнітопровід II, який, виходячи із теплового режиму роботи, доцільно розмістити зверху над вторинною обмоткою, намотана обмотка 3 (дросель, виводи a_1 та x_1). Виводи цієї обмотки послідовно з'єднані із вторинною обмоткою трансформатора та обмоткою зв'язку 4 (виводи a_2 та x_2), яка охоплює обидва магнітопроводи та електромагнітно впливає на режими роботи.

Розрахунок конструктивних параметрів магнітопроводу I та обмоток 1 та 2 виконуються згідно з ГОСТ 22412-77 [5], а розрахунки щодо визначення параметрів дроселя та обмотки зв'язку мають деякі особливості, які будуть розглядатися нижче.

Результати досліджень. Параметри дроселя залежать від конструкційного рішення щодо його розміщення на магнітопроводі I. Так, тороїд дроселя II можна помістити всередину магнітопроводу I або розмістити зверху. Другий варіант має переваги, оскільки покращується теплообмін.

Індуктивність дроселя залежить від чотирьох параметрів: витків обмотки $\omega_{др}$; зовнішнього та внутрішнього радіусів R_2 , R_1 тороїда та товщини магнітопроводу h . Виходячи із конструкційних міркувань, зовнішній та внутрішній радіуси сталі дроселя визначаємо із виразів

$$R_2 = R_{2тр} + h_{1об.} + h_{із.}; R_1 = R_{1тр} - h_{1об.} - h_{із.}, \quad (1)$$

де $R_{2тр}$, $R_{1тр}$ – зовнішній та внутрішній радіуси сталі трансформатора, м; $h_{1об.}$ – товщина провідників первинної обмотки, м; $h_{із.}$ – товщина шарів міжвиткової ізоляції, м.

Опір дроселя розраховуємо на максимально прийнятий струм зварювання. Подальше зменшення струму зварювання буде відбуватися за рахунок зв'язуючої обмотки. Цією позицією ця схема виконання зварювального трансформатора відрізняється від класичної, при якій дросель вибирають на мінімальний струм зварювання, а збільшення струму відбувається шляхом зменшення індуктивного опору (збільшення проміжку між магнітопроводами) дроселя.

Опір дроселя визначаємо з виразу:

$$Z = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}, \quad (2)$$

де $\dot{U}_2$ – напруга на вторинній обмотці трансформатора в момент зварювання, В. Приймаємо 20÷25 В; $\dot{I}_2$ – максимально прийнятий струм зварювання, А.

Максимальний струм зварювання розраховуємо за формулою:

$$\dot{I}_2 = K d_{ел.}, \quad (3)$$

де $d_{ел.}$ – діаметр електрода, мм; K – коефіцієнт, що залежить від марки електрода ($K = 40 \dots 60$ А/мм.).

Переріз намотувального проводу $S_{др.}$ знайдемо, задаючи питому густину струму J та максимальний струм зварювання I . Прийmemo $J = 8$ А/мм², $I = 250$ А.

$$S_{др.} = I/J. \quad (4)$$

Оскільки вторинна обмотка трансформатора, дроселя та зв'язуюча виконані мідним провідником перерізом $S = 32$ мм², то активний опір цих обмоток буде незначний і ним можна знехтувати. Тоді мінімальний індуктивний опір визначається з виразу

$$X = \omega L_{\text{др}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}, \quad (5)$$

а відповідно й індуктивність
$$L_{\text{др}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2 2\pi f}. \quad (6)$$

Знаючи індуктивність і задаючись параметрами сталі дроселя (рис.2), визначимо кількість витків [2]. Марку сталі приймемо 3411...3416, $\mu = 500 \dots 600$.

$$W_{\text{др}} = \sqrt{\frac{L_{\text{др}} 2\pi}{\mu \mu_0 h \ln \frac{R_2}{R_1}}}, \quad (7)$$

де h – висота дроселя, м; R_1 , R_2 – внутрішній та зовнішній радіуси дроселя, м.

Або
$$W_{\text{др}} = \sqrt{\frac{\dot{U}_2}{\mu \mu_0 h \dot{I}_2 f \ln \frac{R_2}{R_1}}} \quad (8)$$

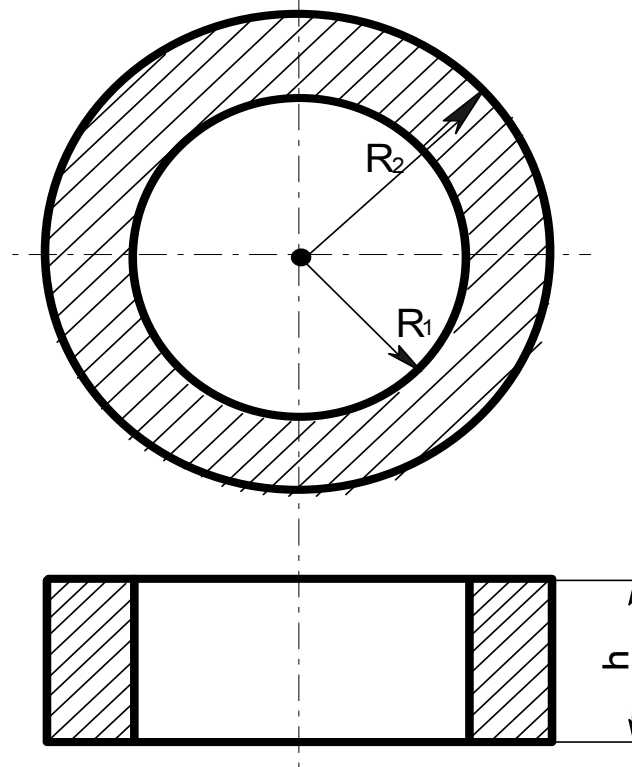


Рис. 2. Дросель зварювального трансформатора в перерізі

Значення внутрішнього радіуса дроселя R_1 доцільно виразити через кількість витків та ширину намотувального проводу. Внутрішній діаметр тороїдного магнітопроводу повинен бути таким, щоб на його колі вмістилася обмотка, тобто повинна виконуватись нерівність

$$2\pi R_1 \geq k_{ук} W_{др} b, \quad (9)$$

де $k_{ук}$ – коефіцієнт, що враховує проміжки при укладанні обмотки; при ручному намотуванні $k_{ук} = 1,2$; b – ширина намотувального проводу, м.

Задаємося висотою дроселя h і визначаємо число витків. Перевіряємо нерівність (9). Якщо нерівність справджується, то можна закінчити розрахунок. Якщо ж ні, то необхідно змінити висоту дроселя радіус R_1 і повторити розрахунок.

Так, при $R_1 = 0,034$ м; $R_2 = 0,1$ м; $h = 0,008$ м; $W_{др} = 18$ витків.
 $213 > 194$.

Висновки

Запропоновано конструкцію зварювального трансформатора, що дозволяє зменшити його масу в 2,5...3 рази, зменшити розміри до мінімально можливих, та обґрунтовано параметри дроселя залежно від конструктивного виконання.

Список літератури

1. Брагіда М. В., Тримпол Я. О. Векторний аналіз схем зварювального трансформатора на тороїдних магнітопроводах /М. В. Брагіда, Я. О. Тримпол // Науковий вісник НУБіП України. – К., 2012. – Вип. 174, ч 2. – С. 113–120.
2. Вольдек А. И. Электрические машины: [учеб. для студ. высш. техн. учеб. заведений] /А. И. Вольдек. — [2-е изд. перераб. и доп.]— Л.: Энергия, 1974. — 840 с.
3. Пат. 94540 України МПК Н 01 F 30/16/ Трансформатор для зварювання /Брагіда М. В., Гаврилюк В.В., Брагіда Є.М.; заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. – а201005756; заявл. 12. 05. 10; опубл. 10. 05 11. Бюл. №9.
4. Специальные электрические машины: [учеб. пособие для вузов] / [А. И. Бертинов, Д. А. Бут, С. Р. Мизюрин и др.]; под ред. А. И. Бертинова. — М.: Энергоиздат, 1982.—552 с.
5. Трансформаторы силовые на кольцевых магнітопроводах. Метод расчета: ГОСТ 22412-77. — [Введ. 01.07.78]. — М.: Изд-во стандартов, 1977. — 40 с.

Приведена конструкція сварочного трансформатора и предложена методика расчета параметров обмотки регулирования сварочного тока.

Сварочный трансформатор, тороид, магнитопровод, обмотка регулирования, дроссель.

The design of the welding transformer is resulted and the design procedure of parameters of a winding of regulating of a welding current is offered.

The welding transformer, toroid, magnetic circuit, regulating winding, the butterfly governor.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕРОЗІЇ ТА ПЕРЕХІДНОГО ОПОРУ СЕРІЙНИХ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ РЕЛЕ

А. М. Мрачковський, кандидат технічних наук

Розглянуто процеси виникнення електричної дуги та тривалості її горіння на контакт-деталях реле серії РПЛ-2204 і закономірності зміни електричної ерозії як функції сили струму та кількості комутацій.

Електромагнітні реле, електрична ерозія, контактний матеріал, напруга, сила струму, енергія, комутаційні апарати.

Електроерозійна стійкість контакт-деталей реле в основному визначається властивостями контактного матеріалу та параметрами електричної дуги: величиною напруги, силою струму, потужністю та енергією. Встановлення залежностей режимів роботи комутаційних апаратів при різних навантаженнях електричного кола є визначальним фактором зносостійкості контакт-деталей.

Мета досліджень - підвищення надійності роботи та зменшення зносостійкості контакт-деталей електромагнітних реле в електроустановках сільського господарства за рахунок властивостей матеріалу контактів та параметрів електричної дуги (напруги, сили струму та тривалості горіння).

Матеріали та методика досліджень. Для встановлення закономірностей зміни електричної ерозії і перехідного опору від параметрів електричної дуги та властивостей контактного матеріалу використовувались відомі і розроблені детерміновані та імовірнісні математичні та фізичні моделі контакт-деталей комутаційних апаратів.

Експериментальні дослідження в лабораторних умовах проводились на спеціальному стенді з використанням кліматичної камери. Аналіз теплових процесів на контакт-деталях здійснювався методом розв'язування нелінійної задачі теплопровідності напівнескінченного тіла з урахуванням витрат енергії.

Дослідження процесів виникнення електричної дуги та тривалості її горіння на контакт-деталях реле серії РПЛ-2204. Електроерозійна стійкість контакт-деталей реле в основному визначається властивостями матеріалу контактів та параметрами електричної дуги: величиною напруги, сили струму та тривалістю її горіння. Оскільки тривалість горіння дуги є визначальним фактором зносостійкості контакт-деталей, то було проведено осцилографування параметрів електричної дуги на контакт-деталей реле типу РПЛ-2204 при розмиканні електричного кола постійного струму.

Осцилограма процесу виникнення електричної дуги та тривалості її горіння при розмиканні електричного кола з величиною струму $I=10\text{A}$, напругою $U=64\text{В}$ і постійною часу $\tau=40\text{мс}$ наведена на рис. 1. До моменту розмикання контактів апарата $t=0$ у колі протікав струм $I=10\text{A}$ і спад напруги на контактах становив $\Delta U_k=45\text{В}$. Починаючи з часу $t=0$, опір дуги R_δ збільшується, напруга на ній U_δ – зростає, а струму I_δ – зменшується прямолінійно.

На осцилограмі напруги можна виділити три характерні етапи процесів розмикання контакт-деталей. На першому етапі контакт-деталі розходяться і в момент розриву робочих поверхонь контакт-деталей між собою, напруга миттєво збільшується від 45мВ до $13,5\text{В}$ і дуга загоряється. Потім протягом $3,5\text{ мс}$ на осцилограмі видно зменшення струму до нуля і дуга згасає. На осцилограмі спостерігається пік напруги, який виникає при погасанні дуги, внаслідок дії індуктивності $L=240\text{ мГн}$.

Процес виникнення дуги при відключенні кола, на основі отриманих осцилограм, можна проаналізувати так.

Перед початком розмикання контакт-деталей між ними створюється один або декілька мостиків із рідкого металу розміром у декілька мікрон. За час менше $1\text{-}2\text{ мкс}$ після початку розмикання вершини мостиків вибухають під дією джоулевого тепла і створюється напруженість електричного поля величиною $10^{-8}\text{-}10^{-9}\text{В/м}$, яка підтримує провідність у газовому розряді.

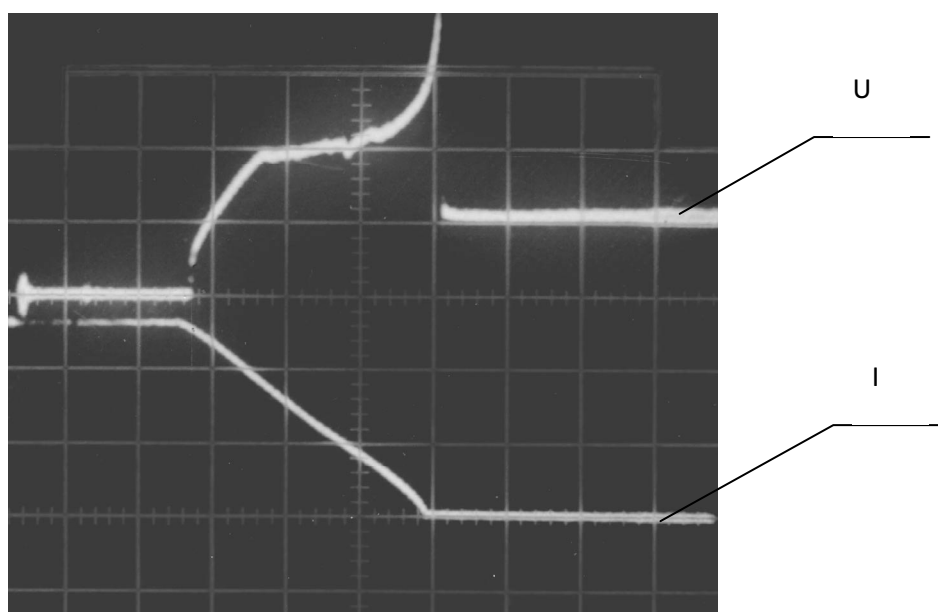


Рис. 1. Осцилограма струму і напруги в дузі між контакт-деталлями реле РПЛ-2204 при розмиканні електричного кола постійного струму з параметрами: $U=65\text{ В}$; $I=10\text{ А}$; $L=240\text{ мГн}$. Час горіння дуги $t=35\text{ мс}$

Напруга на контакт-деталях є безперервно зростаючою функцією часу і визначення величини сили струму в дузі, тривалості її горіння можливе при рішенні рівняння електричного кола з дугою:

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + U_{\partial}, \quad (1)$$

де: U – напруга джерела живлення, В; R – активний опір кола, Ом;
 L – індуктивність, Гн; I – струм електричного кола, А; U_{∂} – напруга дуги, В; t – час горіння дуги, с; dI/dt – швидкість зміни струму в дузі, А/с.

Рішення рівняння (1) дає закономірність зміни струму в дузі. З осцилограми (рис. 1) видно, що напруга в дузі змінюється за такою залежністю:

$$U_{\partial} = U_{\partial 0} + \kappa t, \quad (2)$$

де: $U_{\partial 0}$ – напруга запалювання дуги, В; κ – коефіцієнт, що залежить від матеріалу та відстані між контакт-деталлями, постійної часу τ і величини сили струму I ; t – час горіння дуги, с.

Після підстановки формули (2) у рівняння (1) отримаємо:

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + U_{\partial 0} + \kappa t. \quad (3)$$

Знаходження сили струму із виразу (3) проводиться так.

Приймаємо $I=xy$; $\frac{dI}{dt} = x \frac{dy}{dt} + y \frac{dx}{dt}$. Тоді:

$$\begin{aligned} U &= Rxy + L \left(x \frac{dy}{dt} + y \frac{dx}{dt} \right) + U_{\partial 0} + \kappa t = \\ &= Rxy + Lx \frac{dy}{dt} + Ly \frac{dx}{dt} + U_{\partial 0} + \kappa t. \end{aligned} \quad (4)$$

Приймаємо, що:

$$Rxy + Ly \frac{dx}{dt} = 0; \quad Rx + L \frac{dx}{dt} = 0; \quad x = e^{\frac{Rt}{L}} = e^{\frac{t}{\tau}}. \quad (5)$$

Тоді отримаємо:

$$U = Lx \frac{dy}{dt} + U_{\partial 0} + \kappa t; \quad U = Le^{\frac{t}{\tau}} \frac{dy}{dt} + U_{\partial 0} + \kappa t. \quad (6)$$

Звідси, маємо:

$$y = \int \frac{(U - U_{\partial 0} - \kappa t)e^{-\frac{t}{\tau}} dt}{L} = \frac{U}{R} e^{\frac{t}{\tau}} - \frac{U_{\partial 0}}{R} e^{\frac{t}{\tau}} - \frac{\kappa t}{R} e^{\frac{t}{\tau}} + \frac{\kappa \tau}{R} e^{\frac{t}{\tau}} + C. \quad (7)$$

Тоді:

$$\begin{aligned} I = xy &= e^{\frac{t}{\tau}} \left(\frac{U}{R} e^{\frac{t}{\tau}} - \frac{U_{\partial 0}}{R} e^{\frac{t}{\tau}} - \frac{\kappa t}{R} e^{\frac{t}{\tau}} + \frac{\kappa \tau}{R} e^{\frac{t}{\tau}} + C \right) = \\ &= \frac{U}{R} - \frac{U_{\partial 0}}{R} - \frac{\kappa t}{R} + \frac{\kappa \tau}{R} + Ce^{\frac{t}{\tau}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Визначимо постійну інтегрування C , беручи до уваги, що при $t=0$ контакт-деталі замкнуті і струм дорівнює номінальному струму електричного кола: $I=I_0$. Отже:

$$I_0 = \frac{U}{R} - \frac{U_{\partial 0}}{R} - \frac{\kappa t}{R} + \frac{\kappa \tau}{R} + C \Rightarrow C = \frac{U_{\partial 0}}{R} - \frac{\kappa \tau}{R}. \quad (9)$$

У вираз (8) підставляємо формулу (9) та отримуємо:

$$\begin{aligned} I &= \frac{U}{R} - \frac{U_{\partial 0}}{R} - \frac{\kappa t}{R} + \frac{\kappa \tau}{R} + \left(\frac{U_{\partial 0}}{R} - \frac{\kappa \tau}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} = \\ &= I_0 \left(1 - \frac{\kappa t}{U} \right) - I_0 \left(\frac{U_{\partial 0} - \kappa \tau}{U} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Як видно з рівняння (10) зміна сили струму в колі при розмиканні контакт-деталей залежить від величини напруги джерела струму, фізико-механічних властивостей матеріалу контакт-деталей та часу горіння дуги.

Значення часу горіння дуги t_r може бути визначено із рівняння (10) при допущенні, що $I=I_t$ (струм обриву дуги). Для срібла він становить $I_t=0,4A$. Рівняння (10) тоді зводиться до вигляду:

$$I_t = I_0 \left(1 - \frac{\kappa t_r}{U} \right) - I_0 \left(\frac{U_{\partial 0} - \kappa \tau}{U} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_r}{\tau}} \right). \quad (11)$$

Приймаємо $\alpha = \frac{I_0}{I_t}$.

Закономірності електричної ерозії як функції сили струму та кількості комутації. Відомо, що електроерозійна стійкість контакт-деталей реле залежить від величини струму, тривалості горіння дуги, кількості комутацій та фізико-механічних властивостей контактного матеріалу. Основні контактні матеріали, що використовуються в реле, наведено в таблиці.

Результати електроерозійних випробувань контакт-деталей реле РПЛ-2204 із матеріалу СрН-10 наведено на рис. 1. Матеріал СрН-10 включає дві складові фази: срібло – 90 % та нікель – 10 %. Фази нікелю та срібла не змішуються ні в твердому, ні в рідкому стані. Нікель підвищує зносостійкість, визначає міцність і твердість матеріалу, зменшує мостикоутворення при комутації струму, сприяє тривкості до атмосферної корозії. При нагріванні до 500 °С, контактний матеріал СрН-10 перетворюється в потрібну композицію: срібло-оксид нікелю-нікель з більш дрібнодисперсною структурою, ніж у вихідного матеріалу. Такий матеріал забезпечує невелику тривалість горіння електричної дуги, має позитивні функціональні характеристики дуги, але низьку теплостійкість. Це призводить до обгорання, розплавлення та зварювання контакт-деталей при високих електричних навантаженнях.

Електроерозійне руйнування матеріалу визначалося на основі зміни маси контакт-деталей, в залежності, від сили струму та кількості кому-

тацій. При комутації відбувається направлений перенос матеріалу з катода на анод (рис. 2), який пов'язаний з дугою розмикання, що виникає при бомбардуванні катода позитивно зарядженими іонами.

Для гетерогенних матеріалів встановлена закономірність закріплення дугового каналу в районі структурних складових, де полегшуються умови виникнення автоемісійних центрів. При переміщенні дуги по поверхні контакт-деталей відбувається дисипація енергії дуги і зменшується кількість теплової енергії, що поглинається матеріалом контакт-деталей. Знання закономірностей фіксації дугового каналу дозволяє цілеспрямовано конструювати структуру контактних матеріалів для отримання більш високих ерозійних характеристик.

Основні матеріали, що використовуються в контакт-деталях реле

Реле		Марка контактів	Матеріал контактів, мас%
Найменування	Тип		
Електромагнітні	РПЛ-122	СрН-10	срібло - 90 нікель – 10
	ПЭ 36, ПЭ 37, РЭП-20	СрКдІн	срібло – 72,5 кадмій – 26 індій – 1,0 мідь – 0,5
	ПЭ-4, ПЭ-5, ПЭ-9, ПЭ-10	КМК-А10	срібло – 85 кадмій – 15 срібло – 99,2
Електротеплові	РТЛ	СрМ- 0,2+М1 50БПГ	мідь – 0,5 нікель – 0,2 бор – 0,1
Приставки контактні до електромагнітних пускачів	ПКЛ-2204, ПКЛ-0404	СрН-10	срібло - 90 нікель – 10
Реле електрокар	КП-1300	КМК-А00	срібло – 100

Електронно-мікроскопічні дослідження зміни мікроструктури (рис. 3), що відбуваються на робочих поверхнях контакт-деталей під дією струмового навантаження, дозволили безпосередньо простежити за результатами впливу дуги на окремі структурні складові матеріалу. Серед них необхідно зазначити: місця контактної термічної дії дуги, ділянки термічного, механічного та втомлюючого руйнування, зони оплавлення, розбризкування та затвердіння рідкої фази срібла, ділянки осідання кристалів срібла, ділянки інтенсивної ерозії границь зерен і поверхні матеріалу.

У процесі комутації струму відбувається плавлення та інтенсивне випаровування легкоплавкої складової з робочої поверхні катода, внаслідок чого формується дисперсна, бугриста поверхня, ступінь шорсткості якої залежить від величини зерна нікелевої складової (див. рис. 3, а). У результаті дії дуги плавиться не тільки легкоплавка складові композиції – срібло, але також зерна нікелю. Поверхня анода вкрита частками дрібнодисперсного срібла, перенесеного з катода через газоподібну чи рідку фазу (див. рис. 3, б).

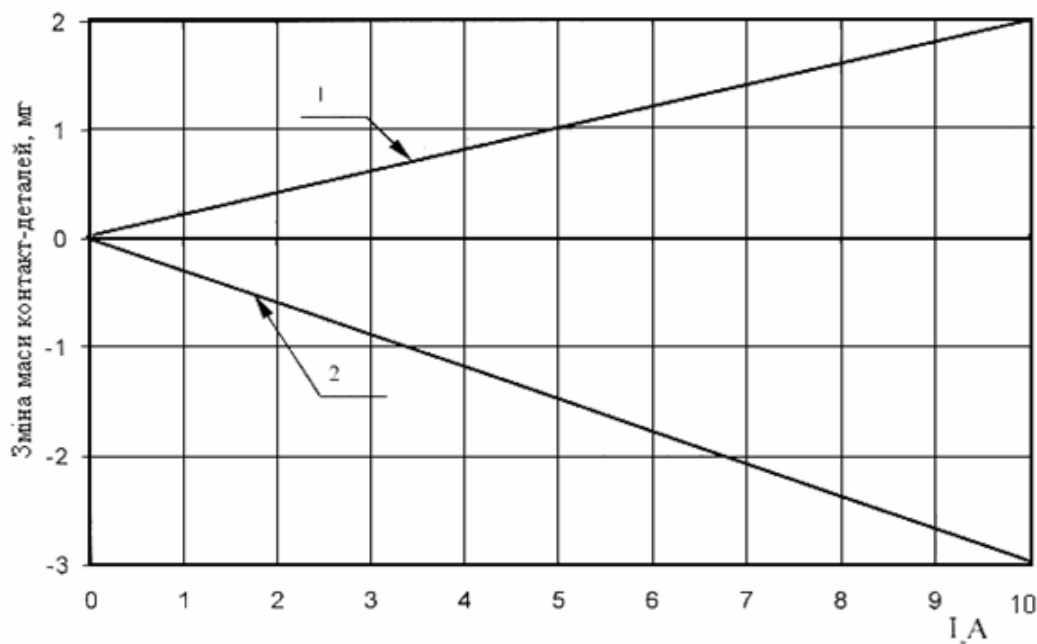
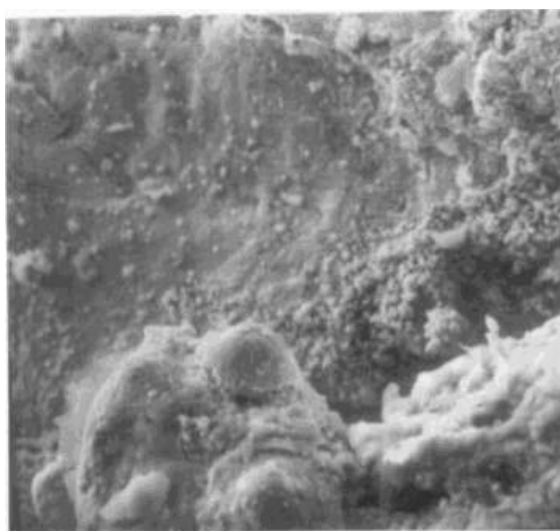


Рис.2. Залежність електричної ерозії контакт-деталей від величини комутуваного струму. Матеріал СрН-10 (90%Ag+10%Ni):
1 – анод, 2 – катод, $n=5 \cdot 10^4$ циклів комутацій

Мікроструктура контактного матеріалу СрН-10 являє собою рівномірно дрібнодисперсну суміш срібної та нікелевої фаз, частинки яких витягнулися паралельно напрямку прокатування дроту, що забезпечує анізотропність фізичних характеристик (рис. 4, а). Структура поверхневих шарів робочої поверхні змінюється при багаторазовому термічному впливу електричної дуги.



а

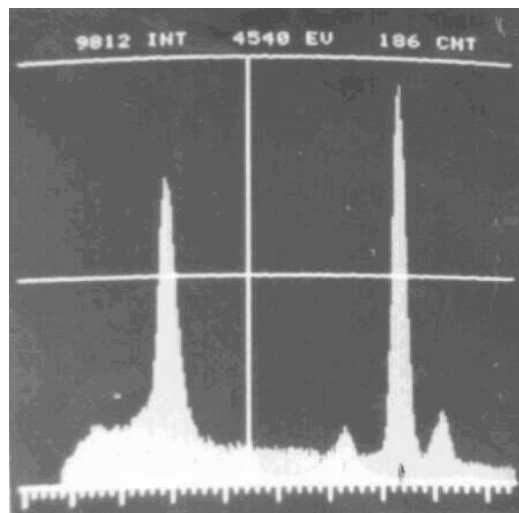


б

Рис. 3. Робоча поверхня контакт-деталей реле РПЛ-2204. Матеріал СрН-10 (90 %Ag+10 %Ni):
а – катод, б – анод, $I=10A$, $n=5 \cdot 10^4$ циклів комутацій



а



б

Рис. 4. Мікроструктура (а) та спектральний аналіз (б) контакт-деталей реле РПЛ-2204. Матеріал СрН-10 (90%Ag+10%Ni), $n=5 \cdot 10^4$ циклів комутацій

По мірі наближення до робочої поверхні розмір зерен збільшується і утворюються різні види структури в зоні дії електричної дуги. На робочій поверхні формується мікроструктура з незначним виділенням нікелю (2 % мас.) всередині легкоплавкої складової срібла. Внаслідок чого створюється висока стійкість матеріалу проти обгоряння та з низьким контактним опором. Глибина шару, в якому відбуваються мікроструктурні зміни становить приблизно 0,08-0,1мм. Як уже зазначалося, при комутації струму на робочій поверхні відбувається плавлення та випаровування легкоплавкої складової (срібла), оскільки температура випаровування срібла (2210 °С) значно нижча температури випаровування нікелю (2730 °С). Внаслідок цього і формується дисперсна нерівномірна бугриста поверхня (див. рис. 4), ступінь шорсткості якої залежить від величини струму та кількості циклів комутації. Спектральний аналіз поверхневих шарів напрацювання показав, що кількість нікелю на робочій поверхні значно збільшується (від 10 % до 20–25 %), а це є свідченням першочерговості випаровування срібла з поверхні контакт-деталі в процесі комутації струму (див. рис. 4, б).

Отримані результати дають змогу стверджувати, що контактування на поверхні із вмістом нікелю 20–25 % здійснюється по точках тугоплавкої складової (нікелю), яка і визначає схильність матеріалу до зварювання.

Кореляційний зв'язок електричної ерозії з фізико-механічними властивостями контактного матеріалу. Для визначення зв'язку електродугової ерозії з фізико-механічними властивостями металів були проведені випробування металів, які є складовими композиційних контактних матеріалів, що використовуються як у реле, так і в комутаційних апаратах напругою до 1000В. Такими металами є титан, хром, нікель, мідь, ітрій, цирконій, ніобій, молібден, срібло.

Значення електродугової ерозії визначалося при випробуваннях при величині струму $I=10$ А в різномірних парах зі сріблом та міддю, а в однорідних парах з одноіменними металами.

Результати досліджень. Отже, залежності інтенсивності ерозії анодів при випробуваннях у парі з розглянутими катодами (Ag, Cu) мають однаковий характер. Інтенсивність електроерозії анодів Δm_{ai} у металів з різними фізико-механічними властивостями неоднорідна. Саму високу інтенсивність електроерозії має ітрій. Маса анода зі срібла не зменшується, а збільшується, тобто іде направлений перенос металу з катода на анод. У різномірних парах, де катодом є срібло, маса катода зростає, що свідчить про направлений перенос матеріалу з анода на катод.

У різномірній парі, де катодом є мідь, зменшується маса як анода так і катода. Інтенсивність ерозії анода набагато вища катода. Виключенням тут є ітрій, в якого маса анода переноситься на катод.

Аналіз результатів досліджень показав, що серед випробуваних металів є такі, які мають високу ерозійну стійкість на аноді – нікель, мідь, ніобій, молібден, срібло і метали з ерозійною стійкістю на катоді – титан, цирконій, ніобій, молібден, срібло. Простежується теж така тенденція, що є метали, які проявляють високу ерозійну стійкість при будь-якій полярності, тобто є ерозієстійкими як на аноді, так і на катоді. До таких належать срібло, молібден, ніобій.

Висновки

У результаті досліджень електроерозійної стійкості, перехідного опору контакт-деталей, вивчення мікроструктури контактного матеріалу після випробувань, можна зробити такі висновки:

- встановлено, що електроерозійна стійкість контакт-деталей із матеріалу CrH-10 залежить від сили струму, тривалості горіння дуги, кількості комутацій та фізико-механічних властивостей контактного матеріалу;

- електронно-мікроскопічні дослідження мікроструктури виявили ділянки термічного, механічного та втомлюючого руйнування матеріалу. В процесі комутації струму відбувається плавлення та інтенсивне випаровування легкоплавкої складової з робочої поверхні катода, внаслідок чого формується дисперсна бугриста поверхня. Робоча поверхня анода вкрита частками дрібнодисперсного срібла, перенесеного з катода через газоподібну або рідку фазу. Спектральний аналіз поверхневих шарів на працюючому показав, що кількість нікелю на робочій поверхні катода значно збільшується, а це є свідченням першочерговості випаровування срібла з поверхні контакт-деталі в процесі комутації струму;

– результати досліджень з впливу хімічно активних реагентів навколишнього середовища на величину перехідного опору показали, що граничнодопустима концентрація аміаку, сірководню, двоокису сірки, двоокису вуглецю у повітряному середовищі тваринницьких приміщень при вологості 95–100 % підвищує перехідний опір контакт-деталей в 5–7 раз.

Список літератури:

1. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Буткевич Г.В. – М.: Энергия, 1973. – 172 с.
2. Гопкинс М.Р. Переходные процессы, мостики, микродуги и перенос металла при коммутации низковольтных цепей электрическими контактами / М.Р. Гопкинс, Р.Х. Джонс // Электротехническая пром-сть. Серия «Аппараты низкого напряжения». – 1974. – Вып. 6(37). – С. 52–56.
3. Изделия коммутационные, установочные и соединители электрические. Методы измерения сопротивления контакта, динамической и статической нестабильности переходного сопротивления контакта: ГОСТ 24606.3-82 (СТ СЭВ 3985-83). – [Введен с 1982-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 5 с.
4. Ковалева Е.В. Установка для исследования эрозии и переходного сопротивления материалов в различных средах / Е.В. Ковалева, И.В. Пархоменко // Электротехническая пром-сть. Серия «Аппараты низкого напряжения». – 1974. – Вып. 8 (39). – С. 55-61.
5. Намитокоев К.К. Проблемы эрозионных и электродных процессов в низковольтных сильноточных аппаратах и других устройствах: дис...доктора техн. наук: 05. 09.16. / Намитокоев К.К. – Харьков, 1969. – 560 с.
6. Омельченко В.Т. Исследование мостиковой эрозии электрических контактов. Омельченко В.Т. // Электрические контакты: тр. совещания (29 марта–01 апреля 1965 г.); отв. редактор Б.С. Сотсков. – М.: Энергия, 1967. – С. 82–96.
7. Разумихин М.А. Эрозионная устойчивость маломощных контактов / Разумихин М.А. – М.; Л.: Энергия, 1964. – 83 с.

Рассмотрены процессы возникновения электрической дуги и продолжительности ее горения на контакт-деталях реле серии РПЛ-2204 и закономерности изменения электрической эрозии как функции силы тока и количества коммутаций.

Електромагнітні реле, електрична ерозія, контактний матеріал, напруга, сила току, енергія, комутаційні апарати.

The processes of the electric arc and the duration of its burning on contact details relays РПЛ-2204 and the patterns of change of electrical erosion as a function of the current and the number of cycles.

Electromagnetic relays, electrical erosion, contact material, voltage, current, energy, power, switching devices.

МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

*О.І. Щепотьєв, кандидат технічних наук
А.В. Жильцов, доктор технічних наук
В.В. Васюк, аспірант**

Розглянуто питання достовірності результатів, отриманих на кожному з етапів проведення дослідження.

Достовірність, наукові дослідження, об'єкт дослідження, предмет дослідження, метод спостереження, порівняння, експеримент.

Наукове дослідження – це процес вироблення нових наукових знань, один із видів пізнавальної діяльності. Проведення наукових досліджень безумовно призводить до необхідності розв'язку питання про їх правдивість, тобто міру довіри до їх результатів, достовірність.

Мета досліджень – розкриття поняття достовірності наукових досліджень, встановлення методів доведення та шляхів забезпечення її на кожному з етапів наукових досліджень.

Матеріал і методика досліджень. *Достовірність досліджень* властивість – результатів досліджень об'єктивно відображати фактичну поведінку об'єкта досліджень.

Вона визначається великою кількістю чинників, які відображають фактичний стан об'єкта досліджень від їх початку до отримання результатів при проведенні як теоретичних, так і експериментальних досліджень.

Методи доведення достовірності можна об'єднати у три групи:

- аналітичні;
- експериментальні;
- підтвердження практикою.

Аналітичні методи є найбільш "потужними", їх сутність – доведення результату (теореми, леми, формули, закони) через математичні перетворення. Ці методи використовуються після побудови математичної моделі явища, що досліджується.

Сутність експериментальних методів перевірки достовірності полягає у відтворенні на фізичній моделі досліджуваного явища і порівнянні теоретичних та експериментальних результатів.

Достовірність наукових результатів досліджень забезпечується:

- врахуванням обґрунтованої кількості чинників, що впливають на розв'язок наукового завдання;

*Науковий керівник – доктор технічних наук А.В. Жильцов

© О.І. Щепотьєв, А.В. Жильцов, В.В. Васюк, 2013

- використанням достовірних вихідних даних, що отримані за результатами теоретичних і експериментальних досліджень;
- обґрунтованим вибором основних допущень і обмежень при формулюванні постановок наукових завдань;
- використанням сучасного, апробованого науково-методичного (математичного) апарату;
- обґрунтованим коректним вибором використаних загальних і часткових показників і критеріїв, математичних моделей;

Достовірність наукових результатів досліджень підтверджується:

- збігом результатів теоретичних і експериментальних досліджень.
- результатами математичного, фізичного моделювання, даними експериментів, натуральних випробувань;
- високою схожістю отриманих теоретичних (аналітичних) результатів з експериментальними даними, із результатами натуральних випробувань та практичного втілення;
- схожістю результатів моделювання з наявними експериментальними даними;
- отриманням із розроблених загальних наукових результатів відомих часткових наукових результатів;
- результатами дослідно-конструктивних розробок, досвідом практичного втілення пропозицій;
- результатами експериментальних випробувань технічних і організаційних рішень, що пропонуються;
- наявністю ясного фізичного трактування отриманих результатів.

У цілому вона визначається достовірністю результатів, отриманих на кожному з етапів проведення дослідження. Будь-яке наукове дослідження можна зобразити у вигляді такої логічної схеми [4]:

- обґрунтування актуальності вибраної теми;
- постановка мети і конкретних завдань дослідження;
- визначення об'єкта і предмета дослідження;
- вибір методів (методики) проведення дослідження;
- опис процесу дослідження;
- формування результатів дослідження та їх обговорення;
- формування висновків і оцінка одержаних результатів.

Обґрунтування актуальності теми починається з висвітлення проблеми, тобто суперечливої ситуації в науці, котра потребує свого розв'язку [2].

Попереднє формування проблем починається з детального вивчення функціонування системи, інформаційних потоків, реєстрації симптомів у документальній формі.

Незалежно від характеру досліджень мета завжди належить до двох категорій – стабілізації і розвитку.

Мета стабілізації спрямована на збереження або підтримку наявних ресурсів (часу, енергії, обладнання) або станів, наприклад безпеки.

Отже, їх можна назвати входами рішення. Мета розвитку спрямована на придбання ресурсів або отримання станів, які необхідно досягнути. Власне кажучи, – це виходи розв'язку. Таким чином, мету досліджень завжди можна виразити через максимізацію різниці між виходом і входом, тобто прибутку в загальному вигляді.

Реалізація можливих рішень задач призводить до отримання різних результатів. Для порівняльної оцінки якості кожного з можливих рішень необхідно обґрунтувати вибір відповідних показників або критеріїв ефективності (критеріїв оптимальності).

Показник – якісна або кількісна характеристика, яка необхідна для оцінки окремої властивості або сукупності властивостей об'єкта.

Критерій – необхідна і (або) достатня ознака, на основі якої здійснюється оцінка (класифікація або вибір об'єкта за значеннями одного критеріального показника (простий критерій) або декількох показників (складний критерій)).

Наукова задача може бути сформульована так: при заданих значеннях і характеристиках фіксованих неконтрольованих факторів $A_1, \dots, A_p, Y_1, \dots, Y_q$ з урахуванням невизначених факторів $Z_1, \dots, Z_r$ знайти оптимальне значення контрольованих факторів $X_1, \dots, X_l$ з областей $\Omega_{x1}, \dots, \Omega_{xl}$ їх припустимих значень, які за можливістю забезпечують максимальне (мінімальне) значення показника (критерію) оптимальності F .

Якщо можливе застосування лише одного показника (критерію) задача має назву однокритеріальної або одноцільової. В інших випадках мають місце багатокритеріальні (багатоцільові) задачі. Критерії оптимальності часто мають назву критеріальної або цільової функції. При виборі доцільного методу розв'язку задач використовують окремі класифікаційні ознаки:

- кількість цілей, які переслідуються при рішенні задач, і відповідних критеріїв оптимізації;
- наявність або відсутність залежності критерію оптимальності і дисциплінуючих умов від часу;
- наявність випадкових та невизначених факторів, які впливають на результат розв'язку (ознака “визначеність-ризик-невизначеність”).

За *першою класифікаційною ознакою* задачі розподіляються на два великих класи: одноцільові (однокритеріальні) та багатоцільові (багатокритеріальні) задачі.

За *другою класифікаційною ознакою* задачі розподіляються на статичні і динамічні. В статичних задачах критеріальна функція і функції обмежень не залежать від часу. В динамічних задачах, з одного боку, як критерій оптимальності звичайно є не функція, а функціонал часу, який описує поведінку деяких динамічних об'єктів. З іншого боку у складі дисциплінуючих умов присутні диференційні зв'язки як функції поведінки динамічних об'єктів у часі.

За *третьою класифікаційною ознакою* задачі розподіляються на три великі класи:

- визначення рішень в умовах визначеності, тобто детерміновані задачі;
- визначення рішень при ризику, тобто стохастичні задачі;
- визначення рішень в умовах невизначеності.

У першому випадку існує однозначний детермінований зв'язок між прийнятим розв'язком та його результатом. При цьому критерій оптимальності і дисциплінуючі умови залежні лише від фіксованих детермінованих факторів, що не контролюються, але повністю відомі оператору.

У випадку ризику (стохастичні задачі) кожний розв'язок може призвести до одного з множини можливих результатів з визначеною ймовірністю, які відомі заздалегідь.

Для обґрунтування кількісних методів проведення досліджень завжди треба будувати модель об'єкта. Звичайно застосовують моделі трьох типів: зображувальні (моделі геометричної подібності), аналогові і символічні (математичні).

У *зображувальних моделях* суттєві властивості оригінала наведені самими цими властивостями, як правило, лише в іншому масштабі.

В *аналогових моделях* набір одних властивостей застосовують для відображення цілковито інших властивостей.

У *символічних моделях* відображення змінних та співвідношення між ними здійснюється за допомогою літер, чисел та інших знаків (символів). Такі моделі мають вигляд математичних виразів (рівнянь або нерівнянь), які описують структури об'єктів, що моделюються.

Залежно від складності системи застосовують різні принципи побудови моделей: безпосередній аналіз функціонування системи, використання аналога, аналіз даних, експеримент на системі, застосування «штучної дійсності».

Для здійснення багатостороннього опису об'єкта дослідження необхідно виконати процедури фіксації його предметних сторін і синтезу цих сторін в єдине зображення об'єкта досліджень.

Об'єкт дослідження являє собою предметну галузь (предмет) науки або деяку частину предметної галузі, це процес або явище, що породжує проблемну ситуацію та обраний для вивчення.

Предмет дослідження – це сторона об'єкта, яка розглядається у дослідженні, він міститься в межах об'єкта. Об'єкт і предмет дослідження, як категорії наукового процесу, співвідносяться між собою як загальне і часткове. Багатосторонній опис об'єкта дослідження дозволяє не тільки визначити місце і роль предмета дослідження в об'єкті дослідження, а встановити взаємозв'язки з іншими сторонами цього об'єкта як цілого.

Метод – сукупність прийомів або операцій практичного або теоретичного освоєння дійсності, підпорядкованих вирішенню конкретної задачі. При цьому здійснюється порівняльна оцінка існуючих методів, які можна застосувати для проведення досліджень в умовах, що розгляда-

ються з урахуванням нових (додаткових) факторів і показників (критеріїв).

До методів теоретичного дослідження [3] належать абстрагування, аналіз і синтез, індукція і дедукція, моделювання, системний підхід, декомпозиція, історичний метод, метод аналітичних досліджень (лінійне програмування, динамічне програмування, аналіз вхідних і вихідних сигналів, статистика і теорія ймовірностей, теорія масового обслуговування, теорія ігор, теорія Монте-Карло тощо). До методів емпіричного дослідження – спостереження, порівняння, вимірювання, експеримент.

Спостереження – це систематичне цілеспрямоване вивчення об'єкта досліджень. Як метод пізнання воно дає змогу отримати керівну інформацію у вигляді сукупності емпіричних тверджень. При застосуванні методу спостереження визначається вихідний об'єкт наукового дослідження.

Порівняння – це процес встановлення подібності або відмінностей предметів та явищ дійсності. При цьому можливо знайти загальні відмінності, що притаманні двом або декільком об'єктам. Порівняння може здійснюватися безпосередньо або опосередковано через оцінки з будь-яким іншим об'єктом (еталоном). У першому випадку, звичайно, отримують якісні результати (більше – менше, вище – нижче), у другому є можливості одержати кількісні характеристики.

Вимірювання – це визначення числового значення певної величини за допомогою одиниці виміру. Воно передбачає наявність об'єкта вимірювання, еталона, вимірювальних приладів, методу вимірювання.

Експеримент – це метод вивчення об'єкта, за яким дослідник активно і цілеспрямовано впливає на нього, завдяки створенню штучних умов або використанню природних умов, необхідних для виявлення відповідних властивостей.

Для забезпечення достовірності [5] результатів експерименту необхідно вирішувати ряд важливих питань:

- встановлення кількості об'єктів випробувань;
- встановлення тривалості проведення експерименту;
- встановлення умов проведення експерименту;
- встановлення обсягу, змісту і плану проведення експерименту;
- визначення показників оцінки результатів експерименту;
- визначення показників схожості результатів експерименту і теоретичних досліджень;
- розробка комплексу заходів щодо удосконалення об'єкта досліджень та ін.

Мірою достовірності є ймовірність того, що висновок про стан системи (виробу), після проведення контролю, буде вірним. Вона складається з методичної та інструментальної достовірності. Методична достовірність, в основному, залежить від повноти контролю і надійності об'єкта контролю. Повнота контролю – складова методичної достовірності, яка характеризується можливістю вияву відмов у цьому виробі при вибраному методі контролю його технічного стану. Величина повноти

контролю може бути визначена як відношення кількості інформації In_k , яку отримують у результаті контролю n_k параметрів, до апіорної ентропії об'єкта контролю $H_0(M)$.

$$H_0(M_H) = - \prod_{i \in M_H} P_i \log_2 \prod_{i \in M_H} P_i - \left(1 - \prod_{i \in M_H} P_i \right) \log_2 \left(1 - \prod_{i \in M_H} P_i \right) \quad (1)$$

H_0 – ентропія множини M_H функціональних елементів об'єкта, які не охоплені контролем n_k параметрів; P_i – ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента.

Інструментальна достовірність залежить від похибок (точності) вимірювань параметрів і відображає ступінь об'єктивності відображення результатами вимірювань параметрів дійсного технічного стану виробу.

Внаслідок похибок вимірювального засобу отримання результату контролю «у нормі» можливе у випадку, коли дійсне значення параметра знаходиться «у нормі» (подія X, X^*), а також у випадку, коли дійсне значення параметра знаходиться «не у нормі» (подія $\bar{X}, X^*$).

Аналогічно отримання результату контролю «не у нормі» можливе при здійсненні події $\bar{X}, \bar{X}^*$ або події $X, \bar{X}^*$.

Тому можна записати:

$$P(X, X^*) + P(\bar{X}, X^*) + P(\bar{X}, \bar{X}^*) + P(X, \bar{X}^*) = 1, \quad (2)$$

де $P(X, X^*)$ – ймовірність правильного висновку про працездатність системи за результатами контролю; $P(\bar{X}, X^*)$ – ймовірність «пропуску» відмови (помилка «першого роду»); $P(X, \bar{X}^*)$ – ймовірність фальшивої відмови (помилка «другого роду»); $P(\bar{X}, \bar{X}^*)$ – ймовірність правильного висновку про непрацездатність системи.

За результатами вимірювання значень параметра під час контролю можливі значні коливання результатів. У цьому випадку здійснюється апроксимація з використанням таких методів: метод вибраних точок, метод середніх, метод найменших квадратів.

Якщо на основі статистичного матеріалу необхідно перевірити гіпотезу про причетність випадкової величини (наприклад часу безвідмовної роботи двигуна) будь-якому визначеному закону розподілу, використовують міру розбіжностей, яка характеризує ступінь розбіжності між значеннями теоретичного і статистичного розподілів. На практиці найчастіше використовують критерії згоди Пірсона «критерій χ^2 » і критерії Колмогорова.

Для забезпечення достовірності необхідно обґрунтування і доказ правильності кожного розділу методики досліджень.

Методика – послідовний обґрунтований опис способу цілеспрямованого впливу на об'єкт досліджень для отримання бажаного результату [5]. До основних елементів методики дослідження належать: склад

показників і критеріїв для розв'язку наукової задачі, що розглядається, методи отримання значень показників, які розглядаються, і перевірки критеріїв, методи отримання вихідних даних для дослідження технічної реалізації, моделювання і розрахунків, обробки та подання отриманих результатів, а також методи експериментальної перевірки результатів досліджень [1].

З метою конкретизації кожного елемента методики і визначення послідовності дій для одержання бажаного результату розробляється алгоритм цілеспрямованого впливу на дослідження.

Алгоритм – суворо визначена цілеспрямована послідовність правил, виконання яких забезпечує розв'язок усіх задач цього класу.

Оцінка наукових результатів дослідження включає аналіз предмета досліджень за допомогою вибраної методики, обґрунтування (синтез) на базі результатів проведеного аналізу практичних висновків і рекомендацій, методику і результати експериментальної перевірки висновків і рекомендацій, оцінку ефективності об'єкта досліджень із застосуванням розроблених методів. Для перевірки достовірності результатів здійснюється:

- оцінка вихідної точності застосованого наукового методу;
- оцінка введених припущень і обмежень при розробці (виборі) моделі, методики алгоритму;
- оцінка похибок обчислень при реалізації розробленого алгоритму;
- порівняння отриманого розв'язку з результатами, які отримані за альтернативними методиками, алгоритмами;
- порівняння отриманого розв'язку з відомими науковими результатами, які описані в науковій літературі.

Заключним етапом наукового дослідження є висновки, котрі містять те нове і суттєве, що становить наукові і практичні результати досліджень.

Науковий результат – це знання, відповідне вимогам новизни, достовірності та практичної цінності. Наукові результати поділяють на два види: теоретико-методологічні (методики, методи, інші елементи науково-методичного апарату) і фактографічні (наукові факти, наукові рекомендації, наукові висновки). Найкращою формою наукового результату є закон або закономірність.

Обґрунтування висновків і оцінка одержаних наукових результатів включає: аналіз предмета дослідження з використанням вибраної методики дослідження, обґрунтування практичних висновків і рекомендацій, аналіз значимості і новизни висновків і рекомендацій, оцінку повноти розв'язку поставлених задач, оцінку достовірності одержаних результатів, їх порівняння з аналогічними результатами вітчизняних праць, обґрунтування потреби додаткових досліджень, оцінку ефективності запропонованих нових рекомендацій.

Результати досліджень. Отриманий новий науковий результат повинен відповідати вимогам наявності новизни, наявності дійсно науко-

вої значимості, а також нетривіальності, тобто можливості отримання такого результату з використанням відомого науково-методичного апарату. Наукова новизна результатів формується у вигляді короткої анотації щодо нового вкладу в дослідження відповідного наукового завдання. При цьому необхідно показати їх відмінність від відомих наукових результатів, а також описати ступінь новизни. Достовірність наукової новизни може бути підтверджена відомостями про те, що на ідеї, які висунуті автором, отримані авторські свідоцтва або патенти. Це підтверджує несумлінну світову новизну відповідних пропозицій автора, яка офіційно зафіксована державною патентною експертизою.

При розкритті наявності наукової значимості роботи слід розділяти результати, які є вкладом в науку і практику, і результати, які є вкладом в практику. Перші з них орієнтовані на застосування результату дослідниками і практиками, другі – на застосування тільки практиками.

Вимога нетривіальності нового наукового результату потребує здійснення складного процесу творчого наукового дослідження, яке пов'язано з подоланням стереотипів, що склалися, з відмовою від звичних схем і понять, які перешкоджають досягненню поставленої наукової задачі. При проведенні такого пошукового дослідження сукупність вибраних і запропонованих автором елементів науково-методичного апарату в їх логічному взаємозв'язку і взаємообумовленості визначає вигляд окремого наукового методу як інструмента для виконання дослідження, а конкретний спосіб проведення дослідження виявляється у тій чи іншій методиці.

Висновки

Усі нові положення, висновки, рекомендації, виведені в розділах і роботі в цілому, повинні бути обґрунтованими та достовірними. Це великою мірою визначається вибраним математичним апаратом.

Список літератури

1. Іноземцев Г.Б., Основи наукових досліджень електрифікованих технологій в аграрному виробництві. / Г.Б. Іноземцев, В.В. Козирський. – К. : ЦТІ "Енергетика і електрифікація", 2003. – 160 с.
2. Канарёв Ф.М. История научного поиска и его результаты / Ф.М. Канарёв. – М. : Краснодар, 2008. – 524 с.
3. Кэмпбелл Д. Эксперименты и квазиэксперименты / Д. Кэмпбелл. – М. : Прогресс, 1980. – 191 с.
4. Рекомендації щодо підготовки і оформлення дисертації та автореферату : метод. посіб. / під заг. ред. В. Б. Толубка. – К. : НАОУ, 2002. – 104 с.
5. Рузавин Г.И. Методология научного исследования / Г.И. Рузавин. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 1999. – 317 с.

Рассмотрены вопросы достоверности результатов, полученных на каждом этапе проведения исследования.

Достоверность, научные исследования, объект исследования, предмет исследования, метод наблюдения, сравнение, эксперимент.

*The problems of reliability of the results obtained at each stage of the study.
Accuracy, research, research object, the object of study, observation
method, comparison, and experiment.*

УДК 621.396.67

ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ УЗАГАЛЬНЕНОГО КРИТЕРІЮ ЯКОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Г.О. Мірських, О.В. Окушко, кандидати технічних наук

Наведено алгоритми побудови узагальненого критерію якості енергетичних об'єктів в умовах невизначеності. Показано, що для формування узагальненого критерію якості можна використовувати функції різних видів. Зазначено, що використання широкоживованої адитивної функції дає можливість під час формування критерію якості голівну увагу приділяти визначенню вагових коефіцієнтів.

Якість об'єкта, узагальнений критерій якості, енергетичний об'єкт, синтезуюча функція, вагові коефіцієнти.

Будь-який енергетичний об'єкт (апарат, система, процес) зазвичай характеризується значною кількістю вихідних параметрів (характеристик), що забезпечують можливість його використання за призначенням у заданих умовах. Ці вихідні параметри (споживчі характеристики) визначають різні властивості об'єкта, мають різні фізичну природу та розмірність тощо. Наприклад, електродвигун змінного струму характеризується сукупністю вихідних параметрів, які обумовлюють здатність виконання ним функцій, що визначені його призначенням за умов надійного функціонування, економічного використання енергоресурсів та сировини, а також дотримання вимог безпеки. Серед таких параметрів можна виділити: технічні (струм (I), потужність (P), $\cos \varphi$, ККД тощо) та параметри навколишнього середовища, в якому може експлуатуватися електричний двигун (відносна вологість, насиченість пилом, вид середовища, тип приміщення тощо).

Мета дослідження – побудова узагальненого критерію якості енергетичних об'єктів в умовах невизначеності із використанням вагових коефіцієнтів.

Матеріали та методика досліджень. Споживча якість енергетичного об'єкта визначається не величиною якогось окремого вихідного параметра, а всією сукупністю відповідних величин цих параметрів. Адже саме вся сукупність значень вихідних параметрів (споживчих характеристик) відрізнятиме однакові за призначенням об'єкти та визначатиме пріоритети їх використання тим чи іншим споживачем. Звичайно, що і в процесі проектування (при визначенні відповідного технічного завдання або оптимального варіанта), і в процесі організації контрольного моніто-

© Г.О. Мірських, О.В. Окушко, 2013

рингу, і під час порівняння однакових за призначенням, але різних за характеристиками енергетичних об'єктів має враховуватися саме вся сукупність їх споживчих характеристик (вихідних параметрів).

У зв'язку з наведеним постає питання щодо формування на основі сукупності вихідних параметрів енергетичного об'єкта деякого узагальненого параметра, який міг би бути критерієм якості цього об'єкта як цілісної системи. При цьому необхідно враховувати, що різні вихідні параметри, звичайно, по-різному впливають на вибір відповідного об'єкта споживачем, а отже мають і по-різному впливати на величину узагальненого критерію якості, визначаючи, так би мовити, різний за обсягом (вагою) вклад в остаточну величину цього критерію [3 – 5]. Такий узагальнений параметр (показник, критерій) якості об'єкта залежить від його первинних параметрів і, за своєю суттю, є відповідною математичною моделлю цього об'єкта.

Результати досліджень. Споживчу якість енергетичного об'єкта (як цілісну, системну категорію) можна визначити узагальненим критерієм якості (зведеним показником якості) Q , побудова якого в загальному випадку подається таким алгоритмом.

1. Вибрати функції нормування $q_i(\varphi_i(x_i))$, $i = 1, 2, \dots, m$, де m – кількість вихідних параметрів, що входять до узагальненого критерію; x_i – i -й вихідний параметр (елемент вектора вихідних параметрів – $x = (x_1, \dots, x_m)$), який визначається за деякою числовою шкалою $\varphi_i(\mathbb{R}^1)$ ($\mathbb{R}^1$ – множина дійсних чисел – одновимірний евклідів простір), що породжується безперервним строго зростаючим відображенням $\varphi: \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^1$.

За допомогою вибраних функцій нормування вихідні параметри об'єкта можна перетворити в окремі (безрозмірні) показники $q_i = q_i(\varphi_i(x_i))$, причому $q_i \in [0, 1]$.

2. Вибрати вид узагальнюючої (синтезуючої) функції:

$$Q = Q(q) = Q(q_1, q_2, \dots, q_m),$$

яка за своєю математичною суттю визначає відображення $Q: [0, 1]^m \rightarrow [0, 1]$,

m -вимірного одиничного куба $[0, 1]^m \in \mathbb{R}^m$ ($\mathbb{R}^m$ – m -вимірний евклідів простір) в одиничний відрізок $[0, 1] \in \mathbb{R}^1$.

Зважаючи на те, що вихідні параметри об'єкту по-різному впливають на узагальнюючий критерій якості, до синтезуючої функції, як це вказано вище, мають бути введені додаткові параметри, котрі визначають міру впливу (вагу) відповідного вихідного параметра на узагальнюючий критерій якості. З урахуванням цього синтезуючу функцію слід записати, як:

$$Q(q, w),$$

де $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ – вектор вагових коефіцієнтів, причому

$$\forall_i w_i \geq 0 \text{ та } w_1 + w_2 + \dots + w_m = 1 \quad (1)$$

3. Визначити вектор вагових коефіцієнтів $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$, яким синтезуюча функція $Q(q, w)$ ідентифікується однозначно.

Таким чином, для побудови зведеної оцінки якості матеріального об'єкта, що описується вектором первинних параметрів $x = (x_1, \dots, x_m)$, необхідно однозначно визначити такі математичні категорії (математичні об'єкти):

1) безперервні строго зростаючі функції:

$$y_i = \varphi_i(x_i), i = 1, 2, \dots, m,$$

що визначають шкали, за якими вимірюються вихідні параметри об'єкта;

2) функції нормування:

$$q_i = q_i(y_i) \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, m,$$

що призначені для перетворення вихідних параметрів в окремі (безрозмірні) показники;

3) синтезуючу m -вимірну функцію:

$$Q = Q(q) \in [0, 1],$$

яка і визначає вид зведеної оцінки (зведеного показника);

4) m -вимірний вектор $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ вагових коефіцієнтів, які є параметрами синтезуючої функції $Q = Q(q; w)$.

Лише після однозначного визначення всіх чотирьох вказаних математичних категорій можна отримати однозначну числову зведену оцінку – узагальнений критерій якості об'єкта. Зазначимо, що в загальному випадку кількість математичних категорій, які мають бути визначені в процесі формування узагальненого критерію якості згідно з наведеним алгоритмом сягає $2m + 2$.

На практиці зазвичай доводиться формувати узагальнений критерій якості в умовах невизначеності, яка виражається в тому, що всі вказані математичні об'єкти визначені не однозначно, а з точністю до відповідної множини. Наявність такої невизначеності призводить до того, що матеріальному об'єкту, який описується вектором первинних параметрів $x = (x_1, \dots, x_m)$, протиставляється не один узагальнений критерій якості, а

ціла множина $Q = \{Q^{(t)}, t \in T\}$ таких критеріїв.

Додатково до наведеного слід зазначити, що, як правило, первинна інформація про величини вагових коефіцієнтів є результатом експертного опитування. При цьому незалежно від кількості факторів, що впливають на узагальнений критерій якості судження щодо величини їх впливу, тобто щодо величини вагових коефіцієнтів будуть різнитися. Тут доречно згадати слова Мішеля Монтеня [2]: "Ніколи не існувало двох цілком однакових суджень, точно так як один волос не буває схожим на інший і

одне зерно на інше. Найбільш стала властивість всіх людських суджень полягає в їх несхожості.” Розбіжності в оцінках явищ та об’єктів навколишнього середовища обумовлені не тотожністю сприймання цих явищ та об’єктів різними людьми [1]. Тому визначення величини вагових коефіцієнтів передбачає, з одного боку, узагальнення відповідних суджень експертів, а, з другого, – актуалізує задачу розроблення розрахункових алгоритмів (алгоритмів об’єктивізації) формування таких коефіцієнтів.

За таких умов, звичайно, вказана (первинна) інформація щодо значень вагових коефіцієнтів носитиме нечисловий характер, подається висловлюваннями (судженнями експертів) типу:

- не можна навести ніякої інформації, яка б якимось чином сприяла визначенню пріоритету часткових показників якості q_i ;

- всі часткові показники q_i однаково важливі; тобто жоден з часткових показників не може бути визнаним більш пріоритетним відносно будь-якого іншого часткового показника; це означатиме, що всі вагові коефіцієнти мають бути однакової величини;

- окремий частковий показник q_i , з точки зору використання об’єкта за призначенням, більш важливий, ніж окремий частковий показник q_j (тобто частковий показник q_i для нормальної експлуатації об’єкта має пріоритет перед частковим показником q_j , що математично можна подати як

$q_i \succ q_j$); це означатиме, що величина вагового коефіцієнта w_i має бути більша за величину вагового коефіцієнта w_j , при цьому величина кожного вагового коефіцієнта може визначатися як конкретною величиною, так і з точністю до певного діапазону можливих значень, який не перехрещується з діапазонами можливих значень інших вагових коефіцієнтів.

Спрощення задачі побудови зведеного показника якості під час розв’язання практичних задач досягається однозначним визначенням функцій перетворення вихідних параметрів об’єкта у безрозмірні часткові показники якості (q_i) та прийняттям якоїсь добре вивченої та зручної у використанні форми синтезуючої функції, наприклад адитивної. При цьому зведений показник якості (узагальнений критерій) об’єкта подається як:

$$Q(q; w) = \sum_{i=1}^m w_i q_i . \quad (2)$$

За наведених припущень у співвідношенні (2) невизначеними залишаються лише величини компонент вектора вагових коефіцієнтів.

Висновки

1. Побудова узагальненого критерію якості енергетичного об’єкта передбачає реалізацію відповідного алгоритму, який у загальному випадку складний і потребує введення визначеної кількості припущень та застережень.

2. Узагальнений критерій якості енергетичних об’єктів найчастіше подається в адитивній формі, яка (з урахуванням прозорого фізичного змісту та простоти) задовольняє більшості потреб практики при визна-

ченні якості енергетичних об'єктів різноманітного призначення та дає можливість під час аналізу якості таких об'єктів зосередити увагу виключно на розробці алгоритмів і визначенні відповідних вагових коефіцієнтів.

3. Інформація щодо значень вагових коефіцієнтів, у загальному випадку найчастіше нечислова за способом визначення, характеризується неточністю та неповнотою. Це актуалізує дослідження, спрямовані на розроблення розрахункових методів (об'єктивізацію) визначення цих коефіцієнтів.

Список літератури

1. Беркли Д. Сочинения / Д. Беркли. – М.: Мысль, 2000. – 397 с.
2. Монтень М. Опыты: Избранные главы / М. Монтень. – Ростов-на-Дону: Феникс, 1998. – 249 с.
3. Неклюдов Ю.В. О расчетном методе определения весовых коэффициентов при скаляризации векторного критерия качества / Ю.В. Неклюдов // Материалы Всероссийской НТК "Наука и образование – 2002". – М.: Москов. гос. техн. ун-т, 2002. – С. 141 – 142.
4. Ногин В.Д. Использование количественной информации об относительной важности критериев в принятии решений // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2000. – № 2. – С. 89 – 93.
5. Хованов Н.В. Модели учета неопределённости при построении сводных показателей эффективности деятельности сложных производственных систем / Н.В. Хованов, Федотов Ю.В. // Научные доклады СПбГУ. – 2006. – № 28R. – 37 с.

Приведены алгоритмы построения обобщенного критерия качества энергетических объектов в условиях неопределенности. Показано, что для формирования обобщенного критерия качества можно использовать функции разных видов. Отмечено, что использование широкоупотребляемой адитивной функции предоставляет возможность во время формирования критерия качества главное внимание уделять определению весовых коэффициентов.

Качество объекта, обобщенный критерий качества, энергетический объект, синтезирующая функция, весовые коэффициенты.

The algorithms of creation of the generalized quality criterion of power objects in the uncertainty conditions are given. The generalized criteria of object quality in indeterminacy conditions construction algorithms are considered. It is shown formations of the generalized criterion of quality it is possible to use functions of different types. Use usual additive function allows the formation of quality criteria focus on identifying weights.

Quality of the object, the generalized criterion of quality, energy facilities, synthesizing function weights.

РОБОТА КАНАЛІВ ІЗ КАСКАДОМ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ

***М.А.Палішкін, О.Т. Карпусь, А.В.Міщенко,
кандидати технічних наук***

На основі чисельного розв'язку диференціальних рівнянь Сен-Венана досліджено перехідний процес у б'єфах каналу з каскадом насосних станцій. Встановлено, що боковий відбір води з б'єфів призводить до зменшення додатних та збільшення від'ємних хвиль.

Перехідний процес в каналах з каскадом насосних станцій, математична модель, рівняння Сен-Венана.

Донині побудовано значну кількість великих магістральних каналів з каскадом насосних станцій: Каршинський, Аму-Бухарський, Саратівський, Іртиш-Караганда, Дніпро-Донбас, Дніпро-Кривий Ріг, об'єднуючий зони Північно-Кримського каналу та ін. На зазначених каналах, окрім вітрових хвиль, при запусках та зупинках насосних агрегатів виникають хвилі переміщення, характерною особливістю яких є здатність переносити значні обсяги води [3,4,8].

Мета досліджень – вивчення перехідних процесів у б'єфах великих каналів, використовуючи чисельні методи розв'язку диференціальних рівнянь Сен-Венана; з'ясування впливу довжин б'єфів, ухилу закладення його укосів на параметри хвиль переміщення; встановлення можливості використання каскадного методу регулювання для роботи насосних станцій.

Матеріали та методика досліджень. Розрахунок перехідного процесу в каналах із каскадом насосних станцій здійснений із застосуванням математичної моделі, заснованій на розв'язанні рівнянь Сен-Венана.

Встановлено, що боковий відбір води з б'єфів призводить до зменшення додатних та збільшення від'ємних хвиль. У випадку каскадного регулювання насосних станцій на каналі можуть бути застосовані схеми регулювання по верхньому б'єфу та з «перетікаючими об'ємами».

У випадку зупинки насосної станції у каналі, що підводить воду, формується додатна зворотна хвиля підпору, а в каналі, який відводить воду – пряма від'ємна хвиля – «хвиля зливу» (рис.1,а).

При пуску насосної станції (рис. 1, б) у відвідному каналі виникає додатна хвиля – «хвиля наповнення», у підвідному каналі при цьому утворюється від'ємна хвиля – «хвиля зливу». Перервна хвиля характеризується крутим, іноді майже вертикальним фронтом, викликаючи достатньо різку зміну відмітки рівня води у каналі.

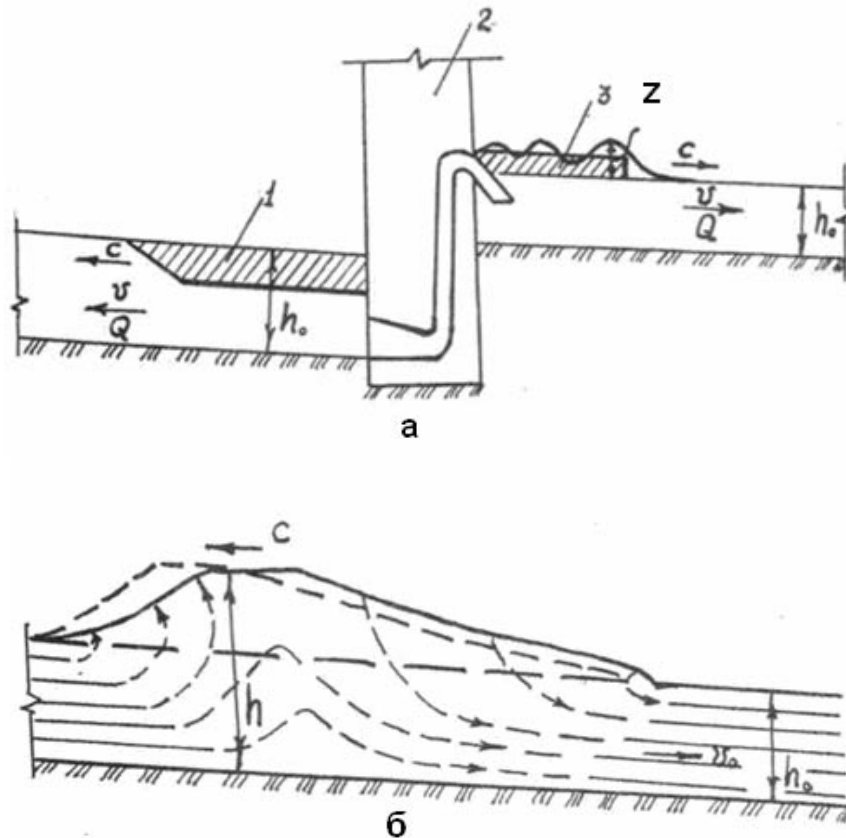


Рис. 1. Утворення хвиль переміщення при пуску насосної станції:
 а - прості хвилі; 1 – зворотна від'ємна хвиля (хвиля зливу) ; 2 – насосна станція; 3 – пряма додатна хвиля (хвиля наповнення);
 б – складні хвилі

Знання параметрів хвиль переміщення при проектуванні каналів з каскадом насосних станцій важливе з таких причин:

по-перше, повинна бути врахована висота хвиль, разом з висотою нагону, яку можна визначити за формулою Д.С.Соловйова:

$$z = 0,07w,$$

де w – швидкість вітру, м/с; z – висота хвилі за умови недопущення переливу води через дамби каналу, м;

по-друге, повинна бути врахована динаміка впливу хвиль не лише на укosi, але й на дно руслу каналу. Перервна хвиля характеризується крутим, іноді майже вертикальним фронтом, викликаючи достатньо різку зміну відмітки рівня води у каналі.

При проходженні гребеня хвилі тиск у порах ґрунту буде збільшуватися, а у западинах – зменшуватися. Тобто на ґрунт будуть впливати об'ємні, фільтраційні сили, що направлені у бік руху фільтраційної води, та призводять до зменшення опору ґрунту до розмиву та виникненню зовнішньої суфозії чи фільтраційного випору на укосах каналу.

У випадку від'ємних хвиль можлива робота насосів у кавітаційному режимі – може виникнути прорив повітря до всмоктуючих труб насосів, що призведе до зриву вакууму у сифонах водовипускної споруди. Повторна зарядка сифонів після проходження хвилі призведе до коливання

тиску у напірному тракті насосної станції та ускладненню роботи насосного обладнання.

Підвищення оперативності управління насосними станціями на каналах можна досягти, застосовуючи принцип каскадного регулювання.

Для розрахунку руху води у каналі [10] при запуску та зупиненні насосів використано метод математичного моделювання, результати якого збігаються з дослідними даними.

Як об'єкт досліджень був вибраний канал з трьома насосними станціями, що працюють у каскаді. Б'єфи між станціями мають різну довжину, що дає можливість виявити вплив довжини б'єфа на розмір та форму хвилі переміщення.

Переріз каналу – полігональний з шириною по дну $b = 4,0$ м. Коефіцієнти закладки укосів $m_1 = 4$ на висоті 2,5 м від дна та $m_2 = 2$ на інших висотах. Уклон каналу $i = 0,00008$. Укоси каналу з коефіцієнтом $m_2 = 2$ зміцнюються щебенем товщиною 20 см. Це кріплення заводиться на укоси $m_1 = 4$ (на 0,5 м нижче мінімального рівня води у каналі). Довжини б'єфів між насосними станціями: I – 4,46 км; II – 21,67 км.

Насосні станції обладнані осьовими та відцентровими насосами з подачею $9 \text{ м}^3/\text{с}$. Подача кожної насосної станції $Q = 36 \text{ м}^3/\text{с}$.

Рух води у каналі при невстановленому режимі описується рівняннями Сен-Венана[1]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2v \frac{\partial Q}{\partial x} + B(c^2 + v^2) \frac{\partial h}{\partial x} = g\omega\varphi; \quad (1)$$

$$b \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \quad (2)$$

де $\varphi = i - \frac{Q^2}{K^3}$; $c^2 = \frac{v^2}{gR}$; $Q = v\omega$; $K^2 = \frac{\omega}{h^3} R^{7/5}$; $R = \frac{\omega}{\chi}$; i – уклон дна каналу; b – ширина вільної поверхні потоку, м; χ – змочений периметр перерізу, м; h – глибина потоку в перерізі, що розглядається, м; v – середня швидкість потоку у тому ж перерізі. м/с; R – гідравлічний радіус, м; ω – площа живого перерізу, м^2 ; Q – витрата води, $\text{м}^3/\text{с}$; q – боковий притік (відтік), $\text{м}^3/\text{с}$; x – поздовжня координата, м; t – поточний час, с.

Результати досліджень. Розв'язок рівнянь (1), (2) здійснений з використанням неявної різницевої схеми. Для розв'язку задачі нелінійні рівняння (1) та (2) були подані у кінцево-різницевому вигляді в безрозмірній формі. Для їх розв'язання застосовано метод матричної прогонки, розроблений в Інституті гідродинаміки СВ АН Росії [1, 9].

У випадку порушення нерозривності течії досліджуваний канал розбивають на частини, які розраховувались, так, щоб у внутрішніх точках не порушувались умови застосування моделей, що розглядаються. Такими точками були місця відбору води з каналу. Розрахунки були виконані на ЕОМ.

Вихідні дані для розрахунку – геометричні та гідравлічні характеристики каналу, режими роботи насосних станцій та рівні води у каналі.

Відключення всіх насосів на насосних станціях каскаду (аварійна ситуація) за умови глибини каналу 4,5 м показало, що на ділянках каналу між насосними станціями має місце затухаючий процес коливань (рис.2). У насосній станції №2 відхилення рівня становило $\Delta h_1 = - 0,38$ м, а в початковому створі (насосна станція №1) $\Delta h_1 = 0,41$ м. У другому відсіку $\Delta h_n = - 0,91$ м, а в кінцевому створі $\Delta h_k = 1,0$ м, у третьому створі $\Delta h_k = 0,62$ м, $\Delta h_n = 0,64$ м.

Як видно з рис. 2 на величину відхилення рівнів впливає довжина б'єфа – чим довший б'єф, тим більші коливання рівня. Ідентична картина коливань рівня спостерігається й при відхиленні трьох, двох та одного насоса. Змінюється лише величина відхилення рівня.

Звідси видно, що найнебезпечнішими є додатні хвилі переміщення, які виникають при зупинці насосних станцій (аварійна ситуація). У цьому разі висота хвилі переміщення максимальна, тому необхідно перевіряти сухий запас каналу та стійкість кріплення його укосів.

Аналіз хвильового руху у випадку зупинки насосних станцій показав, що форма хвилі залежить від довжини каналу між насосними станціями. Чим менше довжина б'єфа, тим більш стиснутою стає початкова хвиля. Зі збільшенням довжини б'єфа початкова хвиля формується більш розтягнутою. Довжина б'єфа впливає й на час затухання коливання рівня води у б'єфі. Час затухання коливання рівня в першому б'єфі становить 120 ... 140 хв, в той же час як у двох інших б'єфах цей час більше в декілька раз.

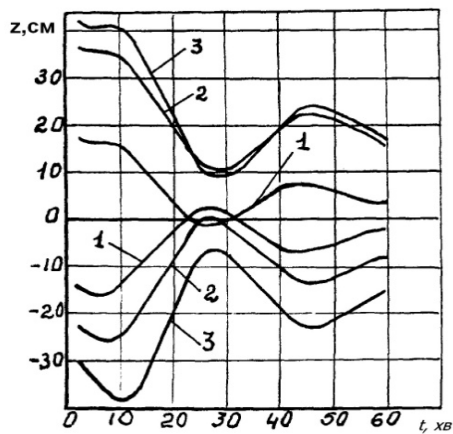
При включенні насосів на кожній станції каскаду (глибина води у каналі 4,5 м) хвилі переміщення формуються в іншому, ніж при відключенні насосних станцій (рис.3).

Як видно з рисунка, максимальна хвиля в першому б'єфі формується через 6...8 хв після включення насоса, а в другому та третьому б'єфах через 45...50 хв та 20...25 хв відповідно. Результати досліджень показали, що висота хвилі залежить від початкової витрати в каналі. Чим більше цей показник, тим вище початкова хвиля.

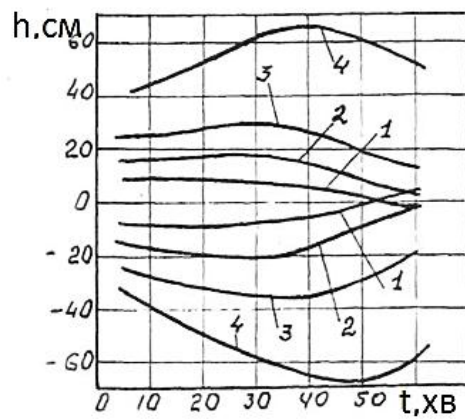
За результатами розрахунку можна проаналізувати хід рівнів води в б'єфі при відключенні попередньої та роботі наступної станції, а також розробити заходи, що виключають можливість різкого зниження рівня чи переливу води через дамби [3,4].

Послідовне включення на станціях насосних агрегатів через 10 хв, а далі через 20 хв призводить до виникнення перелому першого гребеня хвилі. Головний гребінь чи западина раптово збільшують свою величину, що може негативно вплинути на цілісність ложа каналу.

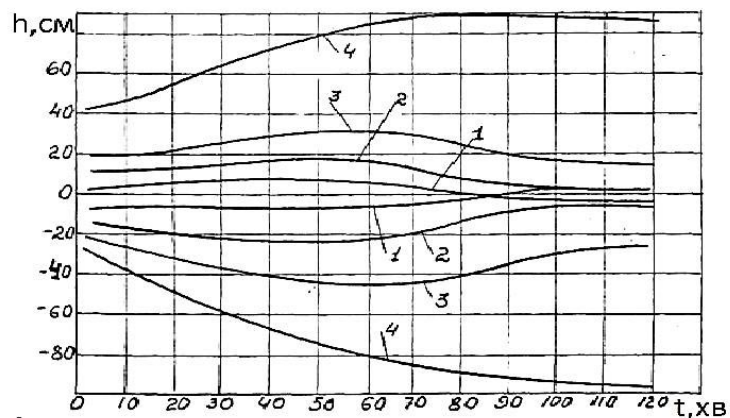
Вплив відбору води з каналу на величину хвилі переміщення показано на рис. 4.



а



б



в

Рис. 2. Динаміка коливань рівнів води в б'єфах при відключенні насосних станцій при витраті води Q , $\text{м}^3/\text{с}$:

а – б'єф 1; б – б'єф 2; в – б'єф 3; 1 – $9 \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $18 \text{ м}^3/\text{с}$; 3 – $27 \text{ м}^3/\text{с}$; 4 – $36 \text{ м}^3/\text{с}$

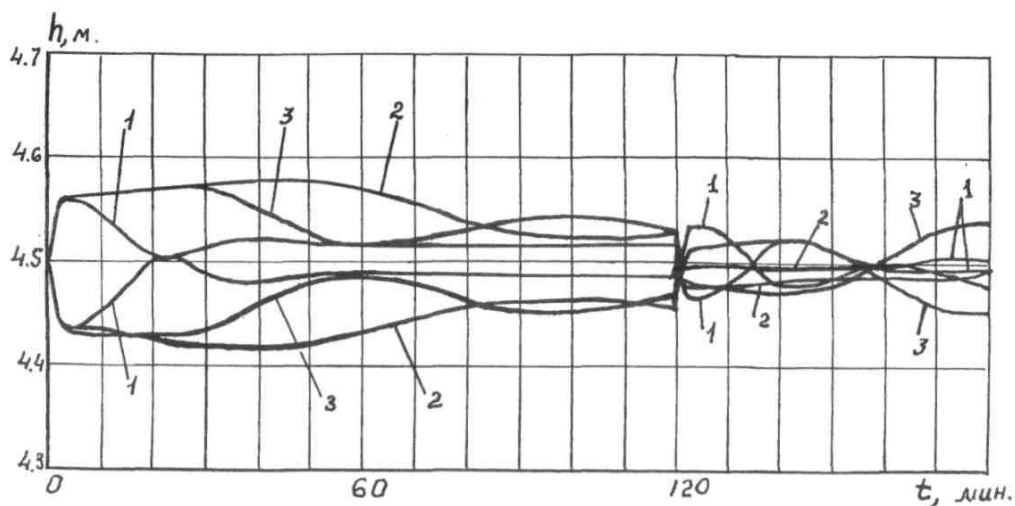


Рис.3. Динаміка коливань рівнів води в б'єфах при включенні – відключенні насосних станцій по одному насосу. Витрата води в каналі до включення насоса дорівнює $18 \text{ м}^3/\text{с}$:

1 – б'єф 1; 2 – б'єф 2; 3 – б'єф 3

Як видно з рисунка за наявності відбору води в б'єфах спостерігається зменшення додатних та збільшення від'ємних хвиль переміщення. При чому форма хвилі не змінюється у порівнянні з формою хвилі без відбору. Найбільший вплив відбору має місце при відключенні одного насоса.

Ця закономірність спостерігається при різних глибинах води у каналі. Виявлено вплив довжини б'єфа у разі відбору на величину хвилі — чим довше б'єф, тим менше вплив відбору на величину хвилі. Дослідження показали, що при розгляді хвиль переміщення слід розрізняти два принципово різних періоди: початковий, коли формується профіль хвилі, та квазівстановлений період, коли сформована хвиля переміщується без зміни профілю. Для виникнення другого (квазівстановленого) періоду необхідна достатня довжини каналу між насосними станціями.

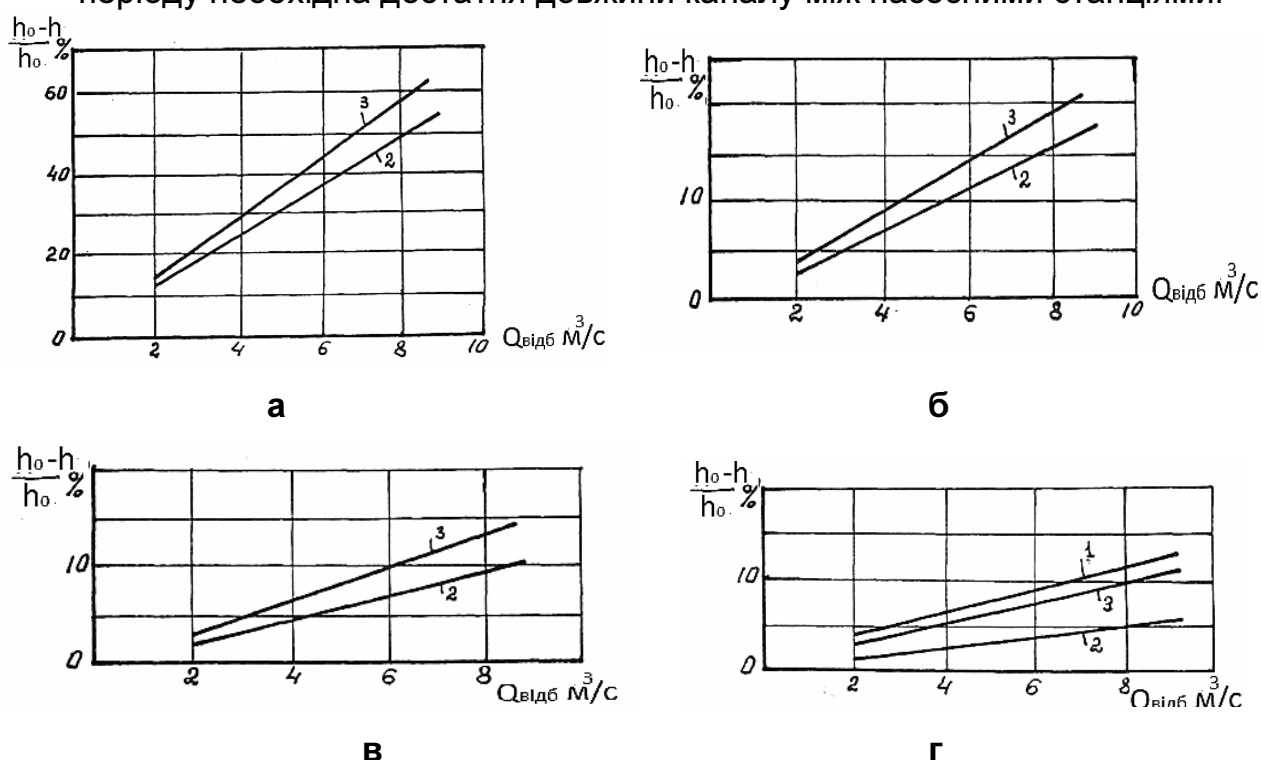


Рис. 4. Зміна висот хвилі залежно від величини відбору Q :
а – $9 \text{ м}^3/\text{с}$; б – $18 \text{ м}^3/\text{с}$; в – $27 \text{ м}^3/\text{с}$; г – $36 \text{ м}^3/\text{с}$; 1 – б'єф 1; 2 – б'єф 2; 3 – б'єф 3

Теоретичному дослідженню початкового періоду формування хвилі присвячена робота Добера та Марво, які для розв'язання задачі застосували диференціальні рівняння Буссінеска та алгоритм розв'язку за допомогою ЕОМ. Але з точки зору практики найінтенсивнішим є другий період формування хвилі, коли додатна хвиля досягає найбільшої висоти. Ця висота – 15...25 % від початкової глибини води в каналі. Наприклад, при відключенні насосної станції з'єднуючого каналу ($Q = 105 \text{ м}^3/\text{с}$) висота першого гребеня додатної хвилі складає 0,98 м, на Каршинському каналі при відключенні п'яти насосних агрегатів ($Q = 195 \text{ м}^3/\text{с}$) – 1,45 м, а на Каховському каналі ($Q=530 \text{ м}^3/\text{с}$) – 1,4 м.

Висота та форма хвилі, крім швидкості та глибини води в каналі, залежить від величини зміни витрати ΔQ , на чому наголошувалося вище. Вплив останнього фактора на висоту та форму хвилі можна охарактеризувати параметром Fr_{Δ} , що визначається за формулою [6] :

$$Fr_{\Delta} = \frac{\Delta Q}{\omega \sqrt{g \frac{\omega}{B}}}, \quad (3)$$

де ΔQ – величина зміни витрати, $\text{м}^3/\text{с}$.

Цей безрозмірний параметр чисельно характеризує зміну кількості руху в початковому створі, яка викликана зміною величини витрати, та однозначно пов'язаний з висотою виникаючої хвилі. Одночасно з цим безрозмірний параметр Fr_{Δ} визначає вплив на висоту хвилі типу встановленого на станції насосного обладнання.

Відстань від створу виникнення хвилі до створу, де закінчується її формування, можна визначити за таблицею.

Значення довжини ділянки (частки) каналу формування хвилі переміщення

Fr_{Δ}	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50
$l_1/\Delta_{\max}$	1500	950	600	400	240	150	80	50

На початкових стадіях проектування відстані до початку квазівстановленого періоду можна визначити за формулою:

$$l_1 = cT,$$

де T – час, с, протягом якого настає квазівстановлений період, визначений за формулою [2]:

$$T = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\omega}{B} \frac{c}{a_0}} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\omega}{B} \frac{dB}{d\omega} \right),$$

де $a_0 = \frac{dQ}{dt}$ – швидкість зміни витрати води в початковому створі, $\text{м}^3/\text{с}^2$; c – швидкість розповсюдження хвилі, $\text{м}/\text{с}$, яка визначається за формулою:

$$c = \sqrt{g \frac{\omega}{B} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{B}{\omega} h \right)} \pm v,$$

де h – висота хвилі м .

Для пологих хвиль (хвилі зливу та відливу) швидкість їх розповсюдження, $\text{м}/\text{с}$, можна визначити за формулою:

$$c = \sqrt{g \frac{\omega}{B}} \pm v.$$

Аналіз результатів досліджень, виконаних у галузі білякритичних течій, показав, що всі хвилі, які виникають в каналі, можуть бути приведені до хвиль так званих уособлених та кноідальних.

Можливість виникнення того чи іншого виду хвиль залежить від величини Fr_Δ [6]. Натурні дослідження на каналах з каскадом насосних станцій показали, що більш часті в них кноідальні хвилі, які є найнебезпечнішими через динамічний вплив на русло каналу.

Дослідженнями виявлено, що висота хвилі біля відкосів каналу дещо вища, ніж впродовж його осі [3].

Максимальну висоту хвилі $h_{\text{сер}}$ м, отриману на основі вищерозглянутого рішення, можна одержати, збільшивши її на величину $h_{\text{max}} = (1,3 \dots 1,35)h_{\text{сер}}$.

У випадку, коли необхідно знати не тільки максимальну висоту хвилі, але й інші її параметри, застосовують залежності, одержані А.А.Турсуновим [7]. Порівняння результатів досліджень при включенні насосного агрегату на всіх насосних станціях з подачею $Q=9 \text{ м}^3/\text{с}$ при витратах у каналі до включення насосного агрегату 9; 18 та $27 \text{ м}^3/\text{с}$ дало можливість виявити залежності висоти початкової хвилі від витрат води в каналі перед включенням насоса, тим більше висота першого гребеня хвилі (рис.5).

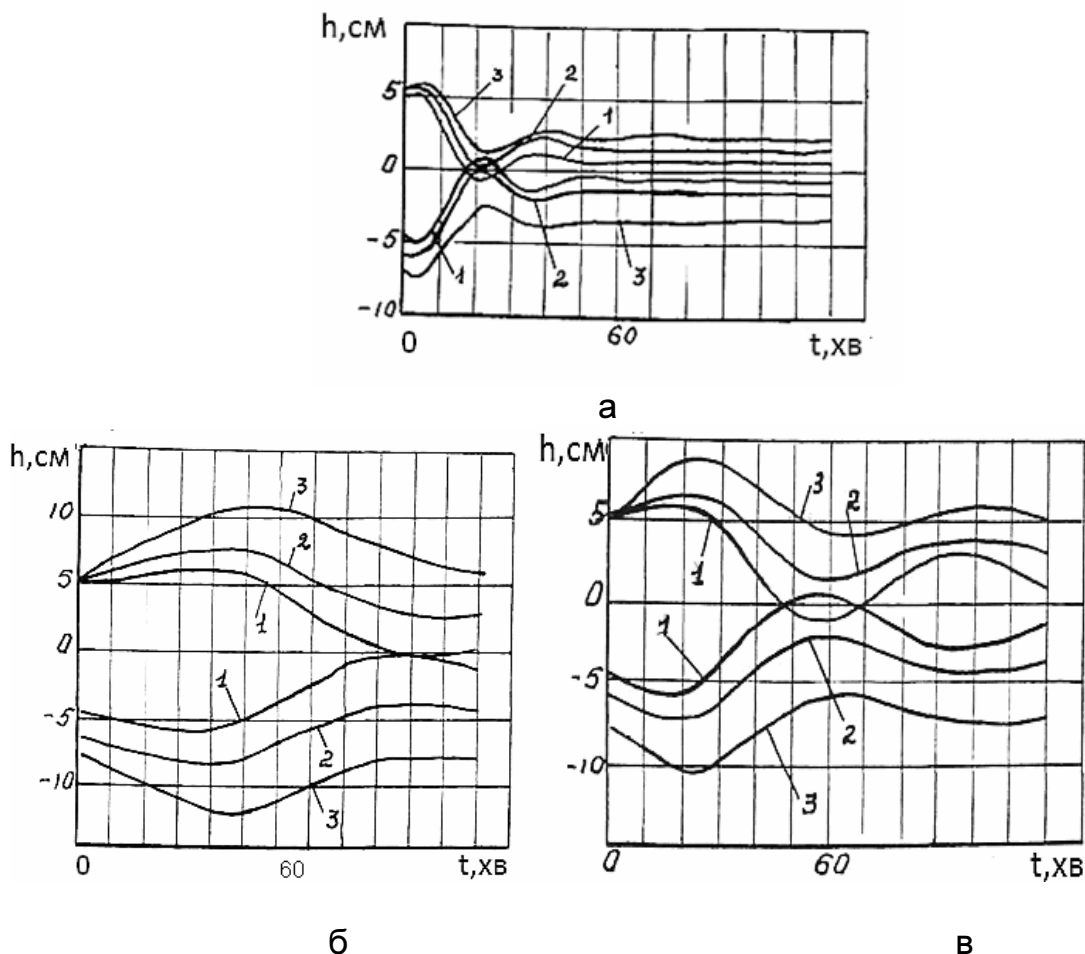


Рис. 5. Динаміка зміни рівнів у б'єфах при різних подачах насосних станцій та включенні на них по одному насосу при витраті води $Q, \text{м}^3/\text{с}$:
а – б'єф 1; б – б'єф 2; в – б'єф 3; 1 – $9 \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $18 \text{ м}^3/\text{с}$; 3 – $27 \text{ м}^3/\text{с}$

У розрахунках розглянуто питання послідовності включення насосів на станціях каскаду. Дослідження показали, що при відключенні одного з двох працюючих насосів на насосній станції №1 та роботі двох насосів на насосній станції №2 рівень води в б'єфі №1 починає знижуватися та через 60 хв зменшується на 25 см. А тому запізнення з включенням на насосній станції №2 після відключення насоса на насосній станції №1 може бути в межах 30 – 40 хв.

Зауважимо, що при інженерних розрахунках максимальних рівнів у каналах для визначення сухого запасу дамб можна застосовувати числові методи, наведені в роботі [11].

Результати досліджень динаміки рівнів у б'єфах насосних станцій при зміні режимів водо подачі показали, що в каналах з каскадом насосних станцій спостерігають більш складні гідравлічні процеси через швидші зміни витрат (за 8 хв 27 с залежно від типу насоса) порівняно зі зрошувальними каналами, де звичайно плавно регулюється водоподача шляхом відкриття чи закриття затворів перегороджуючих споруд. У зв'язку з цим реалізація схем регулювання в каналах з каскадом насосних станцій пов'язана з деякими складнощами [5, 10].

Результати досліджень. Виконані дослідження показали, що найприйнятнішими схемами регулювання є регулювання по «верхньому б'єфу» та «з постійними об'ємами».

За першою схемою регулювання включення та відключення насосних станцій здійснюється послідовно, починаючи зі станції, розташованої в кінці б'єфа. Стан рівня контролюється у верхньому б'єфі попередньої станції. Регулювання за другою схемою передбачає одночасне включення (відключення) насосних станцій на початку та в кінці б'єфа. Певний вплив на якість перехідних процесів у каналах з каскадом насосних станцій мають параметри регулювання та геометричні характеристики каналу. При автоматичній подачі в каналах з каскадом насосних станцій важливим є вибір одиничної подачі насосного агрегату, а також початковий стан потоку (буде спокійний стан води чи рівномірний рух). Наші дослідження та дослідження в роботі [11] показали, що на стан руху води в каналі при регулюванні «з постійними об'ємами» в певній мірі впливає глибина води, але менше, ніж при регулюванні по верхньому б'єфу. Дослідженнями виявлено, що при застосуванні схеми регулювання «з постійними об'ємами» розширюються можливості вибору насосних агрегатів подачі, тобто за такої схеми регулювання подача насосного агрегату мало впливає на зміну режиму рівнів у б'єфі.

Встановлено, що при проектуванні каналів з каскадом насосних станцій уклон дна каналу можна приймати близьким до нульового. Це призведе до скорочення обсягів земляних робіт.

При проектуванні каналів з каскадом насосних станцій довжина б'єфів визначається рельєфом місцевості, а уклон дна каналів встановлюється від 0,0003 до 0,00008, який як зазначалося, мало впливає на динаміку рівнів води у б'єфі. Відповідно, з геометричних характеристик лише зміна коефіцієнта закладення укосів каналу m буде впливати на хід

перехідного процесу. Питання щодо величини ємкості при регулюванні по верхньому б'єфу в першому наближенні може бути вирішено шляхом визначення мінімальної довжини б'єфа за залежністю, що враховує час добігання хвилі, викликаного включенням насосного агрегату в кінці б'єфа, до насосної станції розташованої на початку б'єфа та терміну включення насосного агрегату на початку б'єфа:

$$\frac{2}{3}mi^2l^3 + (b+2mh)il^2 - 2 \frac{lk}{\sqrt{g \frac{(b+mh)h}{b+2mh}} - v_0} - Q_{arp}t_{arp} = 0, \quad (5)$$

де l – мінімальна довжина б'єфа, м; t_{arp} – час включення насосного агрегату в роботу, с; k – коефіцієнт, рівний 1,1 ... 1,5; Q_{arp} – подача насосного агрегату, м³/с.

Вираз (5) аналогічно залежності, яка застосовується при проектуванні каналів зрошувальних систем, де регулювання здійснюється перегороджувачими спорудами з електричним та гідравлічним приводом. Залежність (5) не враховує складну динаміку перехідних процесів, пов'язаних з роботою каскаду насосних станцій, але попередньо дає можливість призначити необхідну довжину б'єфів між станціями, яка в подальшому уточнюється розрахунками.

Для вирішення питання щодо застосування тієї чи іншої схеми регулювання в кожному конкретному випадку необхідно їх порівняння щодо динамічних властивостей та техніко-економічних показників.

При автоматизованому управлінні роботою каскаду насосних станцій важливим є рівномірне завантаження в часі насосного обладнання протягом періоду роботи. Між тим технічно це можливо здійснити для станцій з насосними агрегатами, що не мають обмеження щодо кількості включень та зупинок. Звичайно – це насосні агрегати з відносно невеликими подачами. Одне з рішень такої задачі наведено в роботі [11].

Висновки

Дослідження показали, що перехідний процес у б'єфах каналу з каскадом насосних станцій може бути розрахований за допомогою математичної моделі, заснованої на розв'язку рівнянь Сен-Венана. Встановлено, що боковий відбір води з б'єфів призводить до зменшення додатних та збільшення від'ємних хвиль. На динаміку в б'єфах при каскадному регулюванні найбільше впливає закладення укосів. При каскадному регулюванні насосних станцій на каналі можуть бути застосовані схеми регулювання по «верхньому б'єфу» та з «перетікаючими об'ємами».

Список літератури

1. Васильев О.Ф. Численный метод расчета неустановившихся течений в открытых руслах / О.Ф. Васильев, Т.А. Темньева, С.М. Шугрин // Известия АН УССР ОТН. Серия «Механика». – 1965. – №2. – С. 37–45.
2. Ведерников В.В. К расчету неустановившегося движения в открытых руслах / Ведерников В.В. – М.: АН СССР, 1947. – 145 с.

3. Заиров Х.И. Натурные исследования условий образования крутых волн перемещения в машинных каналах / Х.И. Заиров, А.А.Турсунов, Ю.М. Эшмурадов // Труды ЛПИ. – 1976. – №351. – С. 63–76.
4. Заиров Х.И. Волны перемещения в Каршинском канале и способ их гашения /Х.И.Заиров, П.П.Листовой //Доклады ВАСНИЛ. –1979.– №2. – С. 22–26.
5. Коваленко П.И. Автоматизация мелиоративных систем / Коваленко П.И. – М.: Колос, 1983. – 304 с.
6. Турсунов А.А. Образование крутых волн перемещения в больших каналах /А.А.Турсунов, Ю.М.Эшмурадов // Труды ЛПИ. – 1976. – №346. – С.73–84.
7. Турсунов А.А. Околокритическое состояние безнапорных потоков воды / Турсунов А.А // Известия ВНИИГ. – 1969.– Т. 90. – С. 201 – 203.
8. Тюменев Р.М. Защита головной части каскада насосных станций от переполнения и разрушения при отключении насосной станции / Р.М. Тюменев // Труды СНИИРИ и Средазгипроводхоза. Повышение управления гидромелиоративными системами. – Ташкент, 1985. – С. 171–183.
9. Разработка методики и программы расчетов неустановившихся движений в магистральных оросительных каналах. – Новосибирск.: Ин-т гидродинамики. 1971 – 54 с.
10. Руководство по проектированию автоматизации водораспределения на оросительных системах – М.:В/О Союзвод, 1974 – 210 с.
11. Чертоусов М.Д. Гидравлика: Специальный курс / М.Д. Чертоусов – М. – Л.: Гидроэнергопроект, 1957. – С. 391–453.

На основе численного решения дифференциальных уравнений Сен-Венана исследованы переходный процесс в бьефах канала с каскадом насосных станций. Установлено, что боковой забор воды из бьефов приводит к уменьшению положительных и увеличению отрицательных волн.

Переходный процесс в каналах с каскадом насосных станций, математическая модель, уравнения Сен-Венана.

The numerical solutions of differential equations of Saint-Venant investigated the transition process in the channel with cascading pools of pumping stations. Found that the side of the pools of water intake leads to a decrease in the positive and negative waves increase.

The transition process in channels with a cascade of pumping stations, mathematical model, the Saint-Venant equations.

УДК 631.3:621.1

ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ПТАШНИКА НА КОЛЕСАХ

В.Є. Василенков, кандидат технічних наук

Д.А. Погребний, студент магістратури

Наведено тепловий розрахунок пташника на колесах із розрахунками повітрообміну в зимову пору року за надлишком вологи і шкідливих газів, а в теплий і перехідний періоди – надлишком тепла і вологи.

© В.Є. Василенков, Д.А. Погребний, 2013

3. Заиров Х.И. Натурные исследования условий образования крутых волн перемещения в машинных каналах / Х.И. Заиров, А.А.Турсунов, Ю.М. Эшмурадов // Труды ЛПИ. – 1976. – №351. – С. 63–76.
4. Заиров Х.И. Волны перемещения в Каршинском канале и способ их гашения /Х.И.Заиров, П.П.Листойой //Доклады ВАСНИЛ. –1979.– №2. – С. 22–26.
5. Коваленко П.И. Автоматизация мелиоративных систем / Коваленко П.И. – М.: Колос, 1983. – 304 с.
6. Турсунов А.А. Образование крутых волн перемещения в больших каналах /А.А.Турсунов, Ю.М.Эшмурадов // Труды ЛПИ. – 1976. – №346. – С.73–84.
7. Турсунов А.А. Околокритическое состояние безнапорных потоков воды / Турсунов А.А // Известия ВНИИГ. – 1969.– Т. 90. – С. 201 – 203.
8. Тюменев Р.М. Защита головной части каскада насосных станций от переполнения и разрушения при отключении насосной станции / Р.М. Тюменев // Труды СНИИРИ и Средазгипроводхоза. Повышение управления гидромелиоративными системами. – Ташкент, 1985. – С. 171–183.
9. Разработка методики и программы расчетов неустановившихся движений в магистральных оросительных каналах. – Новосибирск.: Ин-т гидродинамики. 1971 – 54 с.
10. Руководство по проектированию автоматизации водораспределения на оросительных системах – М.:В/О Союзвод, 1974 – 210 с.
11. Чертоусов М.Д. Гидравлика: Специальный курс / М.Д. Чертоусов – М. – Л.: Гидроэнергопроект, 1957. – С. 391–453.

На основе численного решения дифференциальных уравнений Сен-Венана исследованы переходный процесс в бьефах канала с каскадом насосных станций. Установлено, что боковой забор воды из бьефов приводит к уменьшению положительных и увеличению отрицательных волн.

Переходный процесс в каналах с каскадом насосных станций, математическая модель, уравнения Сен-Венана.

The numerical solutions of differential equations of Saint-Venant investigated the transition process in the channel with cascading pools of pumping stations. Found that the side of the pools of water intake leads to a decrease in the positive and negative waves increase.

The transition process in channels with a cascade of pumping stations, mathematical model, the Saint-Venant equations.

УДК 631.3:621.1

ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ПТАШНИКА НА КОЛЕСАХ

В.Є. Василенков, кандидат технічних наук

Д.А. Погребний, студент магістратури

Наведено тепловий розрахунок пташника на колесах із розрахунками повітрообміну в зимову пору року за надлишком вологи і шкідливих газів, а в теплий і перехідний періоди – надлишком тепла і вологи.

© В.Є. Василенков, Д.А. Погребний, 2013

Тепловий розрахунок, пташник на колесах, повітрообмін, параметри повітря, мікроклімат приміщень.

Тепловий режим пташників є одним із вирішальних факторів, які визначають продуктивність цієї галузі тваринництва. Утримання пташенят у холодному, вологому кузові автомобіля з незадовільною вентиляцією призводить до зменшення приросту їх ваги на 20...30 % та підвищення захворюваності молодняку в 2...3 рази, а також перевитрат кормів та перевищення строків вирощування, встановлених зоотехнічними нормами. Тепловий режим пташника встановлюється в результаті теплообмінних процесів, що протікають як у середині приміщення, так і через його зовнішні огороження. Він формується під впливом систем опалення та вентиляції залежно від метеорологічних параметрів зовнішнього повітря і теплотехнічних характеристик будівельних конструкцій кузова.

Мета досліджень – детальний розрахунок локальних параметрів мікроклімату у пташнику на колесах.

Матеріали та методика досліджень. Розрахунок повітрообміну птахівничих приміщень у зимову пору року ведуть за надлишком вологи і шкідливих газів, а в теплий і перехідний періоди – надлишком тепла і вологи.

Результати досліджень. Для теплового розрахунку пташника на колесах використовували лінійні розміри автомобіля-фургона 475113 на шасі КАМАЗ.

Вихідні дані. Тип тваринницького об'єкта – пташник на колесах автомобіля-фургона 475113, модернізованого на шасі КАМАЗ, для перевезення інкубаційних яєць та добових пташенят, внутрішні розміри кузова, мм: 5320x2380x1950.

Площа підлоги кузова пташника – $S_{\text{прим.}} = 12,7 \text{ м}^2$, внутрішній об'єм приміщення – $V_{\text{буд}} = 24,74 \text{ м}^3$, вид птахів – курчата, кількість птахів у кузові – 25600 голів, вік птахів – добові, маса одного пташеняти – 40–45 г = 0,04–0,045 кг, параметри внутрішнього повітря: температура $t_{\text{в}} = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$, відносна вологість $\varphi_{\text{в}} = 70 \text{ \%}$, вологовміст $d_{\text{в}} = 18 \text{ г/кг}$, параметри зовнішнього повітря: температура $t_{\text{з}} = -9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, відносна вологість $\varphi_{\text{з}} = 70 \text{ \%}$, вологовміст $d_{\text{з}} = 0,5 \text{ г/кг}$.

Повітрообмін, необхідний для видалення зайвого вуглекислого газу, визначається за формулою:

$$L_{\text{CO}_2} = \frac{K_{\text{в}} n_{\text{пт}} M_{\text{пт}} C_{\text{пт}}}{C_1 - C_2}, \text{ м}^3 / \text{год},$$

де $K_{\text{в}}$ – коефіцієнт, який враховує збільшення виділень вуглекислого газу при підвищеній вологості внутрішнього повітря, $K_{\text{в}} = 1,13$; $n_{\text{пт}}$ – кількість птиці в приміщенні, $n_{\text{пт}} = 25600$ голів; $M_{\text{пт}}$ – маса птиці, кг/гол, $M_{\text{пт}} = 0,04 \text{ кг}$; $C_{\text{пт}}$ – кількість вуглекислого газу, який виділяється птицею, $C_{\text{пт}} = 2,7 \text{ л/год} \cdot \text{кг маси}$; C_1 – гранично допустима концентрація вуглекисло-

го газу в приміщенні, $C_1 = 2,5 \text{ л/м}^3$; C_2 – концентрація вуглекислого газу в атмосферному повітрі, $C_2 = 0,3 \text{ л/м}^3$;

$$L_{CO_2} = \frac{1,13 \cdot 25600 \cdot 0,04 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3}}{(2,5 - 0,3) \cdot 10^{-3}} = 1420,1 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

Обмін повітря, потрібний для видалення надмірної вологи:

$$L_W = \frac{W}{\rho(d_B - d_3)}, \text{ м}^3 / \text{год},$$

де W – вологовиділення всередині приміщення, г/год; ρ – густина повітря, $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$; d_B, d_3 – вологовміст внутрішнього і зовнішнього повітря, г/кг сухого повітря.

Сумарні вологовиділення всередині приміщення визначаємо за виразом

$$W = W_{\text{пт}} + W_{\text{вип}} + W_{\text{пос}}, \text{ г} / \text{год},$$

де $W_{\text{пт}}$ – вологовиділення птахами, г/год.; $W_{\text{вип}}$ – вологовиділення всередині приміщення з відкритих та змочених поверхонь, г/год.; $W_{\text{пос}}$ – волога, що випаровується в пташнику з посліду, г/год.

Вологовиділення птахами визначаємо за формулою:

$$W_{\text{пт}} = K_W W_I n_{\text{пт}} M_{\text{пт}}, \text{ г} / \text{год},$$

де K_W – температурний коефіцієнт виділення вологи, $K_W = 1$; W_I – виділення вологи однією птицею, $W_I = 11,85 \text{ г/год}$.

$$W_{\text{пт}} = 1 \cdot 11,85 \cdot 25600 \cdot 0,04 = 12134,4 \text{ г} / \text{год} = 12,1 \text{ кг} / \text{год},$$

Вологовиділення всередині приміщення з відкритих $W_{\text{в.п.}}$ та змочених поверхонь $W_{\text{з.п.}}$ визначаємо за формулами:

$$W_{\text{в.п.}} = \omega_{\text{в.п.}} A_{\text{в.п.}};$$

$$W_{\text{з.п.}} = \omega_{\text{з.п.}} A_{\text{з.п.}},$$

де $\omega_{\text{в.п.}}$ та $\omega_{\text{з.п.}}$ – питомі вологовиділення із відкритих та змочених поверхонь відповідно, г/(год·м²); $A_{\text{в.п.}}$ та $A_{\text{з.п.}}$ – площа відкритої та змоченої поверхні, м².

Оскільки невідомо площі відкритих поверхонь з водою в пташнику, то вологовиділення всередині приміщення визначаємо за виразом:

$$W_{\text{вип}} = 0,1 W_{\text{пт}} = 0,1 \cdot 12,1 = 1,21 \text{ кг} / \text{год}.$$

Вологу, що випаровується в пташнику з посліду, визначаємо за формулою:

$$W_{\text{пос}} = \frac{n_{\text{пт}} M_{\text{пос}} Z \phi_{\text{пос}}}{24}, \text{ г} / \text{год},$$

де $M_{\text{пос}}$ – маса посліду, який виділяє птиця за одну добу, $M_{\text{пос}} = 3 \text{ г}$; Z – коефіцієнт усушки посліду, для курей $Z = 0,7$; $\phi_{\text{пос}}$ – частка кількості посліду, яка надходить в короба для посліду, прийmemo як для кліткових батерей $\phi_{\text{пос}} = 1$; 24 – кількість годин у добі.

$$W_{\text{пос}} = \frac{25600 \cdot 0,003 \cdot 0,7 \cdot 1}{24} = 2,24 \text{ г} / \text{год} = 0,0022 \text{ кг} / \text{год}.$$

Тоді сумарні вологовиділення в пташнику становитимуть:

$$W = (12,1 + 1,21 + 0,0022)10^3 = 13,31 \cdot 10^3 \text{ г / год} = 0,0133 \text{ кг / год}.$$

Розраховане значення підставляємо у формулу, отримаємо:

$$L_W = \frac{0,0133 \cdot 10^3}{1,2(18 - 0,5)} = 0,633 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

Витрати вентиляційного повітря згідно з нормою мінімального повітрообміну визначаємо за формулою:

$$L_B = l n_{\text{пт}} M_{\text{пт}}, \text{ м}^3 / \text{год},$$

де l – норма мінімального повітрообміну на одну птицю для холодного періоду, $l = 100 \text{ м}^3/\text{год}$ на 1 ц живої маси, тобто $l = 1 \text{ м}^3/\text{год}$ на 1 кг живої маси птиці.

$$L_B = 1 \cdot 25600 \cdot 0,04 = 1024 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

З трьох розрахованих величин витрат вентиляційного повітря, приймаємо найбільше: $L_{\text{co}_2} = 1420,1 \text{ м}^3 / \text{год}.$

Розраховуємо кратність вентиляції за виразом:

$$n = \frac{L}{V_{\text{буд}}};$$

$$n = \frac{1420,1}{24,74} = 57,4.$$

Пропозиції щодо вибору систем опалення і притоково-витяжної вентиляції. Кузов–фургон повинен бути забезпечений регульованими системами опалення і притоково-витяжної вентиляції, які з високою точністю повинні забезпечувати регулювання температури в кузові. Притокова вентиляція може забезпечуватися відцентровими вентиляторами і знаходитися в передній частині фургона. Для підігріву притокового повітря в холодний час необхідно використовувати російський аналог підігрівача "Webasto" на дизельному паливі. Теплоносієм є низькозамерзаюча рідина. Витяжну вентиляцію треба розташувати на даху кузова-фургона, вона має складатися із осевих вентиляторів. Система подачі дизельного палива до підігрівача повинна включати окремий паливний бак (для автомобілей з бензиновим двигуном) і всю систему паливоподачі. Управління системою опалення і вентиляції виконується із кабіни водія. Температура в кузові контролюється датчиком температури. Електрозабезпечення системи опалення і вентиляції виконується від бортової мережі автомобіля.

Висновки

Наведено тепловий розрахунок пташника на колесах (кузова-фургона) на базі автомобіля 475113, модернізованого на шасі КАМАЗ, для перевезення інкубаційних яєць та добових пташенят. Проведено розрахунок системи вентиляції, в ході якого було визначено, що для нормального функціонування пташенят необхідний повітрообмін в кузові-фургоні становить $1420,1 \text{ м}^3/\text{год}$, наведено пропозиції щодо вибору сис-

тем опалення і притоково-витяжної вентиляції для створення мікроклімату у цьому пташнику на колесах.

Список літератури

1. Амерханов Р.А. Проектирование систем теплоснабжения сельского хозяйства / Р.А. Амерханов, Б.Х. Драганов; под ред Б.Х. Драганова. – Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2001. – 199 с.
2. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве / Драганов Б.Х., Кузнецов А.В., Рудобашта С.П. – М.: Агропромиздат, 1990. – 463 с.
3. Драганов Б.Х. Применение теплоты в сельском хозяйстве / Драганов Б.Х., Есин В.В., Зуев В.П. – К.: Вища шк., 1990. – 319 с.

Приведен тепловой расчет птичника на колесах с расчетами воздухообмена в зимнее время года по избытку влаги и вредных газов, а в теплый и переходной периоды – по избытку тепла и влаги.

Тепловой расчет, птичник на колесах, воздухообмен, параметры воздуха, микроклимат помещений.

Is a thermal design the house on wheels with a calculation of air in winter by excess moisture and harmful gases, and in the warm and transition - to excess heat and moisture.

Thermal design, chicken house on wheels, ventilation, air conditions, microclimate areas.

УДК 674.047

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ В АТМОСФЕРНІЙ СУШИЛЬНІЙ УСТАНОВЦІ

***О.В. Шеліманова, кандидат технічних наук
А.О. Гур'єва, студентка магістратури***

Наведено методику визначення теплонадходжень від сонячної радіації в атмосферній сушильній установці.

Сушіння, односкатна теплиця, сонячна радіація, альbedo, ступінь чорноти матеріалу.

Питання енерго - і ресурсозберігання набули особливу гостроту в Україні у зв'язку з виснаженням власних запасів органічного палива і залежністю від імпорту енергоносіїв. При створенні енергоресурсозберігаючих екологічно чистих технологій різних галузей промисловості важливу роль відіграє інтенсифікація процесів перенесення теплоти і маси.

© О.В.Шеліманова, А.О. Гур'єва, 2013

тем опалення і притоково-витяжної вентиляції для створення мікроклімату у цьому пташнику на колесах.

Список літератури

1. Амерханов Р.А. Проектирование систем теплоснабжения сельского хозяйства / Р.А. Амерханов, Б.Х. Драганов; под ред Б.Х. Драганова. – Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2001. – 199 с.
2. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве / Драганов Б.Х., Кузнецов А.В., Рудобашта С.П. – М.: Агропромиздат, 1990. – 463 с.
3. Драганов Б.Х. Применение теплоты в сельском хозяйстве / Драганов Б.Х., Есин В.В., Зуев В.П. – К.: Вища шк., 1990. – 319 с.

Приведен тепловой расчет птичника на колесах с расчетами воздухообмена в зимнее время года по избытку влаги и вредных газов, а в теплый и переходной периоды – по избытку тепла и влаги.

Тепловой расчет, птичник на колесах, воздухообмен, параметры воздуха, микроклимат помещений.

Is a thermal design the house on wheels with a calculation of air in winter by excess moisture and harmful gases, and in the warm and transition - to excess heat and moisture.

Thermal design, chicken house on wheels, ventilation, air conditions, microclimate areas.

УДК 674.047

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ В АТМОСФЕРНІЙ СУШИЛЬНІЙ УСТАНОВЦІ

***О.В. Шеліманова, кандидат технічних наук
А.О. Гур'єва, студентка магістратури***

Наведено методику визначення теплонадходжень від сонячної радіації в атмосферній сушильній установці.

Сушіння, односкатна теплиця, сонячна радіація, альbedo, ступінь чорноти матеріалу.

Питання енерго - і ресурсозберігання набули особливу гостроту в Україні у зв'язку з виснаженням власних запасів органічного палива і залежністю від імпорту енергоносіїв. При створенні енергоресурсозберігаючих екологічно чистих технологій різних галузей промисловості важливу роль відіграє інтенсифікація процесів перенесення теплоти і маси.

Нині у сільському господарстві України експлуатується велика кількість сушильних установок, найпоширенішими з яких (до 95 % загальної кількості сушарок) є конвективні сушильні установки.. Середньостатистичні дані [1] по теплових балансах конвективних сушильних установок безперервної дії показують, що на випаровування вологи з матеріалу витрачається від 20 до 60 % теплоти, підведеної до сушарки, на нагрів матеріалу 5–25 %, втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом складають 15–40 %, втрати теплоти через огорожувальні конструкції 3–10 %, інші теплові втрати 5–20 %. Для сушарок періодичної дії остання стаття витрат енергії зростає до 30–35 %. Таким чином, тепловий ККД більшості установок низький (12–60 %), тому перспективними напрямками досліджень є глибокий аналіз фізичної суті процесів сушіння та методів їх організації для визначення способів підвищення теплової економічності сушильних установок.

Одним із можливих шляхів зменшення енергозатрат при попередньому підсушуванні вологого матеріалу є використання атмосферної сушарки, в якій підведення теплоти відбувається за рахунок природної конвекції,

Мета дослідження – розробка методики визначення теплонадходжень від сонячної радіації в такій сушильній установці.

Матеріали та методика досліджень. Як атмосферну сушарку можна використовувати односкатну теплицю. Схема такої сушарки наведена на рисунку.

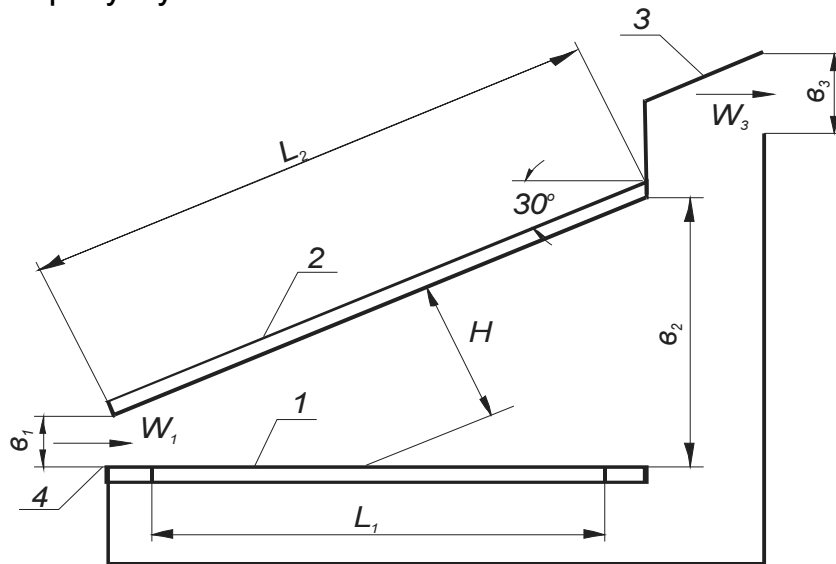


Схема атмосферної сушарки:

- 1 – матеріал, що сушиться; 2 – скляна огорожа;
3 – вихід повітря; 4 – вхід повітря в сушарку

Матеріал, що підсушується (1), довжиною L_1 , знаходиться на стелажі. Над матеріалом під кутом 30° до горизонту розташована скляна огорожа (2), довжиною L_2 . Повітря в сушильний канал надходить через

вхідний переріз (4) висотою b_1 зі швидкістю w , м/с. Відпрацьоване повітря зі швидкістю w_2 виходить через канал висотою b_2 , і залишає сушильну установку зі швидкістю W через переріз 3.

Для розрахунку були прийняті такі параметри:

$$L_1 = 3,0 \text{ м}; L_2 = 4,6 \text{ м}; b_1 = 0,5 \text{ м}; b_2 = 2,8 \text{ м}.$$

Таким чином, сушильний канал являє собою дифузор з мінімальним перерізом b_1 на вході в сушарку та максимальним перерізом b_2 на виході з каналу із загальною довжиною L .

Об'єм сушильного каналу на 1 м довжини сушарки становить:

$$V_c = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot L = \frac{3,3}{2} \cdot 4,0 = 6,6 \text{ м}^3 / \text{м}$$

Поверхня тепло- і масообміну матеріалу на 1 м довжини:

$$F_1 = 1 \cdot L_1 = 3,0 \text{ м}^2 / \text{м}$$

а площа скління –

$$F_2 = 1 \cdot L_2 = 4,6 \text{ м}^2 / \text{м}$$

Відстань між цими поверхнями $H = 1,25$ м, а їх спільна поверхня випромінення розраховується за формулою для двох нескінченних смуг різної ширини [2]:

$$F_{12} = \sqrt{\frac{1}{4}(L_2 + L_1)^2 + H^2} - \frac{1}{4}(L_2 - L_1)^2 + H^2. \quad (1)$$

Підставляючи значення L_1 , L_2 та H , отримуємо:

$$F_{12} = 2,52 \text{ м}^2 / \text{м}$$

Відстань між центрами витяжних та проточних отворів:

$$h_0 = 4,5 \text{ м}.$$

Середня сумарна радіація при безхмарному небі дорівнює:

$$q_p'' = \frac{1}{N} \sum_1^n q_c \quad (2)$$

де N – кількість денних годин; q_c – сумарна сонячна радіація, яка надходить на горизонтальну поверхню при безхмарному небі; може бути визначена за формулою [3]

$$q_p' = [1(1 - \psi) \cdot \mu] q_p'', \quad (3)$$

де $\psi = 0,4$ – середнє значення коефіцієнта хмарності на широті місцевості $45^\circ \dots 60^\circ$ і при висоті сонця $25^\circ \dots 40^\circ$; $\mu = 0,5$ – хмарність у долях від повної.

Кількість теплової енергії, що надходить в сушарку за рахунок сонячної радіації, наближено можна визначити за формулою [3]:

$$q_p = \varphi_0(1 - r_0)(1 - r_m) q_p', \quad (4)$$

де φ_0 – коефіцієнт пропускання матеріалу огорожі; для скла товщиною 2...4 мм та поліетиленової плівки товщиною 0,03...0,2 мм $\varphi_0 = 0,8 \dots 0,85$; для ПВХ плівки товщиною 0,1 мм $\varphi_0 = 0,85 \dots 0,9$; r_0 – альbedo огорожі (здатність поверхні огорожі сушарки відбивати сонячну радіацію); $r_0 = 0,08 \dots 0,3$ – для скла; $r_0 = 0,07 \dots 0,11$ – для огорожі з одношарової ПЕ плі-

вки; r_m – альбедо матеріалу (ґрунти); темні ґрунти – $r_m = 0,05 \dots 0,15$; сухий чорнозем – $r_m = 0,14$; вологий чорнозем – $r_m = 0,08$; сухі сірі ґрунти $r_m = 0,2 \dots 0,35$; вологі сірі ґрунти $r_m = 0,1 \dots 0,2$; сухі світлі піщані ґрунти $r_m = 0,25 \dots 0,35$.

Коефіцієнт пропускання – відношення пропущеної через тіло променевої енергії до падаючої:

$$\varphi = \frac{E_{\text{проп}}}{E_{\text{над}}}.$$

Коефіцієнт відбиття – відношення променевої енергії, що відзеркалюється тілом, до падаючої:

$$r = \frac{E_{\text{відб}}}{E_{\text{над}}}.$$

Коефіцієнт поглинання – відношення поглинутої тілом променевої енергії до падаючої:

$$\alpha = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{над}}}.$$

У загальному випадку

$$\varphi + r + \alpha = 1.$$

Для непрозорого тіла (матеріал в сушарці) $\varphi = 0$ і $r + \alpha = 1$, звідки

$$\alpha = 1 - r. \quad (5)$$

Для прозорих тіл (огорожа зі скла та плівки)

$$\alpha = 1 - r - \varphi. \quad (6)$$

При розрахунку теплообміну випромінюванням необхідно також знати ступінь чорноти матеріалів огорожі.

Результати досліджень. Розглянемо найсприятливіший випадок для липня місяця, середня температура для якого становить $19,8^\circ\text{C}$ з максимальною добовою амплітудою температури зовнішнього повітря $\Delta t = 18,4^\circ\text{C}$ [4]. Приймаємо в липні середню температуру повітря рівною $t_1 = 20^\circ\text{C}$. З цією температурою повітря надходить у сушильну установку.

Середню сумарну радіацію визначаємо за формулою (2):

$$q_p'' = 355 \text{ Вт / м}^2.$$

За формулою (3) отримуємо радіаційний потік теплоти, що надходить на огорожу сушарки:

$$q_p' = 0,7 q_p'' = 248,71 \text{ Вт / м}^2.$$

Для одношарової огорожі зі скла приймаємо $\varphi_0 = 0,82$, $r_0 = 0,12$, а коефіцієнт поглинання знаходимо за формулою (6):

$$\alpha_0 = 1 - 0,82 - 0,12 = 0,06.$$

Альбедо матеріалу в сушарці (вологий чорнозем): $r_m = 0,08$, тоді

$$\alpha_m = 1 - 0,08 = 0,92.$$

За формулою (4) визначаємо кількість теплової енергії, що надходить у сушарку за рахунок сонячної радіації:

$$q_p = 0,82 \cdot 0,88 \cdot 0,92 q_p' = 165,11 \text{ Вт/м}^2.$$

Кількість теплової енергії, що поглинається склом, дорівнює:

$$q_n = \alpha_0 q_p' = 0,06 \cdot 248,11 = 14,9 \text{ Вт/м}^2.$$

Для практичних розрахунків променевого теплообміну між огорожею сушарки та матеріалом у ній використовуємо формулу [2]:

$$Q_{12} = 4,9 \varepsilon_{np} \left[\left(\frac{273 + t_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_2}{100} \right)^4 \right] F_{12}, \quad (7)$$

де F_{12} – взаємна поверхня випромінювання тіл, які беруть участь у променевому теплообміні; ε_{np} – приведена степінь чорноти системи, яка складається з двох сірих тіл.

Для замкнутої системи приведена степінь чорноти вираховується за формулою [2]:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \varphi_{12} + 1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \varphi_{21}}, \quad (8)$$

де φ_{12} і φ_{21} – коефіцієнти опромінення.

Для двох нескінченних смуг різної ширини [2,]:

$$\varphi_{12} = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{L_2}{L_1} + 1 \right)^2 + \left(\frac{H}{L_1} \right)^2} - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{L_2}{L_1} - 1 \right)^2 + \left(\frac{H}{L_1} \right)^2};$$

$$\varphi_{21} = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{L_1}{L_2} + 1 \right)^2 + \left(\frac{H}{L_2} \right)^2} - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{L_1}{L_2} - 1 \right)^2 + \left(\frac{H}{L_2} \right)^2}.$$

Для наведених вище значень L_1 , L_2 та H , отримуємо:

$$\varphi_{12} = 1,0883; \quad \varphi_{21} = 0,4282.$$

Степінь чорноти матеріалу в сушарці:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{14} = 0,92 \quad \text{та} \quad \varepsilon_2 = \alpha_0 = 0,06.$$

Підставляючи ці значення в формулу (8), отримуємо степінь чорноти системи матеріалу в сушарці та матеріалу огорожі:

$$\varepsilon_{np} = 0,13.$$

Висновки

У роботі розраховано характеристики теплового випромінювання для сушарки атмосферного типу, що дозволить у подальшому скласти детальний тепловий баланс такої сушильної установки та визначити основні показники ефективності її роботи.

Список літератури

1. Данилов О.Л. Экономия энергии при тепловой сушке / О.Л.Данилов, Б.И. Леончик. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
2. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление. Справ. пособие / Кутателадзе С.С. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

3. Теплицы и тепличные хозяйства: Справочник / Г.Г.Шишко, В.О. Потапов, Л.Т.Сулима, Л.С.Чебанов; под ред. Г. Г. Шишко. – К. : Урожай, 1993. – 424 с.
4. Строительная климатология и геофизика: СНиП 2.01.01-82. / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1983. – 136 с.

Приведена методика определения теплоступлений от солнечной радиации в атмосферной сушильной установке.

Сушка, односкатная теплица, солнечная радиация, альbedo, степень черноты материала.

The method of determining heat flow of solar radiation in atmospheric drying setting is given.

Drying, lean-to greenhouse, solar radiation, albedo, emissivity material degree.

УДК 621.43.036.22

ЗВОЛОЖУВАЧ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ ДЛЯ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

І.В.Феофілов, старший викладач

Проаналізовано додавання води до палива як напряму підвищення ефективності роботи двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), розглянуто різні способи додавання води до палива і запропоновано зволожувач дуттьового повітря на основі використання теплоти охолодження двигуна, який може працювати на недистильованій воді.

Додання води до палива, двигун внутрішнього згоряння, паливно-водяна емульсія, вприск води, зволоження дуттьового повітря.

Відомо, що одним із напрямів підвищення ефективності роботи ДВЗ є додавання води до палива перед його спалюванням в циліндрах двигуна. При цьому покращуються енергетичні, економічні та екологічні показники роботи двигуна.

Існують багато способів додавання води до палива. Основними з них є – вприскування безпосередньо води, створення паливно-водяної емульсії та її використання або додання води до палива у вигляді пари. Проте всі вони мають свої недоліки – це додаткові витрати енергії при доданні води до палива, використання дорогого дистиляту тощо.

Мета досліджень – створення приладу для зволоження дуттьового повітря в ДВЗ, що усуває основні недоліки існуючих способів додавання води в ДВЗ.

3. Теплицы и тепличные хозяйства: Справочник / Г.Г.Шишко, В.О. Потапов, Л.Т.Сулима, Л.С.Чебанов; под ред. Г. Г. Шишко. – К. : Урожай, 1993. – 424 с.
4. Строительная климатология и геофизика: СНиП 2.01.01-82. / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1983. – 136 с.

Приведена методика определения теплопоступлений от солнечной радиации в атмосферной сушильной установке.

Сушка, односкатная теплица, солнечная радиация, альbedo, степень черноты материала.

The method of determining heat flow of solar radiation in atmospheric drying setting is given.

Drying, lean-to greenhouse, solar radiation, albedo, emissivity material degree.

УДК 621.43.036.22

ЗВОЛОЖУВАЧ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ ДЛЯ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

І.В.Феофілов, старший викладач

Проаналізовано додавання води до палива як напряму підвищення ефективності роботи двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), розглянуто різні способи додавання води до палива і запропоновано зволожувач дуттьового повітря на основі використання теплоти охолодження двигуна, який може працювати на недистильованій воді.

Додання води до палива, двигун внутрішнього згоряння, паливно-водяна емульсія, вприск води, зволоження дуттьового повітря.

Відомо, що одним із напрямів підвищення ефективності роботи ДВЗ є додавання води до палива перед його спалюванням в циліндрах двигуна. При цьому покращуються енергетичні, економічні та екологічні показники роботи двигуна.

Існують багато способів додавання води до палива. Основними з них є – вприскування безпосередньо води, створення паливно-водяної емульсії та її використання або додання води до палива у вигляді пари. Проте всі вони мають свої недоліки – це додаткові витрати енергії при доданні води до палива, використання дорогого дистилляту тощо.

Мета досліджень – створення приладу для зволоження дуттьового повітря в ДВЗ, що усуває основні недоліки існуючих способів додавання води в ДВЗ.

Матеріали та методика дослідження. Методика дослідження полягає в порівняльному аналізі існуючих способів додавання води до палива в ДВЗ, а також в експериментальному дослідженні запропонованого зволожувача дуттьового повітря для ДВЗ.

Присутність води в паливно-повітряній суміші призводить до активного її перемішування в процесі спалахування і горіння суміші. В результаті чого збільшується площа контакту палива та окислювача і, відповідно, зростає швидкість згоряння палива, а також теплота, що виділяється при спалюванні палива в одиницю часу, тобто зростає потужність двигуна. Збільшення потужності двигуна при незмінному ступені стискання призводить до збільшення обертів вала двигуна і, відповідно, до зростання витрат палива. Тобто, в цьому випадку збільшення потужності двигуна супроводжується додатковими витратами палива і покращуються тільки енергетичні та екологічні показники роботи двигуна.

Додавання води до палива сприяє збільшенню його детонаційної стійкості, що дозволяє підвищити ступінь стискання паливно-повітряної суміші і, відповідно, збільшити потужність двигуна без додаткових витрат палива. Приріст електричної потужності при додаванні до 20 % води становить близько 10–15 % [6]. При незмінному ступені стискання додавання води до палива дозволяє отримати економічний ефект за рахунок переходу на використання палива з меншим октановим числом, яке є більш дешевим паливом. Дані про детонаційну стійкість бензинів з різною кількістю доданої води наведено в табл. 1 [2].

1. Значення октанового числа автобензинів за моторним методом

Паливо	Кількість доданої води			
	0%	5%	10%	20%
Бензин А-66	66	66,5	67,5	72
Бензин А-72	72	72,5	74	76
Бензин А-76	76	77	78	81
Бензин АИ-93	85	85,5	86	88

Значне підвищення октанових чисел палива пояснюється одними авторами зниженням температури горіння паливно-повітряної суміші за рахунок випаровування доданої води. Інші автори пов'язують антидетонаційні властивості води не лише із зниженням температури робочого процесу, але й з безпосередньою участю води в процесі горіння. Вода в певних концентраціях гальмує розвиток ланцюгових реакцій передполум'яного окислення вуглеводнів. Між перекисними радикалами і гідроксильною групою води утворюється водневий зв'язок. При цьому активність радикалів знижується, і це у свою чергу підвищує детонаційну стійкість паливних сумішей.

Крім того, додавання води до палива покращує екологічні показники роботи двигуна – зменшуються шкідливі викиди в навколишнє середовище: зменшується концентрації оксидів азоту і вуглецю, що утворюються. Експерименти для чистого ізооктану та ізооктану з 10 %-ним вмістом во-

ди, наприклад, показують, що при такому вмісті води в суміші кількість СО у відпрацьованих газах двигуна падає на 6 %, а NO_x – на 8 % [3].

Існують такі способи додавання води.

1. Вприскування води в дуттьове повітря, паливно-повітряну суміш або безпосередньо в циліндри двигуна [4].
2. Приготування паливно-водяної емульсії [5] та подальше її використання як палива.
3. Перетворення води на пару і додавання цієї пари до повітря або паливно-повітряної суміші.

Кожен із вищезазначених способів додавання води до палива має свої недоліки.

В експлуатаційних умовах двигуни з вприскуванням води працюють не цілком стабільно. Це пов'язано з нерівномірним розподілом води по циліндрах двигуна. Крім того, краплі води більше 5 мкм, що потрапляють в циліндри двигуна, не встигають випаритися в процесі згорання палива і здійснюють бомбардування робочих поверхонь циліндро-поршневої групи ДВЗ, що призводить з часом до їх фізичного зносу.

Використання палива у вигляді паливно-водяної емульсії дозволяє ці труднощі обійти. Проте з'являються інші. Приготування паливно-водяної емульсії вимагає використання поверхнево-активних речовин (ПАР) для отримання метастабільної емульсії з двох речовин, що мають різну густину. Навіть нетривале використання такої емульсії як палива призводить до відкладень на поверхнях циліндро-поршневої групи, що викликає залипання поршневих кілець і, призводить з часом, до виходу двигуна з ладу. Крім того, ПАР і продукти їх розпаду мають бути нетоксичними і не знижувати детонаційну стійкість палива. Ці додаткові вимоги ускладнюють і без того складне завдання створення стійких паливно-водяних емульсій. Тому робляться спроби готувати емульсії на автомобілі безпосередньо перед їх використанням: розробляються бортові диспергуючі пристрої, що дозволяють за допомогою гідророзпилювачів або ультразвукових генераторів отримувати в дисперсійному середовищі краплі розміром менше 5 мкм. Проте внаслідок значної різниці в густині палива і води зовсім обійтися без використання ПАР при приготуванні паливно-водяної емульсії не можна. Час роботи двигуна до виходу з ладу при цьому збільшується, але зовсім позбавитись відкладень не вдається.

Розглядаючи наслідки додавання води до палива, слід зазначити і те, що в обох варіантах застосовується дистиллят, отримання якого пов'язано з додатковими істотними енерговитратами і наявністю відповідного обладнання. Тому, заміна частини палива водою не дає відповідної економії палива, оскільки для одержання дистильованої води також потрібно витратити деяку кількість палива. Якщо використовувати недистильовану воду, то при тих її витратах, що рекомендується для додання до палива, розчинені у воді солі неодмінно повинні призвести до утворення нагару в камері згорання і до серйозних порушень у роботі двигуна вже через 100–200 год роботи. Адже при спалюванні 10 л палива в двигун

вноситься до 2 л води, а разом з нею до 200 мг різних солей. Крім того, для приготування паливно-водяних емульсій так само, як і для отримання необхідного тиску при вприскуванні води, також доводиться витратити додаткову енергію. Тому в обох випадках говорити про істотну економію палива за рахунок заміни частини палива водою не доводиться.

Більшість недоліків від використання води, при збереженні її позитивного впливу на процес згоряння, може бути усунена, якщо застосовувати воду у вигляді водяної пари. В цьому випадку до циліндрів двигуна не потрапляють частки води більше 5 мкм, розподіл води у паливній суміші більш рівномірний, що забезпечує стабільну і надійну роботу двигуна. Крім того, не має необхідності в ПАР і, відповідно, не має відкладень у двигуні, пов'язаних із ними. Крім того, використання зволоженого повітря не призводить до сольових відкладень у циліндрах двигуна, що позитивно позначається на його безаварійній роботі. Але застосування води у вигляді пари потребує великих енергетичних витрат, пов'язаних зі значною величиною прихованої теплоти пароутворення води (близько 2500 кДж/кг), і відповідного парогенеруючого обладнання.

Інша річ, коли для отримання водяної пари у складі зволоженого дуттьового повітря використовується теплові вторинні енергоресурси двигуна – тепло охолоджуючої рідини або тепло відпрацьованих газів [1]. У цьому випадку додання води до палива не потребує додаткових енерговитрат. На рис.1. наведено зволожувач дуттьового повітря для ДВЗ, заснований на вищезазначених принципах. Він являє собою контактний теплообмінний апарат, в якому в нижній частині відбувається нагрівання води у протитечійному трубчастому теплообміннику 1 від системи охолодження двигуна, в середній частині нагріта вода потрапляє в міжтрубний простір 2, в який через щілинні отвори 3 всмоктується повітря поршнями у циліндри двигуна, що забирається з навколишнього середовища через фільтр 4. Кількість повітря, що йде на зволоження регулюється за допомогою дросельної заслінки 5. У міжтрубному просторі відбувається барботування повітря через нагріту воду, внаслідок чого повітря нагрівається і зволожується. В верхній частині контактного теплообмінного апарата зволожене повітря проходить крізь краплеуловлювач 6 і подається в повітряно-впускну трубу 7, а далі – через впускний клапан у циліндри двигуна.

Охолоджена вода стікає через центральну трубу 8 у нижню частину контактного теплообмінного апарата, де знову потрапляє в трубчастий теплообмінник, в якому нагрівається від системи охолодження двигуна. Рушійною силою для води, що зволожує повітря, є різниця її густини в центральній трубі і в міжтрубному просторі, де вона рухається разом з бульбашками повітря.

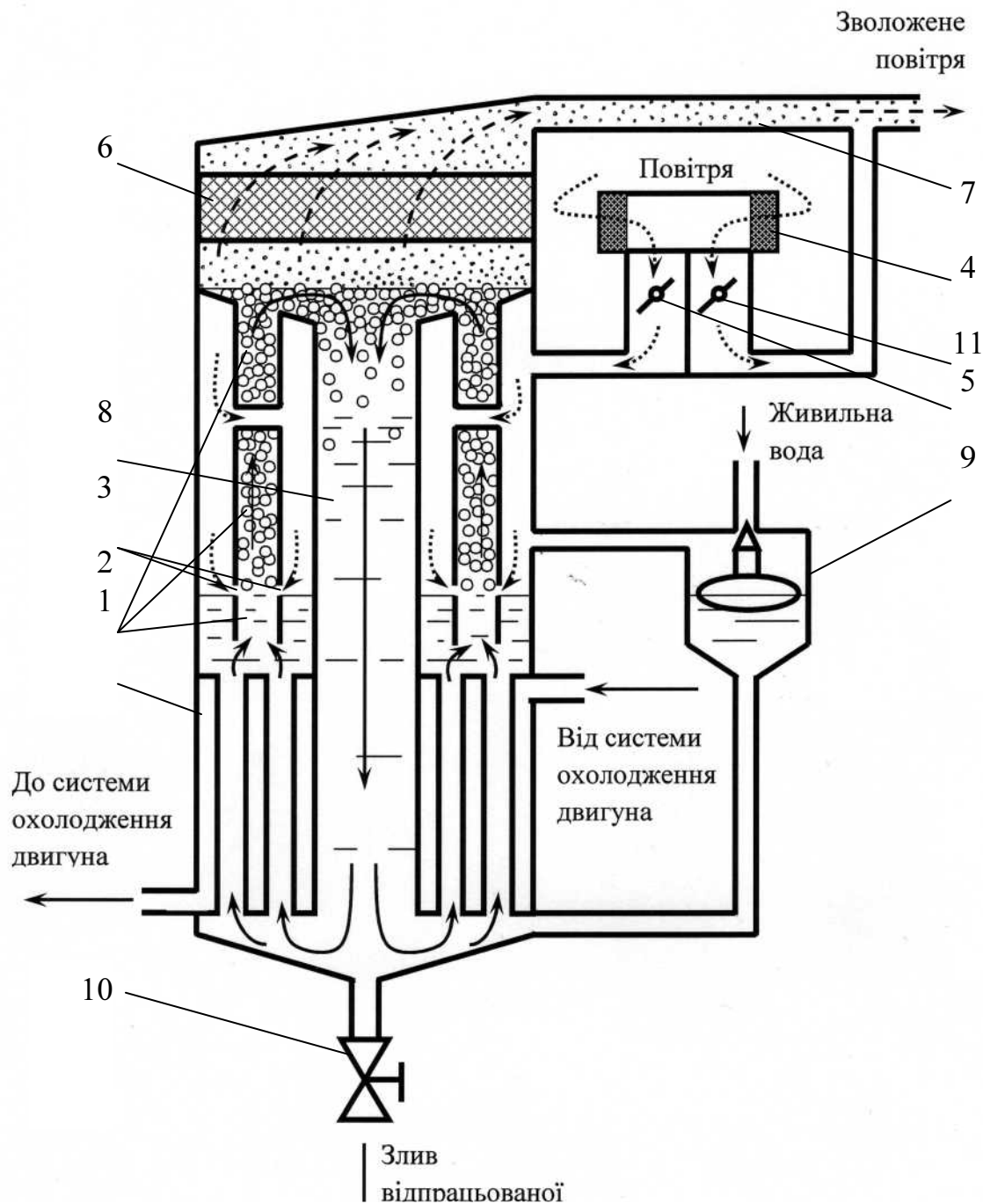


Рис.1. Схема зволожувача дуттьового повітря для ДВЗ:

- > рідина (вода і рідина системи охолодження двигуна);
-> повітря;
- > зволожено повітря

У зволожувачі повітря для ДВЗ передбачено:

- 1) безперервне підживлення випареної вологи водою за допомогою регулятора рівня води 9;
- 2) періодичний злив відпрацьованої води через відповідний клапан 10 у нижній частині контактного теплообмінного апарата;

3) регулювання кількості вологи у повітрі, що всмоктується у циліндри двигуна, за рахунок створення паралельного потоку незволоженого повітря, що змішується з основним потоком зволоженого повітря.

Кількість незволоженого повітря регулюється за допомогою дросельної заслінки 11 залежно від режиму роботи двигуна і від виду палива, що використовується, з метою отримання найбільшої ефективності роботи ДВЗ.

Для додання води до палива у кількості 20–25 % достатньо нагріти дуттьове повітря в контактному теплообмінному апараті на 10–15 °С. Наприклад, якщо на вході в теплообмінник повітря має температуру 20 °С і відносну вологість 60 %, то достатньо мати на виході – 30 °С і 90 % (відповідно), щоб отримати додання води до палива у кількості 23 % (з урахуванням того, що на спалювання 1 кг бензину необхідно близько 14,7 кг повітря). За рахунок паралельного потоку незволоженого повітря можна регулювати кількість доданої до палива води від 0 до 23 %. При цьому загальні витрати тепла на зволоження повітря не потребують додаткових витрат палива. Для нагрівання води, що зволожує, використовується частина тепла системи охолодження двигуна. Додатковий гідродинамічний опір повітря, що всмоктується, не перевищує 2 кПа. Причому, для зволоження дуттьового повітря може бути використана вода практично будь-якого ступеня забрудненості, тобто немає потреби у дорогому дистилляті.

Представлений зволожувач дуттьового повітря був встановлений на пересувному транспортному засобі ВАЗ 2101 з двигуном робочим об'ємом 1200 см³ (рис.2).

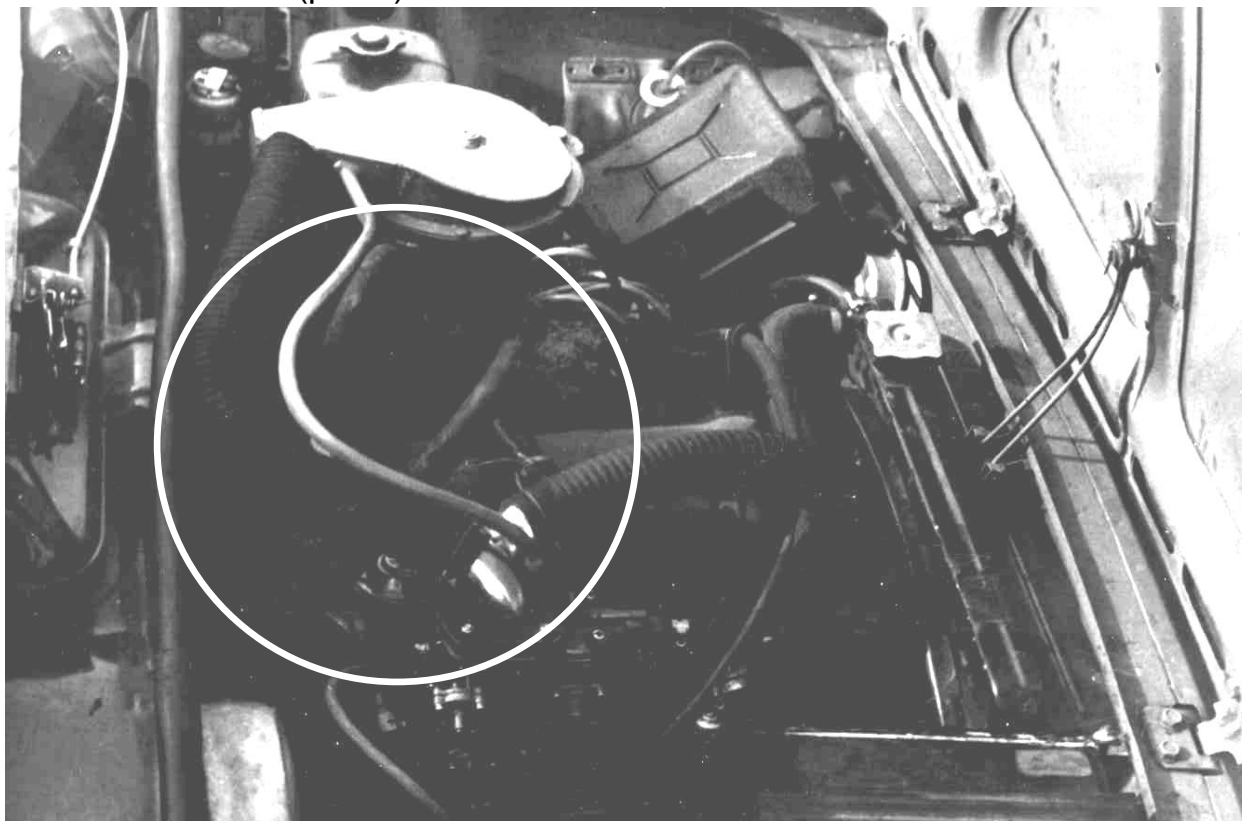


Рис.2. Зволожувач дуттьового повітря, встановлений на ВАЗ 2101

Результати досліджень. Додавання до палива води у кількості 15–25 % за допомогою зволожувача дуттьового повітря дозволило без переробки двигуна перейти на використання бензину А-76 замість АИ-92, який потрібен згідно з інструкцією з експлуатації. Результати випробувань наведено в табл.2. У таблиці дано середні витрати палива на 100 км пробігу при використанні бензину АИ-92 без зволоження і при використанні бензину А-76 зі зволоженням дуттьового повітря, а також економію коштів (в гривнях і у відсотках), яку можна отримати при заміні одного палива іншим з врахуванням їх сьогодишньої вартості.

Застосування зволожувача дуттьового повітря дозволило використати на автомобілі ВАЗ 2101 замість бензину АИ-92 паливо з меншим октановим числом. При цьому детонації на будь-яких режимах роботи двигуна не спостерігалось. Середні витрати палива зменшились лише на 2,5–4 %, але за рахунок меншої вартості низькооктанового палива вдалось досягти економії 8,7–10 % при доданні води до палива у кількості 15–25 %. Час розгону автомобіля до 80 км/год при використанні бензину АИ-92 без зволоження і А-76 зі зволоженням був практично однаковим, тобто використання зволоженого палива з меншим октановим числом не призвело до зменшення потужності двигуна.

2. Порівняння роботи двигуна із зволоженням та без зволоження дуттьового повітря

Вид двигуна	Паливо	Середня витрата палива на 100 км пробігу	Кількість доданої води, %	Вартість палива в Києві на 08.02.2013, грн	Вартість палива, витраченого на 1000 км, грн	Економія коштів на 1000 км пробігу, грн (%)
Без зволоження дуттьового повітря	АИ-92	8,1	0	11,00	891	0
Із зволоженням дуттьового повітря	А-76	7,9	15	10,30	813,7	77,3 (8,68)
		7,8	20	10,30	803,4	87,6 (9,83)
		7,78	25	10,30	801,34	89,7 (10,06)

Висновки

1. Запропонований зволожувач дуттьового повітря для ДВЗ дозволяє додавати воду до палива без додаткових енергетичних витрат за рахунок утилізації теплоти охолодження двигуна.

2. У запропонованому зволожувачі дуттьового повітря може бути використана вода практично будь-якого ступеня забруднення, внаслідок чого немає необхідності у використанні дорогого дистилляту.

Список літератури

1. А. с. 1347602 СССР, МКИ³ F 02 В 43/00. Способ работы двигателя внутреннего сгорания / А. А. Долинский, А. И. Гуров, И. В. Феофилов (СССР). – №4020981 ; заявл. 12.02.86; опубл. 07.08.87. Бюл. № 39.
2. Гуйва С.В. Вода как альтернативное топливо / С.В. Гуйва // Праці Та-врійського держ. агротехнологічного ун-ту. – Мелітополь: ТДАТУ, 2009. – Вип. 9, т. 5. – С. 176–182.
3. Ефремов П.К. К вопросу о дополнительном питании тепловых двигателей водой / П.К. Ефремов // Труды Всесоюзной науч. конф. «Защита воздушного бассейна от загрязнения токсичными выбросами транспортных средств». – Харьков: Ин-т проблем машиностроения, 1977. – Ч. 1. – С. 221.
4. Колодин А.М. Результаты испытаний дизеля 6ЧН 16/22, оборудованного системой испарительного охлаждения наддувочного воздуха / А.М. Колодин // Труды Новосибирского ин-та инженеров водного транспорта. – Новосибирск: НИИВТ, 1981. – Вып. 158. – С. 76–87.
5. Лебедев, О.Н. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях / Лебедев О.Н., Сомов В.А., Сисин В.Д. – Л.: Судостроение, 1988. – 108 с.
6. Смаль Ф.В. Перспективные топлива для автомобилей / Ф.В. Смаль, Е.Е. Арсенов. – М.: Транспорт, 1979. – 151 с.

Проанализировано добавление воды к топливу как направление повышения эффективности работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС), рассмотрены различные способы добавления воды к топливу и предложен увлажнитель дутьевого воздуха на основе использования теплоты охлаждения двигателя, который может использовать недистиллированную воду.

Добавка воды к топливу, двигатель внутреннего сгорания, топливно-водяная эмульсия, впрыск воды, увлажнение дутьевого воздуха.

It is analysed addition of water to the fuel as direction of increase efficiency of combustion engine, the different ways of addition of water to the fuel are considered and the humectant of air is offered on the basis of the use of warmth of cooling of engine which can use the undistilled water.

Addition of water to the fuel, combustion engine, fuel-aquatic emulsion, injection of water, humectant of air.

МЕТОДИ ПРИГОТУВАННЯ РІДКИХ КОРМІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РОТОРНО–ПУЛЬСАЦІЙНОГО АПАРАТА

В.Г. Горобець, доктор технічних наук
Д.В. Гескін, аспірант*

Обґрунтовано метод приготування рідких кормів та кормових добавок високої якості за допомогою роторно–пульсаційного апарата. Наведені переваги цього методу в порівнянні з традиційними.

Корма, роторно-пульсаційний апарат, кавітація.

Розробки і дослідження вчених показують, що при «традиційних» технологіях відгодівлі тварин у посліді залишається до 40 % неперетравленої їжі, а при годівлі свиней сухими комбікормами – 50 % .

Структура шлунково–кишкового тракту визначає раціон тварин і їх здатність перетравлювати ту чи іншу їжу. Відомо, що в складному шлунку жуйних тварин клітковина частково перетравлюється та обробляється великими колоніями мікроорганізмів, що населяють рубець. Тваринам з таким шлунком, для збереження моторики шлунково–кишкового тракту, частину кормів необхідно зберігати в первинному або частково обробленому вигляді, а меншу частину бажано кавітаційно роздробити, розволонити і перевести частину клітковини (целюлози) в крохмаль і цукор.

Мета досліджень – обґрунтування методу приготування рідких кормів та кормових добавок високої якості, підвищеної засвоюваності для відгодівлі свиней, молодняку великої рогатої худоби з використанням роторно–пульсаційного апарата.

Матеріали та методика досліджень. Існуючі технології приготування кормів мають такі недоліки :

- недостатня величина розмелу і диспергування зерна, що перешкоджає більш повному засвоєнню живильних речовин, які містяться в зерні;
- недостатній бактерицидний вплив на компоненти приготовленого корму і відсутність боротьби з мікотоксинами, частина з яких переходить у м'ясо та інші продукти, такі як молоко та яйця;
- відсутність технології виділення із зерна крохмалю і переходу його в цукор (90 – 100 %), що засвоюється у шлунку свиней;
- відсутність технології знищення бактеріальної флори, яка «приїхала з поля» і мікотоксинів, що містяться в зерні.

Рекомендації вчених для тварин і птахів з прямоточною системою шлунково-кишкового тракту зводяться до того, що:

- корми для свиней повинні бути рідкими;
- злаки – подрібнені до розмірів 500 мкм;

* Науковий керівник – доктор технічних наук В.Г. Горобець

© В.Г. Горобець, Д.В. Гескін, 2013

- у процесі приготування кормів повинно бути забезпечено протікання процесів ферментативного зброджування крохмалю з переходом його в легкозасвоювані організмом тварини форми, а саме: глюкозу, фруктозу, сарбозу, мальтозу, галактозу тощо.

У свинарстві подібна підготовка кормів забезпечує середньодобовий приріст маси тварин 650 – 750 г. При цьому зазначені середньодобові прирости маси досягаються при значному зниженні витрат, а також суттєво зменшується вартість кормів.

Технологія приготування рідких кормів належить до найсучасніших і найефективніших. Ця технологія дозволить знизити собівартість кормів, збільшивши ефективність їх використання, а отже знизити собівартість 1 кг приросту маси тварин, скоротивши час вирощування забійної ваги, більш ефективно використовувати місця на тваринницькій фермі, свинарнику тощо.

Процес кавітаційного впливу на матеріал, покладений в основу пропонованої технології приготування рідких кормів, яка дозволяє в умовах існуючих тваринницьких ферм готувати легкозасвоювані, гомогенізовані, знезаражені корми, минаючи фазу приготування комбікормів з фуражного зерна (пшениці, вівса, ячменю, проса і т.д.); відходів зернопереробки (подрібненого зерна, насіння бур'янистих рослин, половин тощо); побічних продуктів зернопереробних підприємств (макухи, відходи борошномельного виробництва); відходів бурякоцукрового, спиртового, пивоварного, крохмального і сироварного виробництва.

При кавітаційній обробці харчової суміші одночасно відбуваються такі процеси:

- кавітаційне подрібнення в диспергаторі (зерна пшениці, ячменю, вівса, висівки, жому, макухи, лушпиння і т. д.) до тонкодисперсного стану;
- розігрів отриманої суспензії до 50 – 65 °С;
- створення умов для протікання фізико-хімічних і біохімічних процесів ферментативного зброджування крохмалю (перехід більше 50 % крохмалю, що міститься в кормах, речовинах, які легко засвоюються організмом тварини, а саме: моно-, ди- і трисахариди, тобто в глюкозу, фруктозу, сарбозу, мальтозу, галактозу тощо);
- пригнічення всіх бактерій, що потрапили в корм з поля зі злаками, завдяки чому зменшується (виключається) ймовірність виникнення небажаної або нестерильної ферментації від занесених бактерій, які складають конкуренцію мікрофлорі кишечника тварин у боротьбі за їжу і виробляють токсичні речовини.

При кавітаційному приготуванні рідких кормів разом із знезараженням сировини відбувається біологічна активація води. Така вода є потужним розчинником солей, вступає в реакцію гідратації біополімерів харчової сировини (з'єднання біополімерів з молекулами води), інтенсивно екстрагує (тобто витягує з сировини вітаміни та інші корисні речовини, не руйнуючи його природної структури, оскільки має звичайну температуру).

Відомі такі типи обладнання для диспергування:

- подрібнювачі з робочими тілами, що безпосередньо беруть участь у процесі помелу (кульові, бісерні, вібраційні, дезінтегратори);
- пристрої самопомелу (барабанні, відцентрові, струменеві);
- вибухові подрібнювачі (зі скиданням тиску, з використанням вибухових речовин).

Недоліки пристроїв цих типів: спрацювання робочих органів, забруднення продуктами зносу подрібнюваного матеріалу, велика енергоємність диспергування, низький ККД, агрегація (злипання) частинок при збільшенні дисперсності матеріалу.

В останні роки з'явилося обладнання для диспергування з одночасною гомогенізацією:

- ультразвукові пристрої;
- ультразвукові кавітаційні пристрої;
- електрогідравлічні пристрої;
- роторно–пульсаційні пристрої;
- Гідроударні установки.

Ультразвукові пристрої застосовуються рідко і в специфічних умовах (наприклад, гомогенізація майонезу), а електрогідравлічні пристрої поки що не знайшли застосування. Найбільшого поширення набули роторно–пульсаційні пристрої.

У таких пристроях відбувається закономірний перехід до засобу диспергування матеріалу в двофазному середовищі (матеріал + рідина), що дозволяє поєднати процеси диспергування і гомогенізації в одному апараті. Як рідина може бути використана вода або будь-яка інша рідина, наприклад олія, що виділяється при подрібненні горіхів, сік при переробці помідорів, гороху тощо. Це дає можливість використовувати фізичні властивості іншої фази (нестисливість, що базується на законах Паскаля і Бернуллі) і застосувати нові фізичні ефекти (гідравлічний удар, кавітацію, імпульси високого тиску, турбулентність).

Результати досліджень. На роторно–пульсаційному апараті (РПА) (рис.1). були проведені пошукові дослідження з приготування рідких кормів, які складаються з зерноовочевої суміші (картопля, морква, буряк – 8,3 % ; горох, кукурудза, пшениця, жито – 25 %) та барди (відходів спиртової промисловості – 66,7 %).

Експеримент проводився в режимі рециркуляції, тобто досліджувані компоненти неодноразово проходили через робочі органи РПА з метою одержання певного рівня гомогенізації кормової суспензії. Час одного циклу тривав приблизно 20 с. (залежить від складу корму). При подальшому дослідженні зразків за допомогою електронного мікроскопа було виявлено, що середній розмір часток корму досягав розміру менше 500 мкм уже після 20 – 25 циклів обробки (рис. 2).

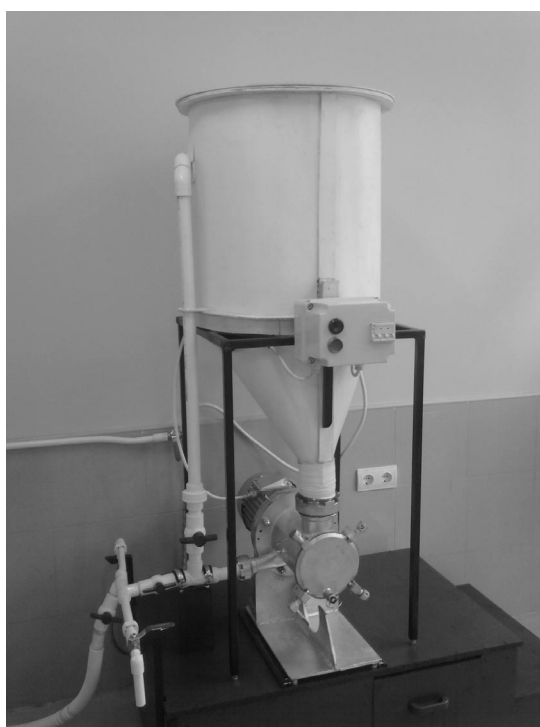


Рис.1. Зовнішній вигляд роторно–пульсаційного апарата

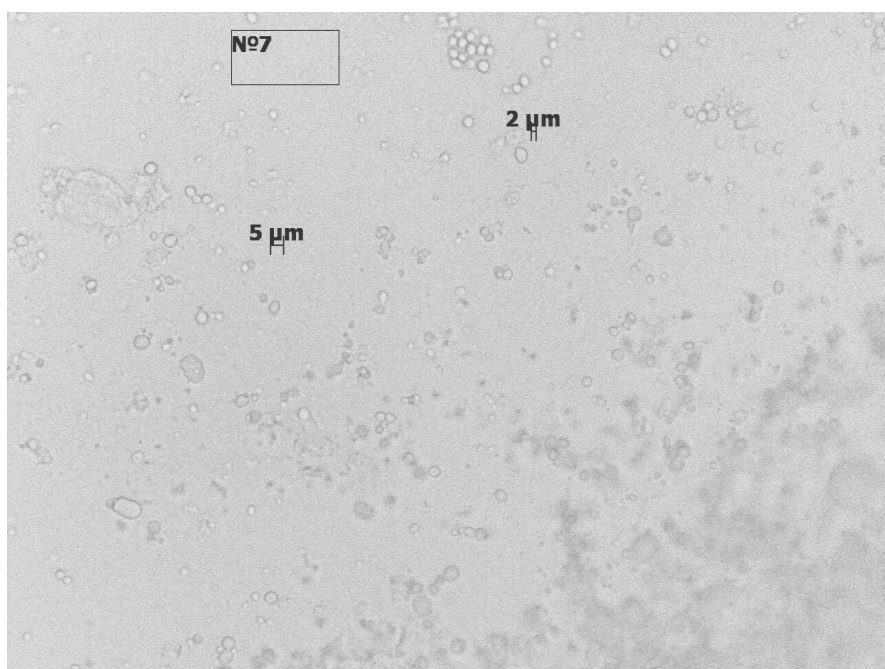


Рис. 2. Збільшений на електронному мікроскопі вигляд зразка рідкого корму, одержаного за допомогою РПА

При проведенні аналізу одержаних зразків методом «сита» (корм пропускали через ряд сіток з отворами певного діаметра) були одержані результати, які підтвердили доцільність використання РПА для отримання гомогенізованого рідкого корму рис.3).

Залишок на ситі, %

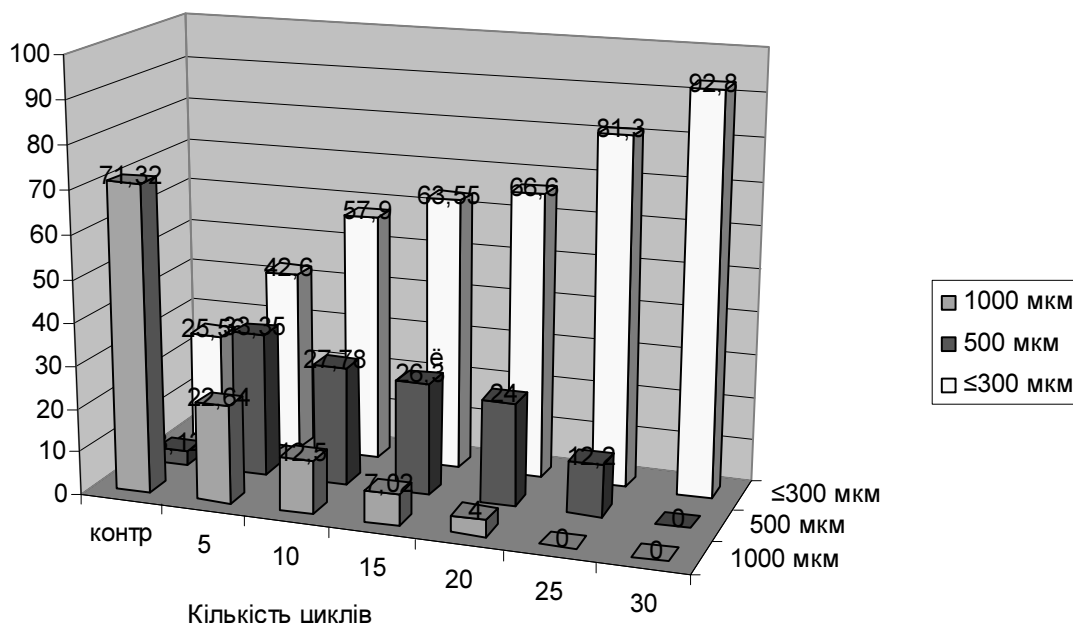


Рис.3. Залежність розміру частинок корму від кількості циклів, отримана методом «сита»

Таким чином, у результаті приготування кормів в РПА було досягнуто оптимальний для засвоєння тваринами корм, що призводить до найбільшого приросту їх маси.

Висновки

Спосіб диспергування матеріалу в двофазному середовищі позбавлений недоліків сухого способу диспергування, оскільки рідина «не зношується», не забруднює матеріал, запобігає агрегації за рахунок зменшення поверхневої енергії твердої фази (цей ефект посилюється додаванням поверхнево – активних речовин). Використання рідини дозволяє поєднати процеси диспергування і гомогенізації в одному апараті.

Застосування РПА як кавітаційного гомогенізатора дає можливість:

- знизити енергозатрати в порівнянні з традиційними апаратами на 15 – 18 %;
- провести знезараження корму, що сприяє його високій засвоюваності у тварин або колоній бактерій, які населяють шлунок, без вироблення токсинів чужорідними бактеріями;
- здійснити клейстеризацію корму (виділення крохмалю у водний розчин);
- забезпечити гідроліз крохмалю, який перетворюється на речовини, що легко засвоюються тваринами, а саме моносахариди, дисахариди, трисахариди (у вигляді глюкози, фруктози, сорбози, мальтози, галактози тощо).

Список літератури

1. Долинский А.А. Дискретно–импульсный ввод энергии в теплотехнологиях / Долинский А. А., Басок Б. И., Гулый И. С. – К.: ИТТФ НАНУ, 1996. – 206 с.
2. Долинский А.А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий / А.А. Долинский / ИФЖ. – 1996. – Т. 69, №6. – С. 35 – 43.
3. Промтов М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества / М.А. Промтов. – М.:Машиностроение, 2004. – 93 с.
4. Топилин Г.Е. Использование гидродинамических аппаратов в агро-производстве/ Г.Е. Топилин, С.М. Уминский // Аграрний вісник Причорномор'я. –2007.– № 40. – С.64-79.
5. Топілін Г.Є. Використання гідродинамічних апаратів у технологічних процесах / Г.Є. Топілін, С.М. Уминський, С.В. Інютін. – Видавництво та друкарня «ТЕС». – 2009. – С.184.

Обоснован метод приготовления жидких кормов и кормовых добавок высокого качества с помощью роторно–пульсационного аппарата. Приведены преимущества этого метода по сравнению с традиционными.

Корма, роторно-пульсационный аппарат, кавитация.

Method of preparation of liquid feed and feed additives of high quality with using of rotary – pulsating machine is studied. Advantages of this method over traditional are presented.

Feed, rotor-pulsation apparatus, cavitation.

УДК 621.313:631.171

ВПЛИВ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ УСТАНОВОК АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ НА БІОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В ЗЕРНОВОМУ НАСИПІ

І.Б. Луцик, здобувач*

***Тернопільський національний педагогічний університет
ім. В.Гнатюка***

Запропоновано адаптивний алгоритм визначення необхідної продуктивності вентилятора залежно від співвідношення параметрів стану зернової маси з використанням інтелектуального регулятора, що забезпечує енергоощадність технологічного процесу та збереження якісних показників зерна.

Адаптивні алгоритми керування, активне вентилявання, самозігрівання, зернові шкідники, енергозатрати.

*Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В.С.Федорейко

© І.Б.Луцик, 2013

Список літератури

1. Долинский А.А. Дискретно–импульсный ввод энергии в теплотехнологиях / Долинский А. А., Басок Б. И., Гулый И. С. – К.: ИТТФ НАНУ, 1996. – 206 с.
2. Долинский А.А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий / А.А. Долинский / ИФЖ. – 1996. – Т. 69, №6. – С. 35 – 43.
3. Промтов М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества / М.А. Промтов. – М.:Машиностроение, 2004. – 93 с.
4. Топилин Г.Е. Использование гидродинамических аппаратов в агро-производстве/ Г.Е. Топилин, С.М. Уминский // Аграрний вісник Причорномор'я. –2007.– № 40. – С.64-79.
5. Топілін Г.Є. Використання гідродинамічних апаратів у технологічних процесах / Г.Є. Топілін, С.М. Уминський, С.В. Інютін. – Видавництво та друкарня «ТЕС». – 2009. – С.184.

Обоснован метод приготовления жидких кормов и кормовых добавок высокого качества с помощью роторно–пульсационного аппарата. Приведены преимущества этого метода по сравнению с традиционными.

Корма, роторно-пульсационный аппарат, кавитация.

Method of preparation of liquid feed and feed additives of high quality with using of rotary – pulsating machine is studied. Advantages of this method over traditional are presented.

Feed, rotor-pulsation apparatus, cavitation.

УДК 621.313:631.171

ВПЛИВ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ УСТАНОВОК АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ НА БІОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В ЗЕРНОВОМУ НАСИПІ

І.Б. Луцик, здобувач*

***Тернопільський національний педагогічний університет
ім. В.Гнатюка***

Запропоновано адаптивний алгоритм визначення необхідної продуктивності вентилятора залежно від співвідношення параметрів стану зернової маси з використанням інтелектуального регулятора, що забезпечує енергоощадність технологічного процесу та збереження якісних показників зерна.

Адаптивні алгоритми керування, активне вентилявання, самозігрівання, зернові шкідники, енергозатрати.

*Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В.С.Федорейко

© І.Б.Луцик, 2013

Процеси обробки і зберігання зерна у вітчизняному виробництві характеризуються високими енергозатратами. Цей показник вище в середньому на 30 % порівняно з іншими відомими технологіями і науково обґрунтованими нормами [1].

Технологічним прийомом, що забезпечує суттєве зниження енергії в галузі зберігання зерна є активне вентилювання. Цей процес не потребує складного обладнання чи великих капітальних вкладень. Тому не випадково, що на базі активного вентилювання розроблено технології, які широко застосовуються при обробці основних обсягів високоякісного зерна у ряді аграрнорозвинених країн (зокрема США, Канада, Австралія). Досвід передових галузей промисловості цих країн доводить, що на сучасному етапі ефективність вкладень у вдосконалення засобів і систем автоматизації вища, ніж у нові види обладнання [4].

Тому, пошук нових алгоритмів керування швидкісними режимами вентилювання нині не втрачає своєї актуальності.

Мета досліджень – підвищення енергоефективності системи керування енергоощадними швидкісними режимами вентиляційних установок для підтримання якісних показників сировини

Матеріали та методика досліджень. Результативним інструментом пошуку в цьому випадку є імітаційне моделювання комплексу процесів, що протікають у реальній системі, з подальшим дослідним опрацюванням рішень і схем. Методом раціоналізації режимів роботи адаптивної системи керування та підвищення її ефективності, мобільності та гнучкості є застосування «інтелектуальних» САК, зниження рівня складності програмно-апаратного забезпечення регуляторів. Тому, основою проектування цього типу регуляторів є конструювання бази знань, методи представлення яких ґрунтуються на принципах теорії систем та штучного інтелекту. Кількісною мірою якості функціонування технологічної системи є змішаний критерій її ефективності: якісні показники зерна та енерговитрати.

Результати досліджень. Аналіз причин, які знижують якісні показники сировини при її зберіганні, доводить, що найнебезпечнішим є самозігрівання зернової маси. Це обумовлено тим, що в зерновому насипі, як у складній біохімічній системі, постійно відбуваються фізико-хімічні та біологічні процеси, які, залежно від умов зберігання, можуть призвести до погіршення, а то й до повного псування сировини [2].

Зерно, як будь-який живий організм, дихає, і при цьому втрачається його маса, підвищується температура й вологість. Таким чином, його зберігання породжує певні труднощі, пов'язані з втратою маси та погіршенням якості. Адже у будь-який момент при зберіганні зернової маси в діапазоні температур 15–38 °С і при вологості, яка перевищує оптимальну, існує велика ймовірність розвитку плісняви, комах та грибків.

Втрат, викликаних комахами, можна ефективно уникнути вже при охолодженні врожаю до температури нижче 13 °С. При відповідних низьких температурах комахи впадають у зимову сплячку і не завдають шкоди. Проте при більш оптимальних для себе умовах температури і

вологості, комахи стрімко розмножуються і своєю життєдіяльністю наносять великої шкоди зерну. Використання ж хімічної обробки є небажаним для насіннєвого зерна, а для продовольчого – узагалі заборонено [5].

Особливо небезпечним для зерна є борошняний кліщ, що може переходити в унікальну стадію, відому як гіпопус, в якій оболонки тіла тверднуть. За відсутності їжі або інших несприятливих умовах кліщі можуть залишатися в цій стадії протягом декількох місяців. Для запобігання зростанню числа цих шкідників у вологому зерні потрібна температура менше 5 °C [4]. Проте слід зауважити, що під впливом помірно низьких температур у хлібних кліщів виробляється стійкість до низьких температур. Цей фактор також потрібно враховувати при охолодженні зерна.

Отже, з точки зору екологічної безпеки та енергоощадності, найдоцільнішим методом боротьби зі шкідниками є охолодження зерна шляхом активного вентилявання.

У статичному стані насип зерна вкрай повільно приймає енергію. Це є результатом ізолюючого ефекту повітря в проміжних просторах між зернами і малої контактної поверхні. У зв'язку з цим тепле зерно при низькій зовнішній температурі повітря довго зберігає тепло. Відповідно на підставі того ж самого ефекту охолоджене – довго залишається холодним.

Процес вентилявання повинен контролюватися не тільки стосовно температури, але й вологості повітря. Адже, якщо сухе зерно продувати холодним, але вологим повітрям, то це неодмінно викличе процес псування сировини. Крім того, в процесі охолодження, за відповідних метеорологічних умов можливе утворення конденсату.

Технологія охолодження засобами активного вентилявання має численні переваги, які необхідно враховувати з точки зору економічної ефективності: тривале зберігання без ризику зниження якості, захист від поїдання комахами-шкідниками та від їх розмноження, захист від утворення грибів та їх мікотоксинів, уникнення дорогої і шкідливої хімічної обробки, мінімізація втрат внаслідок дихання зерна, відсутність необхідності перескладування, незначні витрати на сушіння, збереження здатності до проростання, відсутність окислення олійного зерна [5].

Недостатній обмін повітря в насипі у процесі зберігання або при слабкому його вентиляванні призводить до зниження життєздатності зерна з підвищеною вологістю. Для збереження його насіннєвих якостей, особливо вологістю понад 14–15 %, необхідно передбачати процес вентилявання з певною періодичністю, що залежить також від температури та вологості навколишнього середовища.

Для скорочення часу вентилявання питому подачу повітря часто збільшують до 250 м³/т за годину і більше, однак це пов'язано зі значним споживанням електроенергії та витратами на охолодження. Тому необхідно встановлювати такі питомі подачі повітря, які б забезпечували охолодження зерна і запобігали його псуванню і втратам за мінімальних витрат на вентилявання.

Структурний аналіз процесів, що відбуваються в зерновому насипі під час активного вентилявання, проведено із врахуванням сукупності характеристик, що є істотними для ефективного охолодження зерна. Отже, визначено такі параметри:

- стану S^1 : w_3 – вологість зерна, t_3 – температура зерна;
- спостереження S^4 : w_3^K – вологість зерна у лабораторних замірах, t_3^K – температура зерна у точках вимірювання, $K_{шк}^K$ – наявність шкідників у пробах зерна;
- керування S^2 : v_n – швидкість повітря, що подається;
- збурення S^3 : w_3^n – початкова вологість зерна, t_3^n – початкова температура зерна, s_3 – шпаруватість зерна, λ_3 – теплопровідність зерна, w_n^n – вологість повітря, t_n^n – температура повітря;

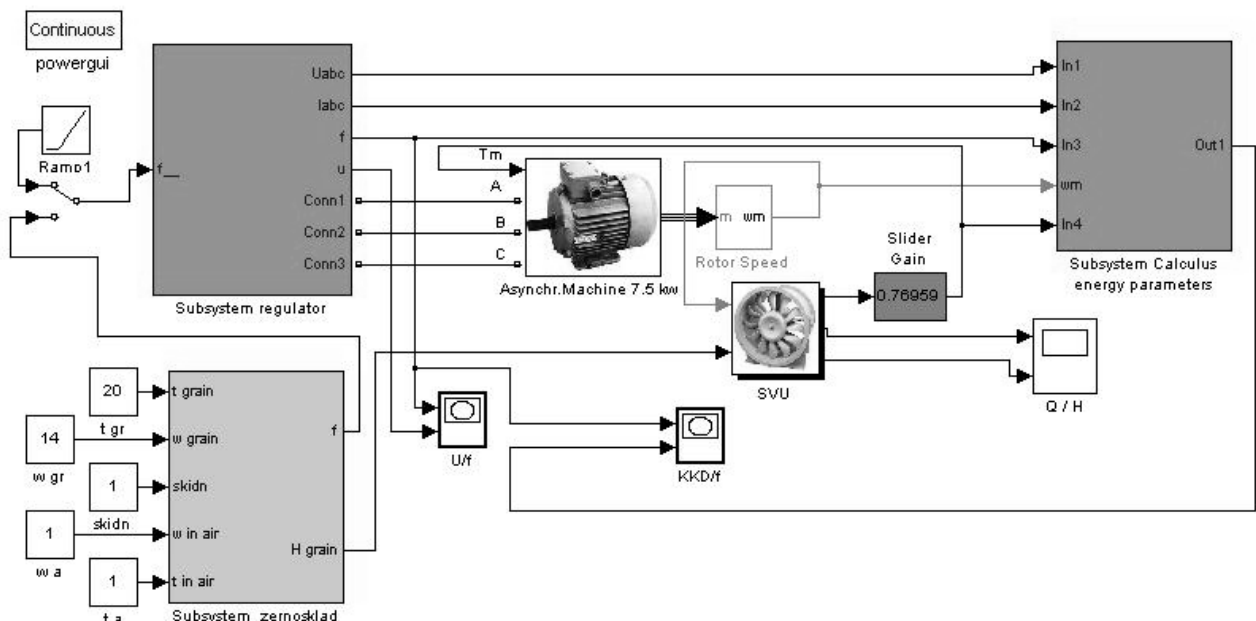
Функціональне співвідношення параметричної моделі матиме вигляд:

$$f(S^1 : w_3, t_3) = f(S^2 : v_n; S^3 : w_3^n, t_3^n, s_3, \lambda_3, w_n^n, t_n^n; S^4 : w_3^K, t_3^K, K_{шк}^K).$$

Одним із можливих шляхів вирішення проблеми є створення інтегрованої технології провадження процесу на основі використання інтелектуальної системи автоматизованого керування (САК).

Отже, задача організації енергоощадних режимів роботи електропривода установки активного вентилявання є багатокритеріальною і носить адаптивний характер. Адже, згідно з поняттями адаптивності – це система, що забезпечує в темпі реального процесу зменшення апіорних невизначеностей, що призводить до ефективного управління ходом процесу [3].

Для управління процесом вентилявання розроблено алгоритм функціонування системи автоматизованого керування (САК), імітаційну модель якого наведено на рисунку.



Імітаційна модель САК активного вентилявання

Оскільки подача повітря вентилятора функціонально залежить від стохастичних процесів, що відбуваються в зерновому насипі та в навколишньому середовищі, то реалізовувати схему керування нею найдоцільніше методами інтелектуального пошуку даних.

Залежно від необхідного режиму вентиляювання визначені диференційовані діапазони продуктивності вентилятора (таблиця). Аналіз наведених даних свідчить, що діапазон значень не є чітко визначеним. Це підтверджує коректність рішення щодо застосування засобів штучного інтелекту для визначення оптимальної продуктивності вентилятора.

Залежність продуктивності від вибраних режимів вентиляювання

№ з/п	Режим вентиляювання	Продуктивність м ³ /год
1	Охолодження, знешкодження шкідників	1300 – 2960
2	Контроль самозігрівання	850 – 1700
3	Вирівнювання вологи	450 – 1400
5	Вирівнювання температури	300 – 750
6	Видалення застоюного повітря	300 – 500

У цьому випадку цей модуль реалізовано за допомогою апарата гібридних мереж. Оскільки кінцеве значення продуктивності залежить від взаємозв'язку декількох процесів, то з метою уникнення «прокляття розмірності» використано каскадний метод формування системи: для визначення рівноважної вологості повітря використано fuzzy-систему типу Sugeno; для ідентифікації самозігрівання – модуль, що містить нейронну мережу для визначення зон підвищення температури; для вибору необхідної продуктивності – нечітку систему типу Mamdani. Для поєднання нечітких систем, нейромереж та проведення додаткових розрахунків застосовано контролер. Перевірка на адекватність функціонування моделі показала, що ця модель дозволяє розраховувати параметри системи з похибкою 0,3 %.

Висновки

Режими активного вентиляювання зерна повинні враховувати абіотичні чинники навколишнього середовища: вологість та температуру повітря, зважаючи на їх вплив на біологічні процеси, що відбуваються в зерновому насипі. Для профілактики розмноження кліщів та інших шкідників, а також для усунення самозігрівання потрібна достатня швидкість вентиляювання із врахуванням падіння тиску, спричиненого опором шару зерна.

Для збільшення надійності та підвищення енергоощадності існуючих систем активного вентиляювання необхідно проводити комплексний аналіз усього технологічного процесу з метою виявлення чинників, які впливають на зростання енерговитрат.

Оскільки задача організації енергоощадних режимів роботи електропривода установки активного вентиляювання є багатокритеріальною і носить адаптивний характер, то реалізувати оптимальне управління процесом активного вентиляювання можна шляхом створення інтегро-

ваної технології провадження процесу на основі використання інтелектуальної системи автоматизованого керування (САК).

Список літератури

1. Кирпа Н. Использование энергии в процессах хранения и обработки зерна. [Електронний ресурс]. – Режим доступу. – <http://www.lol.org.ua/rus/fruits>
2. Луцик І.Б. Використання активного вентилявання при зберіганні зерна / І.Б. Луцик // Наук. вісник НУБіП. Серія «Техніка та енергетика АПК». – К., 2010. – Вип. 153. – С. 221–228.
3. Мовчан А.П. Адаптивні та параметрично-оптимальні системи управління: навч. посіб. / А.П.Мовчан, О.В. Степанець. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 108 с.
4. Новые подходы к автоматизации предприятий по перевалке и хранению зерна / Компания «С-инжиниринг» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://sengineering.com.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=570
5. Технология хранения зерна в охлажденном состоянии [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.zanotti.kiev.ua/print>

Предложен адаптивный алгоритм определения необходимой производительности вентилятора в зависимости от соотношения параметров состояния зерновой массы с использованием интеллектуального регулятора, что обеспечивает энергосбережение технологического процесса и сохранения качественных показателей зерна.

Адаптивные алгоритмы управления, активное вентилирование, самосогревание, зерновые вредители, энергозатраты.

An proposed an adaptive algorithm to determine the required fan capacity, depending on the ratio of the state parameters of the grain using intelligent controller that provides the energy-saving process and maintain grain quality indicators.

Adaptive control algorithms, active ventilation, self-warming, grain pests, energy expenses.

УДК 517.958

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДОМ ПОТЕНЦІАЛІВ ПЛОСКИХ ДЕФОРМАЦІЙ У ЗАДАЧАХ ЛІНІЙНОЇ В'ЯЗКОПРУЖНОСТІ

***О.М. Нещадим, кандидат фізико-математичних наук
Ю.Б. Гнучій, доктор фізико-математичних наук***

Для задачі про плоскі деформації в'язкопружного матеріалу абелівського типу отримано систему гранично-часових інтегральних рівнянь другого роду. Запропоновано алгоритм розв'язування цієї системи.

В'язкопружність, ядро релаксації, модель Работнова, функція релаксації, в'язкопружний потенціал, фундаментальний розв'язок, щільність потенціалу, ядро інтегрального рівняння, рухома межа.

© О.М. Нещадим, Ю.Б. Гнучій, 2013

ваної технології провадження процесу на основі використання інтелектуальної системи автоматизованого керування (САК).

Список літератури

1. Кирпа Н. Использование энергии в процессах хранения и обработки зерна. [Електронний ресурс]. – Режим доступу. – <http://www.lol.org.ua/rus/fruits>
2. Луцик І.Б. Використання активного вентилявання при зберіганні зерна / І.Б. Луцик // Наук. вісник НУБіП. Серія «Техніка та енергетика АПК». – К., 2010. – Вип. 153. – С. 221–228.
3. Мовчан А.П. Адаптивні та параметрично-оптимальні системи управління: навч. посіб. / А.П.Мовчан, О.В. Степанець. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 108 с.
4. Новые подходы к автоматизации предприятий по перевалке и хранению зерна / Компания «С-инжиниринг» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://sengineering.com.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=570
5. Технология хранения зерна в охлажденном состоянии [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.zanotti.kiev.ua/print>

Предложен адаптивный алгоритм определения необходимой производительности вентилятора в зависимости от соотношения параметров состояния зерновой массы с использованием интеллектуального регулятора, что обеспечивает энергосбережение технологического процесса и сохранения качественных показателей зерна.

Адаптивные алгоритмы управления, активное вентилирование, самосогревание, зерновые вредители, энергозатраты.

An proposed an adaptive algorithm to determine the required fan capacity, depending on the ratio of the state parameters of the grain using intelligent controller that provides the energy-saving process and maintain grain quality indicators.

Adaptive control algorithms, active ventilation, self-warming, grain pests, energy expenses.

УДК 517.958

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДОМ ПОТЕНЦІАЛІВ ПЛОСКИХ ДЕФОРМАЦІЙ У ЗАДАЧАХ ЛІНІЙНОЇ В'ЯЗКОПРУЖНОСТІ

**О.М. Нещадим, кандидат фізико-математичних наук
Ю.Б. Гнучій, доктор фізико-математичних наук**

Для задачі про плоскі деформації в'язкопружного матеріалу абелівського типу отримано систему гранично-часових інтегральних рівнянь другого роду. Запропоновано алгоритм розв'язування цієї системи.

В'язкопружність, ядро релаксації, модель Работнова, функція релаксації, в'язкопружний потенціал, фундаментальний розв'язок, щільність потенціалу, ядро інтегрального рівняння, рухома межа.

Методом потенціалів успішно розв'язано багато прикладних задач математичної фізики [1,5]. У цій роботі розвивається метод потенціалів для розв'язування крайової задачі лінійної в'язкопружності.

Мета досліджень – отримання граничних інтегральних рівнянь для початково-крайової задачі про в'язкопружні деформації плоскої області з рухомою межею.

Матеріали та методика досліджень. Використовувались теоретичні положення математичної фізики і методи теорії потенціалів. Розглядались в'язкопружні матеріали із реологічними ядрами Абеля, запропонованими Ю.М. Работновим.

Нехай суцільне середовище, що складається з однорідного, ізотропного, нестаріючого в'язкопружного матеріалу із неперервною пам'яттю, заповнює циліндричне тіло поперечного перерізу $D(0)$. Вважається, що матеріал є нестаріючим (його властивості не змінюються з часом), а пам'ять – затухаючою. Обмежившись лише малими деформаціями такого середовища, дослідимо задачу про плоскі деформації.

Довільна геометрична точка M плоскої в'язкопружної області $D(\tau)$ у момент часу $\tau > 0$ збігається з радіус-вектором $\vec{y}(\tau) = \vec{e}^k y_k(\tau)$, тут $\{\vec{e}^1, \vec{e}^2\}$ – декартів базис. Загальне напруження за проміжок часу $0 < \tau < t$ у цій матеріальній частинці, спричинене її деформацією в момент часу τ і подальшою релаксацією напружень, визначається тензором напружень [3]:

$$\begin{aligned} \Pi(\vec{y}(t), t) = \int_0^t \left\{ E[kh(t-\tau) - \frac{2}{3}\mu q(t-\tau)] \operatorname{div} \vec{v}(\vec{y}(\tau), \tau) + \right. \\ \left. + 2\mu q(t-\tau) \operatorname{Def} \vec{v}(\vec{y}(\tau), \tau) \right\} d\tau, \end{aligned} \quad (1)$$

де μ – миттєво-пружний модуль зсуву; $\lambda = k - \frac{2}{3}\mu$ – миттєво-пружна стала Ламе; k – миттєвий модуль об'ємної деформації; E – одиничний тензор;

$\operatorname{Def} \vec{v}(\vec{y}(\tau), \tau) = \frac{1}{2}(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T)$ – тензор швидкості деформації;

$\vec{v} \equiv \vec{v}(\vec{y}(\tau), \tau)$ – вектор швидкості частинки M у момент часу τ ;

$\nabla = \vec{e}^k \frac{\partial}{\partial y_k}$ – оператор Гамільтона. Функції $q(t)$ і $h(t)$ характеризують

реологічні властивості матеріалу і називаються ядрами зсувної та об'ємної релаксації відповідно; вони визначені при $t \geq 0$, є невід'ємними і монотонно спадними. Прийнемо $h(t) = 0$, оскільки об'ємна релаксація більшості в'язкопружних матеріалів є несуттєвою. Вважатимемо, що в'язкопружна поведінка матеріалу узгоджується з реологічною моделлю Ю.М. Работнова:

$$q(t) = \frac{ct^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}, \quad (2)$$

де $c > 0$, $\alpha \in (0, 1)$ – параметри матеріалу; $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функція.

Нехай швидкості і зміщення частинок, що відбуваються в матеріальному тілі за період релаксації, а також похідні по координатах від зміщень до другого порядку включно є малими величинами і в початковий момент часу $t = 0$ тіло вважаємо вільним від напружень. Тому наближено можемо прийняти

$$\vec{v}(M, \tau) \approx \vec{v}(\vec{y}, \tau) \approx \frac{\partial u(\vec{y}, \tau)}{\partial \tau}, \quad \vec{\nabla} \approx \nabla,$$

де позначено: $\vec{y} \equiv \vec{y}(t)$, $\vec{u}(\vec{y}, \tau) = \vec{e}^k u_k$ – вектор зміщення. Величини $(y_1, y_2; t)$ – основні незалежні змінні (змінні Ейлера).

Квазістатичне рівняння руху

$$\text{div} \Pi(\vec{y}, t) + \rho(\vec{y}, t) \vec{m}(\vec{y}, t) = \vec{0}$$

такого в'язкопружного середовища набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} \mu \Delta \vec{u}(\vec{y}, t) + (\lambda + \mu) \text{grad} \text{div} \vec{u}(\vec{y}, t) - \mu \int_0^t q(t - \tau) [\Delta \vec{u}(\vec{y}, \tau) + \\ + \frac{1}{3} \text{grad} \text{div} \vec{u}(\vec{y}, \tau)] d\tau + \vec{f}(\vec{y}, t; \vec{u}) = \vec{0}, \end{aligned} \quad (3)$$

тут

$$\vec{f}(\vec{y}, t; \vec{u}) = \rho_0 \vec{m}(\vec{y}, t) [1 - \text{div} \vec{u}(\vec{y}, t)], \quad (4)$$

$\vec{m}(\vec{y}, t)$ – інтенсивність масових сил; $\rho_0 = \rho(\vec{y}, 0)$ – густина матеріалу;

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_2^2}$ – оператор Лапласа.

Нехай у 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 $\vec{x}$. Цю граничну умову, яка доповнює рівняння (3), запишемо в іншій формі:

$$\begin{aligned} 2\mu \text{Def} \vec{u}(\vec{x}, t) + \lambda \vec{n} \text{div} \vec{u}(\vec{x}, t) - \int_0^t \{ 2\mu q(t - \tau) \text{Def} \vec{u}(\vec{x}, \tau) - \\ - \frac{2}{3} \mu q(t - \tau) \vec{n} \text{div} \vec{u}(\vec{x}, \tau) \} d\tau = \vec{p}_n(\vec{x}, t). \end{aligned} \quad (5)$$

Із зростанням часу $t > 0$ межа $L(t)$ області $D(t)$ зміщується. Закон зміни контуру $L(t)$ будемо описувати векторним рівнянням

$$\vec{x} = \vec{x}(l, t), \quad (6)$$

причому

$$\vec{x}(l, 0) = \vec{x}^\circ(l),$$

де $\vec{x}^\circ(l)$ – задана неперервна функція; l – довжина контуру $L(t)$ у 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 (3), (5) шукатимемо у вигляді в'язкопружних потенціалів

$$\vec{u}(\vec{y}, t) = \vec{u}[\vec{f}] + \sum_{k=1}^2 \vec{e}^k \int_0^t d\tau \int_{L(\tau)} \vec{v}(l, \tau) \cdot \vec{v}^{(k)}(\vec{y} - \vec{x}; t - \tau) dl, \quad (7)$$

тут

$$\vec{u}[\vec{f}] = \sum_{k=1}^2 \vec{e}^k \int_0^t d\tau \iint_{D(\tau)} \vec{v}^{(k)}(\vec{y} - \vec{x}; t - \tau) \cdot \vec{f}(\vec{x}, \tau) ds, \quad (8)$$

контур $L(\tau)$ визначається поки що невідомою функцією (6); через $\vec{v}^{(k)}(\vec{y} - \vec{x}; t - \tau)$ позначено фундаментальний розв'язок рівняння (3), який визначається за умови $\vec{f}(\vec{y}, t) = \vec{e}^k \delta(t - \tau) \delta(\vec{y} - \vec{x})$.

Аналогічно роботі [4] фундаментальний розв'язок у випадку ядер релаксації (2) 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:

$$4\pi \varphi(\vec{x}, t) = \frac{3r^2(1 - \ln r)}{2(3k + 4\mu)} \left[\delta(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4c\mu}{3k + 4\mu} \right)^n \frac{t^{n\alpha-1}}{\Gamma(n\alpha)} \right] - \psi_0(\vec{x}, t);$$

$$4\pi \omega(\vec{x}, t) = \frac{r^2(1 - \ln r)}{2\mu} \left[\delta(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c^n t^{n\alpha-1}}{\Gamma(n\alpha)} \right] - \psi_0(\vec{x}, t),$$

де позначено

$$\psi_0(\vec{x}, t) = \frac{r^2}{8\mu} \left\{ \frac{3k + \mu}{3k + 4\mu} \delta(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[1 - \frac{3}{4} \left(\frac{4\mu}{3k + 4\mu} \right)^{n+1} \right] \frac{c^n t^{n\alpha-1}}{\Gamma(n\alpha)} \right\}, \quad r = |\vec{x} - \vec{y}|.$$

Окрім основної нерухомої декартової системи $\{\vec{e}^1, \vec{e}^2\}$ приймемо 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 $L(t)$. Припусти-

мо, що $\vec{v}(l, t) = \vec{n}v_1(l, t) + \vec{s}v_2(l, t)$ і підставимо вираз (7) у граничну умову (5); приходимо до системи інтегральних рівнянь відносно компонент шуканої векторної щільності $\vec{v}(l, t)$ потенціалу:

$$\begin{aligned} & \pi v_1(l_0, t) + \int_{L(t)} \sum_{i=1}^2 v_i(l, t) K_{1i}(l, l_0; t) \left| \frac{\partial \vec{x}(l, t)}{\partial l} \right| dl + \\ & + \int_0^t \tilde{k}(t - \tau) d\tau \int_{L(\tau)} \sum_{i=1}^2 v_i(l, \tau) k_{1i}(l, l_0; t, \tau) \left| \frac{\partial \vec{x}(l, \tau)}{\partial l} \right| dl = \psi_1(l_0, t); \\ & \pi v_2(l_0, t) + \int_{L(t)} \sum_{i=1}^2 v_i(l, t) K_{2i}(l, l_0; t) \left| \frac{\partial \vec{x}(l, t)}{\partial l} \right| dl + \\ & + \int_0^t \tilde{k}(t - \tau) d\tau \int_{L(\tau)} \sum_{i=1}^2 v_i(l, \tau) k_{2i}(l, l_0; t, \tau) \left| \frac{\partial \vec{x}(l, \tau)}{\partial l} \right| dl = \psi_2(l_0, t). \end{aligned} \quad (9)$$

Ядра $K_{ij}(l, l_0; t)$ і $k_{ij}(l, l_0; t, \tau)$ у цих рівняннях та функція $\tilde{k}(t)$ мають вигляд:

$$\begin{aligned} K_{11}(l, l_0; t) &= \frac{1}{r(t)} [(1 - 3\mu_0) \cos \gamma + \cos \gamma \cos 2\gamma_0 + 3\mu_0 \sin \gamma \sin 2\gamma_0]; \\ K_{12}(l, l_0; t) &= \frac{1}{r(t)} [(1 - 3\mu_0) \sin \gamma + \sin \gamma \cos 2\gamma_0 - 3\mu_0 \cos \gamma \sin 2\gamma_0]; \\ K_{21}(l, l_0; t) &= \frac{1}{r(t)} [\cos \gamma \sin 2\gamma_0 - 3\mu_0 \sin \gamma \cos 2\gamma_0]; \\ K_{22}(l, l_0; t) &= \frac{1}{r(t)} [\sin \gamma \sin 2\gamma_0 + 3\mu_0 \cos \gamma \cos 2\gamma_0]; \\ k_{11}(l, l_0; t, \tau) &= \frac{3\mu_0}{r(\tau)} [\cos \gamma - \sin \gamma \sin 2\gamma_0]; \\ k_{12}(l, l_0; t, \tau) &= \frac{3\mu_0}{r(\tau)} [\sin \gamma + \cos \gamma \sin 2\gamma_0]; \\ k_{21}(l, l_0; t, \tau) &= \frac{3\mu_0}{r(\tau)} \sin \gamma \cos 2\gamma_0; \\ k_{22}(l, l_0; t, \tau) &= -\frac{3\mu_0}{r(\tau)} \cos \gamma \cos 2\gamma_0; \\ \tilde{k}(t) &= \frac{3k}{4\mu} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4c\mu}{3k + 4\mu} \right)^n \frac{t^{n\alpha-1}}{\Gamma(n\alpha)}, \end{aligned} \quad (10)$$

тут $r = r(t) = |\vec{x}(l, t) - \vec{x}(l_0, t)|$, $\gamma = (\vec{r}, \vec{n})$, $\gamma_0 = (\vec{r}, \vec{n}_0)$.

Праві частини $\psi_1(l_0, t)$ та $\psi_2(l_0, t)$ системи рівнянь (10) 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 (5), якщо туди підставити замість $\vec{u}$ функцію (8).

При чисельному розв'язуванні одержаної системи інтегральних рівнянь другого роду (10) застосовується метод “кроків за часом” [2]. Згідно з цим методом, у 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 $L(t)$ у наступний момент часу $t = t_{k+1}$. На кожному наступному кроці обчислень замість функції $\vec{u}(\vec{x}, t)$, яка міститься у виразі (4) функції $\vec{f}(\vec{x}, t; \vec{u})$, потрібно підставляти значення, обчислені в попередній момент часу.

Результати досліджень. Побудовано систему гранично-часових інтегральних рівнянь другого роду для задачі про плоскі в'язкопружні деформації. Наведено вигляд ядер цих рівнянь у випадку реологічної моделі Ю.Н. Работнова. Одержана система допускає покрокове (за часом) чисельне розв'язування.

Висновки

Однією із особливостей крайових задач в'язкопружності є рухома межа області. Метод потенціалів дає змогу ефективно розв'язувати такі задачі.

Список літератури

1. Белоносов С.М. Применение интегральных представлений к решению задач теплопроводности и динамики вязкой жидкости/ Белоносов С.М., Овсиенко В.Г., Карачун В.Я. – К.: Выща шк., 1989. – 163 с.
2. Белоносов С.М. Исследование методами теории потенциалов плоских течений диэлектрической несжимаемой жидкости./ Белоносов С.М. // В кн.: Вопросы точности и эффективности вычислительных алгоритмов: труды симпозиума. – К., 1969. – Т.3. – С. 3–16.
3. Нецадим О.М. Граничні інтегральні рівняння для задач про плоскі деформації в'язкопружного циліндричного тіла. / О.М. Нецадим, Ю.Б. Гнучій //Науковий вісник НУБіП України. Серія “Техніка та енергетика АПК”. – 2011. – Вип.166, ч. 3. – С.235–242.
4. Нецадим О.М. Фундаментальний розв'язок інтегро-диференціального рівняння динаміки в'язкопружного середовища, яке характеризується моделлю Работнова. / О.М. Нецадим, Ю.Б. Гнучій //Науковий вісник НУБіП України. Серія “Техніка та енергетика АПК”. – 2012. – Вип.174, ч. 2. – С.239–245.

5. Теллес Д. Применение метода граничных элементов для решения неупругих задач/ Теллес Д. – М.: Стройиздат, 1987. – 159 с.

Для задачи о плоских деформациях вязкоупругого материала абелевского типа получена система гранично-временных интегральных уравнений второго рода. Предложен алгоритм решения данной системы.

Вязкоупругость, ядро релаксации, модель Работнова, функция релаксации, вязкоупругий потенциал, фундаментальное решение, плотность потенциала, ядро интегрального уравнения, подвижная граница.

For a problems about plane deformations of viscoelastic material of the Abelian type the system of second type boundary-time integral equations is got. The algorithm of decision of this system is offered.

Viscoelasticity, kernel of relaxation, model of Rabotnov, function of relaxation, viscoelastic potential, fundamental solution, density of potential, kernel of integral equation, movable boundary.

УДК 537:538

НАБЛИЖЕНІ МЕТОДИ ОБЧИСЛЕННЯ ПРОВІДНОСТІ В НЕОДНОРІДНИХ СИСТЕМАХ

***Н.Г. Шкода, кандидат фізико-математичних наук
Інститут хімії поверхні НАН України***

***С.В. Шостак, кандидат фізико-математичних наук
Національний університет
біоресурсів і природокористування України***

Розвинуто загальний теоретичний метод розрахунку провідності для широкого класу фізичних, геофізичних та біологічних неоднорідних систем. Вважається, що в таких системах неоднорідності розміщені випадковим чином, причому розміри неоднорідностей значно менші за довжину хвилі змінного електричного поля, в якому знаходиться система, що вивчається. Показано, що знаходження ефективної провідності таких систем зводиться до розв'язку інтегрального рівняння. Розвинуто два наближення такого розв'язку: метод усередненої Т-матриці та метод когерентного потенціалу. Проведено аналіз та порівняння точності цих методів.

Ефективна провідність, метод усередненої Т-матриці, метод когерентного потенціалу.

Майже з часів Максвелла викликали інтерес властивості переносу заряду в матеріалах з невпорядкованими неоднорідностями. Звичайно

5. Теллес Д. Применение метода граничных элементов для решения неупругих задач/ Теллес Д. – М.: Стройиздат, 1987. – 159 с.

Для задачи о плоских деформациях вязкоупругого материала абелевского типа получена система гранично-временных интегральных уравнений второго рода. Предложен алгоритм решения данной системы.

Вязкоупругость, ядро релаксации, модель Работнова, функция релаксации, вязкоупругий потенциал, фундаментальное решение, плотность потенциала, ядро интегрального уравнения, подвижная граница.

For a problems about plane deformations of viscoelastic material of the Abelian type the system of second type boundary-time integral equations is got. The algorithm of decision of this system is offered.

Viscoelasticity, kernel of relaxation, model of Rabotnov, function of relaxation, viscoelastic potential, fundamental solution, density of potential, kernel of integral equation, movable boundary.

УДК 537:538

НАБЛИЖЕНІ МЕТОДИ ОБЧИСЛЕННЯ ПРОВІДНОСТІ В НЕОДНОРІДНИХ СИСТЕМАХ

***Н.Г. Шкода, кандидат фізико-математичних наук
Інститут хімії поверхні НАН України***

***С.В. Шостак, кандидат фізико-математичних наук
Національний університет
біоресурсів і природокористування України***

Розвинуто загальний теоретичний метод розрахунку провідності для широкого класу фізичних, геофізичних та біологічних неоднорідних систем. Вважається, що в таких системах неоднорідності розміщені випадковим чином, причому розміри неоднорідностей значно менші за довжину хвилі змінного електричного поля, в якому знаходиться система, що вивчається. Показано, що знаходження ефективної провідності таких систем зводиться до розв'язку інтегрального рівняння. Розвинуто два наближення такого розв'язку: метод усередненої Т-матриці та метод когерентного потенціалу. Проведено аналіз та порівняння точності цих методів.

Ефективна провідність, метод усередненої Т-матриці, метод когерентного потенціалу.

Майже з часів Максвелла викликали інтерес властивості переносу заряду в матеріалах з невпорядкованими неоднорідностями. Звичайно

причиною цього є існування великої кількості фізичних, геофізичних та біологічних систем, в яких неоднорідності розміщуються випадковим чином. Наприклад, системами з невпорядкованими неоднорідностями є полікристали і композиційні матеріали, геофізичні породи, ґрунти, суспензії та біологічні колоїдні розчини.

Нехай такі системи описуються тензором провідності $\vec{\sigma}(\mathbf{x})$, який змінюється в просторі, заданим довільним чином. Потрібно розв'язати основну задачу: обчислити ефективну провідність середовища по заданому тензору провідності кожної складової неоднорідного середовища при відомому статистичному законі, за яким змінюється провідність у просторі. Це одна з задач фізики суцільних середовищ, яка відрізняється від задач, пов'язаних з наявністю мікроскопічних неоднорідностей, таких як домішки чи вакансії, які звичайно досліджуються за допомогою теоретичних методів, що описують розсіювання.

Одним із найуспішніших методів розгляду транспортних властивостей широкого класу подібних систем із невпорядкованими неоднорідностями є використання наближення ефективного середовища, вперше запропонованого Бруггеманом [4] й якісно дослідженого Ландауєром [5]. Перевага цього методу полягає у відсутності обмежень на концентрацію неоднорідностей чи на провідність, що слабо змінюються [6–8]. Звичайно подібне наближення можна застосувати для розгляду теплопереносу, діелектричних властивостей, магнітної проникності і дифузії в неоднорідних матеріалах, оскільки формально всі ці процеси визначаються подібними рівняннями. Крім цього, це наближення в останні роки було частково розповсюджене на розв'язок більш складної задачі визначення пружних констант гетерогенних (різномірних) матеріалів Коррінгом [9] та Зеллером і Дедеріксом [10].

Мета досліджень – узагальнення наближення (методу) ефективного середовища для розгляду середовищ з неоднорідностями, які мають довільну форму, розмір, орієнтацію і тензори провідності довільної симетрії.

Матеріали та методика досліджень. Для отримання узагальнення спочатку нами записано інтегральне рівняння для електричного поля в середовищі, яке потім розв'язувалося наближеними методами. Методику розв'язку застосовують для з'ясування характеру середнього поля в середовищі в наближенні ефективного середовища. Також використовується аналогія, раніше помічена Губернатісом і Крумханслом [11], між цією методикою і подібними методами середнього поля, які використовуються в теорії розсіювання електронів в розупорядкованих бінарних сплавах [12]. Дійсно, за загальною аналогією з задачею для сплавів можна визначити „апроксимацію усередненої Т-матриці” (АУМ) [10] та „апроксимацію когерентного потенціалу” (АКП) [13], яка еквівалентна методу ефективного середовища.

Результати досліджень. Нами розглядається неоднорідне середовище об'ємом V , обмеженим поверхнею S , яке характеризується тензором провідності $\vec{\sigma}(\mathbf{x})$, що змінюється в просторі. Покладемо, що прові-

дником є неупорядковане середовище. Зміст неупорядкованості полягає в тому, що усереднений ансамбль $\vec{\sigma}(\mathbf{x})$, який позначається $\langle \vec{\sigma}(\mathbf{x}) \rangle$, не залежить від $\mathbf{x}$. Також зручно висунути „ергодичну” гіпотезу про еквівалентність усередненої геометрії усередненому об’єму. Наприклад, $\langle \vec{\sigma} \rangle = V^{-1} \int_V \vec{\sigma}(\mathbf{x}) d^3x$. Надалі ми будемо розраховувати всі середні у вигляді усереднення за об’ємом.

Властивості переносу заряду в таких системах визначаються ефективним тензором провідності $\vec{\sigma}_e$, що не залежить від статистичного розподілу неоднорідностей в просторі. Найлегше визначити $\vec{\sigma}_e$ можна у випадку, коли на границі провідного середовища прикладене постійне електричне поле $\mathbf{E}_0$. Це значить, що скалярний потенціал на S дорівнює $\Phi(\mathbf{x}) = -\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{x}$. Тоді $\vec{\sigma}_e$ визначається за виразом

$$\langle \mathbf{J} \rangle = \vec{\sigma}_e \langle \mathbf{E} \rangle, \quad (1)$$

де $\mathbf{J}$ – густина струму.

Зазначимо, що $\langle \mathbf{E} \rangle = \mathbf{E}_0$ – прикладене поле. Щоб отримати апроксимації $\vec{\sigma}_e$, ми тепер розкладемо в ряд $\vec{\sigma}(\mathbf{x})$ за постійною еталонною провідністю $\vec{\sigma}_0$, написавши

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \vec{\sigma}_0 + \delta \vec{\sigma}(\mathbf{x}). \quad (2)$$

Тут $\vec{\sigma}_0$ є довільною постійною і може бути вибрана будь-яким зручним способом. Можливі варіанти вибору будуть розглядатися пізніше. Підставивши (2) в (1), отримуємо:

$$\langle \mathbf{J} \rangle = \vec{\sigma}_0 \langle \mathbf{E} \rangle + \langle \delta \vec{\sigma} \mathbf{E} \rangle. \quad (3)$$

Таким чином, для знаходження $\vec{\sigma}_e$ потрібна апроксимація для величини $\langle \delta \vec{\sigma} \mathbf{E} \rangle$.

Тепер ми виведемо просте інтегральне рівняння для $\mathbf{E}(\mathbf{x})$, яке можна розв’язати різними способами, щоб отримати декілька апроксимацій $\vec{\sigma}_e$. У цьому випадку електростатичні рівняння мають такий вигляд: $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$, $\nabla \times \mathbf{E} = 0$. Поєднавши їх з матеріальними рівняннями $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \vec{\sigma}(\mathbf{x}) \mathbf{E}(\mathbf{x})$, ми отримаємо рівняння для електростатичного потенціалу $\Phi(\mathbf{x})$:

$$\nabla \cdot \vec{\sigma} \langle \mathbf{x} \rangle \nabla \Phi(\mathbf{x}) = 0. \quad (4)$$

Використовуючи рівняння (2) – (3), знаходимо:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{\sigma}_0 \nabla \Phi(\mathbf{x}) &= -\nabla \cdot \delta \vec{\sigma}(\mathbf{x}) \nabla \Phi(\mathbf{x}) \quad \text{в } V, \\ \Phi(\mathbf{x}) &= \Phi_0(\mathbf{x}) \equiv -\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{x} \quad \text{на } S. \end{aligned} \quad (5)$$

Введемо функцію Гріна $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$, визначивши її як

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{\sigma}_0 \nabla G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') &= -\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \quad \text{в } V, \\ G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') &= 0, \quad \mathbf{x}' \quad \text{на } S. \end{aligned} \quad (6)$$

Тоді для $\Phi(\mathbf{x})$ можна одержати:

$$\Phi(\mathbf{x}) = \Phi_0(\mathbf{x}) + \int_V G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \nabla' \cdot \delta \vec{\sigma}(\mathbf{x}') \nabla' \Phi(\mathbf{x}') d^3 x'. \quad (7)$$

Інтегруючи по частинах і взявши градієнт від кожної частини, знаходимо

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \mathbf{E}_0 - \int_V [\delta \mathbf{J}(\mathbf{x}') \cdot \nabla'] \nabla G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') d^3 x', \quad (8)$$

де $\delta \mathbf{J}(\mathbf{x}') = \delta \vec{\sigma}(\mathbf{x}') \mathbf{E}(\mathbf{x}')$. Тут нами враховано, що $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = G(\mathbf{x}', \mathbf{x})$. Рівняння (8) можна записати у короткому вигляді

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \mathbf{E}_0 - \int d^3 x' \vec{S}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \delta \vec{\sigma}(\mathbf{x}') \mathbf{E}(\mathbf{x}'), \quad (9)$$

де тензор $\vec{S}(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ визначається рівнянням:

$$S_{\alpha\beta}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \frac{\partial}{\partial x'_\alpha} \frac{\partial}{\partial x_\beta} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}'). \quad (10)$$

Після цього можна записати точний формальний розв'язок відносно $\vec{\sigma}_e$. Із рівняння (9) маємо:

$$\delta \vec{\sigma}(\mathbf{x}) \mathbf{E}(\mathbf{x}) = \delta \vec{\sigma}(\mathbf{x}) \mathbf{E}_0 + \delta \vec{\sigma}(\mathbf{x}) \int d^3 x' \vec{S}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \delta \vec{\sigma}(\mathbf{x}') \mathbf{E}(\mathbf{x}'). \quad (11)$$

Визначаючи тензор $\tilde{\chi}(\mathbf{x})$ виразом

$$\delta \vec{\sigma}(\mathbf{x}) \mathbf{E}(\mathbf{x}) = \tilde{\chi}(\mathbf{x}) \mathbf{E}_0, \quad (12)$$

знаходимо

$$\tilde{\chi}(\mathbf{x}) = \delta \vec{\sigma}(\mathbf{x}) + \delta \vec{\sigma}(\mathbf{x}) \int d^3 x' \vec{S}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \tilde{\chi}(\mathbf{x}'). \quad (13)$$

Порівняння (1) і (3) з (12) показує, що

$$\vec{\sigma}_e = \vec{\sigma}_0 + \langle \tilde{\chi} \rangle. \quad (14)$$

Таким чином, задача зводиться до визначення методів розрахунку величини $\langle \tilde{\chi} \rangle$.

Характер апроксимацій, які можна вивести із цього розгляду, залежить від точності відмінних ознак розглядуваного неоднорідного середовища. У цій роботі ми розглядаємо полікристалічні чи композиційні середовища, гірські породи, ґрунти, тобто системи, які складаються із невпорядкованої сукупності елементів чи кристалітів, кожний з яких не має домішок і для кожного індивідуально добре визначені коефіцієнти переносу. Неоднорідності можуть відрізнятися за формою, розмірами, складом і орієнтацією кристалографічних осей.

Для такої системи клас апроксимацій можна записати так. Прийmemo, що $\mathbf{x}$ лежить в i -му кристаліті, а об'єм кристаліта рівний $\mathcal{V}_i$. Тоді рівняння (13) можна записати як

$$\tilde{\chi}(\mathbf{x}) = \delta \vec{\sigma}_i + \delta \vec{\sigma}_i \int_{\mathcal{V}_i} d^3 x' \vec{S}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \tilde{\chi}(\mathbf{x}') + \delta \vec{\sigma}_i \int_{V-\mathcal{V}_i} d^3 x' \vec{S}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \tilde{\chi}(\mathbf{x}'), \quad (15)$$

де $\delta \vec{\sigma}_i = \vec{\sigma}_i - \vec{\sigma}_0$, $\delta \vec{\sigma}_i$ – тензор провідності i -го елемента. В апроксимації останній інтеграл в (15) замінюється його середнім значенням. Тоді із (15) ми можемо написати:

$$\delta\vec{\sigma}_i \int_{V-g_i} d^3x' \vec{S}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \vec{\chi}(\mathbf{x}') \approx \delta\vec{\sigma}_i \int_{V-g_i} d^3x' \vec{S}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \langle \vec{\chi} \rangle. \quad (16)$$

Цей вираз для $\mathbf{x}$ в i -му елементі. Рівняння (16) замикає інтегральне рівняння для $\vec{\chi}$ і дає можливість вирахувати $\vec{\chi}(\mathbf{x})$ через $\langle \vec{\chi} \rangle$, яке, в свою чергу, можна визначити із $\vec{\chi}(\mathbf{x})$.

Апроксимація (16) не є єдиною, але залежить від вибору еталонної провідності $\vec{\sigma}_0$. „Найкращим” із усіх можливих, напевне, є вибір у випадку самоузгодження, коли забезпечується

$$\langle \vec{\chi} \rangle = 0. \quad (17)$$

При такому виборі, враховуючи рівняння (14), $\vec{\sigma}_e = \vec{\sigma}_0$. Рівняння (17) визначає загальну аналогію наближення когерентного потенціалу, яке успішно використовувалося при дослідженні електронних станів у неупорядкованих бінарних сплавах. У результаті (в апроксимації (17)) реальне середовище, яке оточує кожний кристаліт, замінюється самоузгоджено визначеним ефективним середовищем. Різні апроксимації без самоузгодження, визначені рівнянням (16), можна розглядати сукупно як аналоги наближення усередненої Т-матриці в теорії сплавів.

Ці класи апроксимацій у принципі можна застосувати щодо дослідження композиційних матеріалів, які містять кристали довільної форми, а тензори провідності яких мають довільну симетрію. Однак, якщо зерна приймають форму еліпсоїдів, апроксимація (16) приводить до $\vec{\chi}(\mathbf{x})$, яка однорідна в межах кожного зерна [12], а $\vec{\sigma}_e$ можна визначити у дуже компактному вигляді. Для підтвердження цього ми підставляємо (16) у (15), інтегруємо за частинами обидва інтеграли в рівнянні (15) і використовуємо граничну умову із рівняння (6), отримуємо:

$$\chi_i^{\alpha\beta} = \delta\sigma_i^{\alpha\beta} - \delta\sigma_i^{\alpha\gamma} \left(\oint_{S'} d^2x' \frac{\partial}{\partial x_\gamma} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') n'_\delta \right) \times (\chi_i^{\delta\beta} - \langle \chi \rangle_{\delta\beta}), \quad (18)$$

де χ_i – значення $\vec{\chi}(\mathbf{x})$ для $\mathbf{x}$, що знаходиться у межах i -го зерна, n'_δ – складова вектора нормалі $\mathbf{n}'$, направленою від S' назовні. Нижні індекси, які являють собою букви грецького алфавіту, і верхні індекси в рівнянні (18) позначають Декартові складові і повторюють індекси, наведені вище. В межах великого об'єму $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ є функція Гріна вільного простору, задовольняючи диференціальному рівнянню (6) і граничній умові $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \rightarrow 0$ при $|\mathbf{x} - \mathbf{x}'| \rightarrow \infty$ і стає таким чином лише функцією $\mathbf{x} - \mathbf{x}'$. Тоді поверхневий інтеграл є константою і не залежить від $\mathbf{x}$, а (18) приймає вигляд

$$\vec{\chi}_i = \delta\vec{\sigma}_i + \delta\vec{\sigma}_i \vec{\Gamma}_i (\vec{\chi} - \langle \vec{\chi} \rangle), \quad (19)$$

де

$$\Gamma_i^{\alpha\beta} = - \oint_{S'} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} G(\mathbf{x} - \mathbf{x}') n'_\beta d^2x'. \quad (20)$$

Розв'язуючи (19) відносно $\vec{\chi}_i$ через $\langle \vec{\chi} \rangle$, отримуємо

$$\tilde{\chi}_i = (\tilde{\mathbf{I}} - \delta\tilde{\sigma}_i\tilde{\Gamma}_i)^{-1} \delta\tilde{\sigma}_i + \delta\tilde{\sigma}_i (\tilde{\mathbf{I}} - \tilde{\Gamma}_i \langle \tilde{\chi} \rangle), \quad (21)$$

де $\tilde{\mathbf{I}}$ – одинична матриця 3×3 .

Тепер рівняння (21) можна усереднити і розв'язати відносно $\langle \tilde{\chi} \rangle$. Отриманий результат можна підставити в (14) і знайти, що

$$\tilde{\sigma}_e = \tilde{\sigma}_0 + \left\langle (\tilde{\mathbf{I}} - \delta\tilde{\sigma}_i\tilde{\Gamma}_i)^{-1} \right\rangle \left\langle (\tilde{\mathbf{I}} - \delta\tilde{\sigma}_i\tilde{\Gamma}_i)^{-1} \delta\tilde{\sigma} \right\rangle, \quad (22)$$

де

$$\begin{aligned} \left\langle (\tilde{\mathbf{I}} - \delta\tilde{\sigma}\tilde{\Gamma})^{-1} \right\rangle &= \lim_{V \rightarrow \infty} V^{-1} \sum_i \mathcal{G}_i (\tilde{\mathbf{I}} - \delta\tilde{\sigma}_i\tilde{\Gamma}_i)^{-1}, \\ \left\langle (\tilde{\mathbf{I}} - \delta\tilde{\sigma}\tilde{\Gamma})^{-1} \delta\tilde{\sigma} \right\rangle &= \lim_{V \rightarrow \infty} V^{-1} \sum_i \mathcal{G}_i (\tilde{\mathbf{I}} - \delta\tilde{\sigma}_i\tilde{\Gamma}_i)^{-1} \delta\tilde{\sigma}_i. \end{aligned} \quad (23)$$

Рівняння (12) є необхідним рівнянням АУМ для $\tilde{\sigma}_e$

$$\left\langle (\tilde{\mathbf{I}} - \delta\tilde{\sigma}\tilde{\Gamma})^{-1} \delta\tilde{\sigma} \right\rangle = 0. \quad (24)$$

Апроксимація ефективного середовища легко узагальнюється для дослідження полікристалічних матеріалів. Нами розглядається приклад полікристалічного матеріалу, який складається із майже сферичних кристалітів однакового складу, але який має анізотропний тензор провідності. Ми також приймаємо, що головні осі кристалітів орієнтовані випадковим чином, тобто однакова ймовірність орієнтації у будь-якому напрямку. Ефективна провідність середовища буде скалярною величиною, $\tilde{\sigma}_e = \sigma_e \tilde{\mathbf{I}}$, а тензор $\tilde{\Gamma}$ знову буде даватися рівнянням (20). Умова самоузгодженості, що визначає σ_e , приймає вигляд:

$$\left\langle \left[1 + (1/3\sigma_e)(\tilde{\sigma} - \sigma_e \tilde{\mathbf{I}}) \right]^{-1} (\tilde{\sigma} - \sigma_e \tilde{\mathbf{I}}) \right\rangle = 0, \quad (25)$$

де дужки означають усереднення за можливими орієнтаціями кристалітів.

Особливо легко розв'язується рівняння (25) для одноосьових кристалітів. Якщо координатні осі паралельні головним осям кристаліта, то тоді $\tilde{\sigma}$ прийме вигляд:

$$\tilde{\sigma} = \sigma_0 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{pmatrix}. \quad (26)$$

В інших координатних системах $\tilde{\sigma}$ буде зв'язуватися з (26) перетворенням подібності. У цьому випадку можна легко показати, що рівняння (17) зводиться до квадратного рівняння для σ_e , яке можна розв'язати та отримати просто:

$$x = \frac{1}{4} \left[-3 - (9 + 8\varepsilon)^{1/2} \right]. \quad (27)$$

Тут $x = \sigma_e/\sigma_0 - 1$ і $\varepsilon = \alpha - 1$. Для малих значень ε розв'язок рівняння (27) має вигляд $x = 1/3\varepsilon - 2/27\varepsilon^2$. Зазначимо, що при великому ε $x \sim (\alpha/2)^{1/2}$, тоді як при $\varepsilon \rightarrow -1$ $x \rightarrow -1/2$ чи $\sigma_e/\sigma_0 \rightarrow +1/2$. Викликає подив,

що в границі АКП σ_e таке ж, як і визначене рівнянням (27), так що композит із ізотропними сферичними кристалітами має дві третини провідності σ_0 , а одну третину $\alpha\sigma_0$.

Висновки

Розвинутий нами загальний метод визначення ефективної провідності неоднорідних систем може знайти застосування при розрахунках ефективних провідностей широкого класу пористих дисперсних систем з наявністю в парах провідних водних розчинів різноманітних солей. Такі системи добре моделюють геологічні породи, ґрунти різного ступеня засоленості, піски тощо. Виходячи з цього, можна стверджувати, що ми маємо загальний теоретичний метод (на відміну від наближених методів, наведених в [1–3] підрахунку ефективної провідності різноманітних ділянок земної поверхні. Знання ефективної провідності цих ділянок дозволяє за відомими формулами обчислити коефіцієнт відбивання від них електромагнітних хвиль, а отже дозволяє методом оберненої електродинамічної задачі [1–3] визначити і внутрішню структуру та склад ґрунтів (їх пористість, вологість, засоленість тощо).

Список літератури

1. Бойко В.В. Електродинамічні характеристики зволожених дисперсних систем / Бойко В.В., Гречко Л.Г., Шкода Н.Г., Шостак С.В. // Збірник наукових праць Національного аграрного університету. – 2002. – Т. 7. – С.21-30.
2. Бойко В.В. Ефективні електродинамічні характеристики зволожених дисперсних систем / Бойко В.В., Гречко Л.Г., Шкода Н.Г., Шостак С.В. // Науковий вісник Національного аграрного університету. – 2002. – Т. 49. – С.16–24.
3. Бойко В.В. Ефективна діелектрична проникність зволожених дисперсних систем в наближенні локальної пористості / Бойко В.В., Гречко Л.Г., Шкода Н.Г., Шостак С.В. // Збірник наукових праць Національного аграрного ун-ту. – 2002. – Т. 8. – С.103–113
4. Bruggeman D. A. G. // Ann. Phys. (Leipz.). – 1935. – 24. – P.636.
5. Landauer R. // J. Appl. Phys. – 1952. – 23. – P.779.
6. Herring C. // J. Appl. Phys. – 1960. – 31. – P. 1939.
7. Cohen M. N. and Jorther J. // Phys. Rev. Lett. – 1973. – 30. – P. 696.
8. Stachowiak H. // Physica. – 1970. – 45. – P. 481.
9. Korringa J. // J. Math. Phys. – 1973. – 14. – P. 509.
10. Zeller R. and Dederichs P. H. // Phys. Status Solidi. – 1973. – 55. – P. 831.
11. Gubernatis J. E. and Krumhansl J. A. // J. Appl. Phys. – 1975. – 46. – P. 1875.
12. P. Soven P. // Phys. Rev. – 1967. – 156. – P. 809.
13. Korringa J. // J. Phys. Chem. Solids. – 1958. – 7. – P. 252.
14. Maxwell-Garnett J. C. // Philos. Trans. R. Soc. – 1904. – 203. – P. 385.
15. Kinoshita N. and Mura T. // Phys. Status Solidi. – 1971. – 5. – P. 758.

Развит общий теоретический метод расчета проводимости для широкого класса физических, геофизических и биологических неоднородных систем. Считается, что в таких системах неоднородности размещены случайным образом, причем размеры неоднородностей значительно меньше

длины волны переменного электрического поля, в котором находится система, которая изучается. Показано, что нахождение эффективной проводимости таких систем сводится к решению интегрального уравнения. Развита два приближения такого решения: метод усредненной T -матрицы и метод когерентного потенциала. Проведен анализ и сравнение точности этих методов.

Эффективная проводимость, метод усредненной T -матрицы, метод когерентного потенциала.

Developed a general theoretical method for calculating the conductivity for a wide class of physical, geophysical and biological heterogeneous systems. It is believed that in such systems heterogeneity placed randomly, and the size of heterogeneities is much smaller than the wavelength of the AC electric field, in which the system being studied. It is shown that finding an effective conductivity of such systems is reduced to the solution of the integral equation. Developed two approximations of the solution: method averaged T -matrix method and the coherent potential. The analysis and comparison of the accuracy of these methods.

Effective conductivity, method averaged T -matrix, method coherent potential.

УДК 537:538

ПОВЕРХНЕВІ ПЛАЗМОНИ ДВОХ МАЛИХ ЧАСТИНОК ІЗ ВРАХУВАННЯМ МУЛЬТИПОЛЬНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ НИМИ

**Н.Г. Шкода, кандидат фізико-математичних наук
Інститут хімії поверхні НАН України**

**С.В. Шостак, кандидат фізико-математичних наук
Національний університет
біоресурсів і природокористування України**

Вивчено електродинамічний відгук системи малих частинок на зовнішнє електричне поле. Проведено розрахунок результуючого електричного поля для системи сферичних малих частинок різних радіусів R_i з різними діелектричними проникностями $\varepsilon_i(\omega)$. Отримано аналітичні вирази для поляризованості системи, що складається з двох малих сферичних частинок з урахуванням мультипольної взаємодії між ними. Для випадку двох різних сферичних частинок у зовнішньому електричному полі розраховано частоти поверхневих мод. Всі розрахунки проведено в електростатичному наближенні.

Поверхневий плазмон, електродинамічний відгук, мультипольна взаємодія.

Вивчення процесів взаємодії електромагнітного випромінювання (ЕМВ) з ансамблями малих часток (МЧ) являють величезний інтерес як з

длины волны переменного электрического поля, в котором находится система, которая изучается. Показано, что нахождение эффективной проводимости таких систем сводится к решению интегрального уравнения. Развита два приближения такого решения: метод усредненной T -матрицы и метод когерентного потенциала. Проведен анализ и сравнение точности этих методов.

Эффективная проводимость, метод усредненной T -матрицы, метод когерентного потенциала.

Developed a general theoretical method for calculating the conductivity for a wide class of physical, geophysical and biological heterogeneous systems. It is believed that in such systems heterogeneity placed randomly, and the size of heterogeneities is much smaller than the wavelength of the AC electric field, in which the system being studied. It is shown that finding an effective conductivity of such systems is reduced to the solution of the integral equation. Developed two approximations of the solution: method averaged T -matrix method and the coherent potential. The analysis and comparison of the accuracy of these methods.

Effective conductivity, method averaged T -matrix, method coherent potential.

УДК 537:538

ПОВЕРХНЕВІ ПЛАЗМОНИ ДВОХ МАЛИХ ЧАСТИНОК ІЗ ВРАХУВАННЯМ МУЛЬТИПОЛЬНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ НИМИ

**Н.Г. Шкода, кандидат фізико-математичних наук
Інститут хімії поверхні НАН України**

**С.В. Шостак, кандидат фізико-математичних наук
Національний університет
біоресурсів і природокористування України**

Вивчено електродинамічний відгук системи малих частинок на зовнішнє електричне поле. Проведено розрахунок результуючого електричного поля для системи сферичних малих частинок різних радіусів R_i з різними діелектричними проникностями $\varepsilon_i(\omega)$. Отримано аналітичні вирази для поляризованості системи, що складається з двох малих сферичних частинок з урахуванням мультипольної взаємодії між ними. Для випадку двох різних сферичних частинок у зовнішньому електричному полі розраховано частоти поверхневих мод. Всі розрахунки проведено в електростатичному наближенні.

Поверхневий плазмон, електродинамічний відгук, мультипольна взаємодія.

Вивчення процесів взаємодії електромагнітного випромінювання (ЕМВ) з ансамблями малих часток (МЧ) являють величезний інтерес як з

точки зору неруйнівного контролю поверхні, так і при створенні композитних матеріалів з наперед заданими електродинамічними властивостями [1– 6].

У загальному випадку на характеристики спектрів поглинання МЧ (висоту, ширину і положення піків) впливають декілька чинників. Ті з них, які розглядаються в класичній теорії, зручно об'єднати в групи, які відповідають типам взаємодії в системі малих частинок. Перерахуємо ці взаємодії в порядку зменшення їх інтенсивності і, відповідно, їх впливу на оптичні спектри поглинання [5, 6] такими системами.

По-перше, взаємодія МЧ із зовнішнім електромагнітним полем. Вона обумовлена тільки характеристиками самих МЧ – їх формою, розміром, структурою (наявністю оболонок, додаткових шарів тощо) і властивостями матеріалу, з якого вони виготовлені.

По-друге, міжчастинкова взаємодія в системі МЧ. Ця взаємодія обумовлена характером просторового розподілу МЧ (щільний або розріджений розподіл; для МЧ несферичної форми має значення також характер їх просторової орієнтації : чи є вона впорядкованою або хаотичною), а також характером розподілу їх за розмірами (моно- або полідисперсний розподіл).

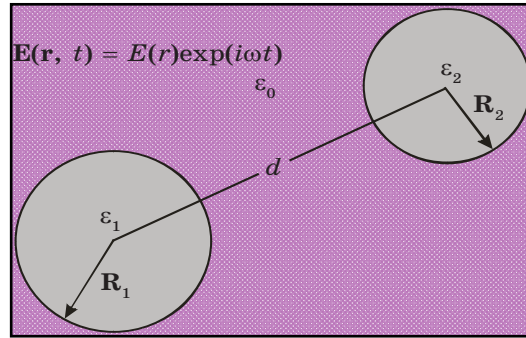
Мета досліджень – вивчення характеру електродинамічного відгуку в системі сферичних МЧ, що знаходяться в зовнішньому електричному полі $E_0 e^{i\omega t}$; визначення поляризованості МЧ, частоти поверхневих мод, а також аналіз частотного спектра поверхневих збуджень дипольної взаємодії частинок між собою.

Матеріали та методика досліджень. Можливо найбільш важливою і дослідженою із задач у теорії поглинання та розсіяння плоских електромагнітних хвиль малими частинками є задача про кулю з довільним радіусом і відомим показником заломлення або діелектричною проникністю. Для розв'язання цієї задачі можуть бути використані різні методи, кожен з яких має певні переваги при узагальненні результатів задачі про кулю з довільним радіусом, шарові, анізотропні, шарово-неоднорідні з неперервною зміною діелектричної проникності кулі та частинки із зарядженою поверхнею. Із відомих методів розв'язку виділимо три: метод Стреттона, метод потенціалів Дебая і метод Т-матриць. У цій роботі нами були використані механізми та закономірності поглинання і розсіяння ЕМВ окремими кульовими частинками з врахуванням мультипольної взаємодії між ними.

Розв'язок задачі розсіяння плоскої електромагнітної хвилі на кулі згідно із загальноприйнятою термінологією будемо називати розв'язком Мі, яка застосовується відносно взаємодії світла з частинками, розміри яких достатньо малі для того, щоб їх можна було описувати в рамках електростатичного наближення ($R \ll \lambda$).

Результати досліджень. Розглянемо випадок двох металевих сферичних часток, що знаходяться на відстані d один від одного (рису-

нок) у зовнішньому (змінному за часом) електричному полі з довжиною хвилі λ_0 значно більшою за розмір частинок і d [7, 8].



Дві малі кульові частинки на поверхні твердого тіла у зовнішньому електричному полі $\vec{E}(r, t)$

З урахуванням тільки дипольної взаємодії між частинками, тензор поляризованості i -тої частинки може бути поданий у вигляді:

$$\alpha_{im_1}^m = 4\pi a_{i1} \frac{1 + (-1)^m \eta_m a_{\bar{i}1} \delta_m^{m'}}{1 - \eta_m^2 \frac{a_{11} a_{21}}{d^6}}. \quad (1)$$

де $\bar{i} = 1$, якщо $i = 2$; $\bar{i} = 2$, якщо $i = 1$, $\varepsilon_0 \equiv \varepsilon_a$; R_i - радіус i -частинки:

$$a_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_0} R_i^3, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

Інші позначення ті ж.

Умова для знаходження частот поверхневих плазмонів (рівність нулю знаменника в (1)) в цьому випадку набуває вигляду:

$$\eta_m^2 \frac{R_1^3 R_2^3}{d^6} \left(\frac{\varepsilon_{1\infty} - \varepsilon_0}{\varepsilon_{1\infty} + 2\varepsilon_0} \right) \left(\frac{\varepsilon_{2\infty} - \varepsilon_0}{\varepsilon_{2\infty} + 2\varepsilon_0} \right) \left(\frac{\omega^2 - \omega_{e1}^2}{\omega^2 - \omega_{f1}^2} \right) \left(\frac{\omega^2 - \omega_{e2}^2}{\omega^2 - \omega_{f2}^2} \right) = 1. \quad (3)$$

Діелектричні проникності металевих сфер були вибрані в друдівському вигляді [2]:

$$\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_{1\infty} - \frac{\omega_{p1}^2}{\omega(\omega + i\gamma_1)}; \quad \varepsilon_2(\omega) = \varepsilon_{2\infty} - \frac{\omega_{p2}^2}{\omega(\omega + i\gamma_2)},$$

а при отриманні (3) γ_1, γ_2 прямували до нуля. Крім того, в (3) введені позначення:

$$\omega_{fi}^2 = \frac{\omega_{pi}^2}{\varepsilon_{i\infty} + 2\varepsilon_0}; \quad \omega_{ei}^2 = \frac{\omega_{pi}^2}{\varepsilon_{i\infty} - \varepsilon_0}, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

З урахуванням цих зауважень з рівняння (3) знаходимо частоти поверхневих плазмонів:

$$2(\omega_m^\pm)^2 = \omega_{f1}^2 + \omega_{f2}^2 \pm \left[(\omega_{f1}^2 - \omega_{f2}^2)^2 + 4\omega_{f1}^2 \cdot \omega_{f2}^2 \frac{(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)A_m^2}{(1 - \alpha_1 A_m^2)(1 - \alpha_2 A_m^2)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

де

$$A_m^2 = \eta_m^2 \frac{R_1^3 R_2^3}{d^6}, \quad \alpha_{12} = \alpha_1 \alpha_2; \quad \alpha_i = \frac{\varepsilon_{i\infty} - \varepsilon_0}{\varepsilon_{i\infty} + 2\varepsilon_0};$$

$$\bar{\omega}_{f1}^2 = \omega_{f1}^2 \frac{1 - \alpha_2 A_m^2}{1 - \alpha_{12} A_m^2}; \quad \bar{\omega}_{f2}^2 = \omega_{f2}^2 \frac{1 - \alpha_1 A_m^2}{1 - \alpha_{12} A_m^2}; \quad i = 1, 2.$$

Вираз (5) являє собою основну формулу для розрахунку частот поверхневих плазмонів у системі двох металевих сферичних різних частинок, що знаходяться в зовнішньому електричному полі на відстані d .

Розглянемо окремий випадок, коли частинки складаються з одного матеріалу ($\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_2(\omega)$), але мають різні розміри ($R_1 \neq R_2$). Тоді, з рівняння (5) знаходимо частоти поверхневих плазмонів у системі двох частинок [3]:

$$(\omega_m^\pm)^2 = \frac{(1 \pm A_m) \omega_f^2}{1 \pm \alpha_0 A_m}; \quad \omega_f = \frac{\omega_p^2}{\varepsilon_\infty + 2\varepsilon_0}; \quad \varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_2(\omega) \equiv \varepsilon(\omega),$$

де

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}; \quad \Delta = R_2/R_1 \quad (R_2 \leq R_1); \quad \alpha_0 = \frac{\varepsilon_\infty - \varepsilon_0}{\varepsilon_\infty + 2\varepsilon_0}; \quad A_m = \eta_m \Delta^{3/2} (R_1/d)^3$$

$$; \quad \eta_m = \begin{cases} 2, & m = (0; \parallel) \\ 1, & m = (\pm 1; \perp) \end{cases} \quad (7)$$

Знак $\parallel$ означає, що поле $\mathbf{E}_0$ спрямоване вздовж прямої, що сполучає центри частинок, а знак $\perp$ – поле спрямоване перпендикулярно цій прямій:

$$(\Delta\omega)^2 \equiv (\omega_0^+)^2 - (\omega_1^-)^2 = 3\omega_p^2 \left[\frac{(R_1 R_2)^{1/2}}{d} \right]^3 \quad (8)$$

При $R_1 = R_2$ максимальне значення $\Delta\omega$ досягається при $d = 2R_1$. Якщо $\varepsilon_\infty = \varepsilon_0 = 1$, то

$$\Delta\omega = (1/8)^{1/2} \omega_p \sim 0,35 \omega_p. \quad (9)$$

Зазначимо, що величина $\Delta\omega$ складає третю частину плазмової частоти ω_p матеріалу МЧ і є оціночною. У реальних системах необхідно враховувати електронне згасання (γ_1, γ_2) і реальні частотні залежності $\varepsilon_1(\omega)$ і $\varepsilon_2(\omega)$. Це вимагає громіздких чисельних обчислень і буде проведено надалі.

Висновки

На підставі розробленої нами загальної теорії взаємодії наночастинок з різноманітними поверхнями (у тому числі і біологічними) можна стверджувати, що мультипольна взаємодія виникає лише за присутності зовнішнього електричного поля $\mathbf{E}_0$ і вона призводить до зміни електродинамічних властивостей як МЧ, так і поверхні – перерозподілу зарядів, зрушенню положення піків і зміні інтенсивності поглинання електромагнітного випромінювання системою наночастинок, що знаходяться на поверхні.

Характер зміни процесів поглинання і розсіяння, як наночастинками, так і поверхнею залежить від електродинамічних параметрів поверхні і наночастинок (ефективна діелектрична проникність, фізико-хімічний стан

поверхні тощо). Це дає можливість отримувати інформацію про фізичні і хімічні параметри поверхні на підставі аналізу оптичних спектрів поглинання адсорбованих на ній малих частинок, наночастинок і молекул.

Список літератури

1. Борен К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. – М.: Мир, 1986. – 837 с.
2. Okamoto T. Optical absorption study of the surface plasmons resonance in gold nanoparticles immobilized onto a gold substrate by self-assembly technique / T. Okamoto, I. Yamaguchi. // J. Phys. Chem. B. – 2003. – V. 107, N 38. – P. 10321 – 10324.
3. Kreibig U. Optical Properties of Metal Clusters / U. Kreibig, M. Vollmer. – Berlin: Springer, 1995. – 532 p.
4. Gozhenko V.V. Electrodynamics of spatial clusters of spheres: substrate effects / V.V. Gozhenko, L.G. Grechko, K.W. Whites. // Phys. Rev. B. – 2003. – V. 68, N 13. – P. 125422 – 125438.
5. Gozhenko V.V. Substrate influence on infrared absorption by clusters of small spheres / V.V. Gozhenko, L.G. Grechko, N.G. Shkoda, K.W. Whites. // Proc. 6-th Int. Conf. on Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics. – Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 5065. – P. 122–126.
6. M.T. Haarmans and D. Bedeaux. Thin Solid Film, 224, page 117, 1993.
7. Gozhenko V.V., Grechko L.G., Whites K.W.: Electrodynamics of spatial clusters of spheres: substrate effects. Phys. Rev. B., 68, 125422-1–125422-16 (2003).
8. Blank A.Ya. Optical surface modes in a system of fine metallic particles / A.Ya. Blank, L.Y. Garanina, L.G. Grechko // Fiz. Nizk. Temp, V.25, N.10, (1067–1072), 1999.

Изучен электродинамический отклик систем малых частиц на внешнее электрическое поле. Проведен расчет результирующего электрического поля для системы сферических малых частиц разных радиусов R_i с разными диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_i(\omega)$. Получены аналитические выражения для поляризуемости системы из двух сферических малых частиц с учетом мультипольного взаимодействия их между собой. Для случая двух разных сферических частиц во внешнем электрическом поле рассчитаны частоты поверхностных мод. Все расчеты проведены в электростатическом приближении.

Поверхностный плазмон, электродинамический отклик, мультипольное взаимодействие.

The spectrum of superficial fashions of two metallic particles is considered in the external electric field E was calculated. A review on the external (variable in course of time) electric field of two bullet nanoparticles which are in the distance d one from other with a wave-length l_0 considerably anymore for the size of particles and d was founded.

The electrodynamical response of small particles system on external electric field was investigated. The resulting electric field was calculated for a system of small spherical particles of different radii R_i and permittivities $\varepsilon_i(\omega)$ placed near a substrate. Analytical expressions for the polarizability of a system of two small parti-

cles were received taking into account multipole substrate-particle interactions as well as interactions between the particles themselves. For a case of two different spherical particles, frequencies of surface plasmon modes were obtained. All the calculations are performed in the electrostatic approximation.

Surface plasmon, electrodynamics response, multipole interaction.

УДК 681.5.07

ОЦІНЮВАННЯ ОБЛАСТЕЙ СТІЙКОСТІ ПАРАМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ

Л.А. Панталієнко, кандидат фізико-математичних наук

Наведено результати чисельного розрахунку областей практичної стійкості лінійних параметричних систем зі змінною структурою. Розглянуто постановки задач стійкості на скінченному проміжку часу для структурно заданих множин початкових умов і параметрів.

Параметри, практична стійкість, лінійні системи зі змінною структурою, збурення.

У багатьох задачах прикладного характеру, зокрема прискорювальної техніки, фазові траєкторії динамічної системи можуть мати розриви на деяких поверхнях у певні моменти часу. Так, під час руху частинки у прискорюючому електричному прямокутному полі на вході та виході її з трубки дрейфу змінюється напрямок швидкості частинки [1]. Це означає, що проекції швидкості частинки мають певні розриви. Задачі аналізу розривних динамічних систем [5] охоплюють оцінювання областей стійкості, допусків на параметри, гарантованої чутливості [1,3,4]. Такого роду задачі, на підставі загальних теорем практичної стійкості для систем зі змінною структурою [3], пропонується розглядати з єдиних позицій, а відповідні оцінки одержувати в аналітичному вигляді.

Мета досліджень — розробка конструктивних алгоритмів побудови областей стійкості для лінійних параметричних систем зі змінною структурою за наявності постійно діючих збурень.

Матеріали та методика досліджень. У роботі застосовуються математичні методи практичної та параметричної стійкості за частиною змінних. Як параметри, зокрема можуть розглядатись і початкові умови у заданих структурах.

Дослідимо задачу про практичну стійкість для лінійних нестационарних параметричних систем зі змінною структурою

$$\frac{dx}{dt} = A^{(i)}(t)x + G^{(i)}(t)\alpha + f^{(i)}(t), \quad t \in [t_{i-1}, t_i], \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

cles were received taking into account multipole substrate-particle interactions as well as interactions between the particles themselves. For a case of two different spherical particles, frequencies of surface plasmon modes were obtained. All the calculations are performed in the electrostatic approximation.

Surface plasmon, electrodynamics response, multipole interaction.

УДК 681.5.07

ОЦІНЮВАННЯ ОБЛАСТЕЙ СТІЙКОСТІ ПАРАМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ

Л.А. Панталієнко, кандидат фізико-математичних наук

Наведено результати чисельного розрахунку областей практичної стійкості лінійних параметричних систем зі змінною структурою. Розглянуто постановки задач стійкості на скінченному проміжку часу для структурно заданих множин початкових умов і параметрів.

Параметри, практична стійкість, лінійні системи зі змінною структурою, збурення.

У багатьох задачах прикладного характеру, зокрема прискорювальної техніки, фазові траєкторії динамічної системи можуть мати розриви на деяких поверхнях у певні моменти часу. Так, під час руху частинки у прискорюючому електричному прямокутному полі на вході та виході її з трубки дрейфу змінюється напрямок швидкості частинки [1]. Це означає, що проекції швидкості частинки мають певні розриви. Задачі аналізу розривних динамічних систем [5] охоплюють оцінювання областей стійкості, допусків на параметри, гарантованої чутливості [1,3,4]. Такого роду задачі, на підставі загальних теорем практичної стійкості для систем зі змінною структурою [3], пропонується розглядати з єдиних позицій, а відповідні оцінки одержувати в аналітичному вигляді.

Мета досліджень — розробка конструктивних алгоритмів побудови областей стійкості для лінійних параметричних систем зі змінною структурою за наявності постійно діючих збурень.

Матеріали та методика досліджень. У роботі застосовуються математичні методи практичної та параметричної стійкості за частиною змінних. Як параметри, зокрема можуть розглядатись і початкові умови у заданих структурах.

Дослідимо задачу про практичну стійкість для лінійних нестационарних параметричних систем зі змінною структурою

$$\frac{dx}{dt} = A^{(i)}(t)x + G^{(i)}(t)\alpha + f^{(i)}(t), \quad t \in [t_{i-1}, t_i], \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

Тут $A^{(i)}(t)$, $G^{(i)}(t)$, $t \in [t_{i-1}, t_i]$, $i = 1, 2, \dots, N$ — матриці з інтегрованими елементами вимірності $n \times n$ та $n \times m$ відповідно, а постійно діючі збурення $f^{(i)}(t)$, $t \in [t_{i-1}, t_i]$, $i = 1, 2, \dots, N$ припускаються відомими або ж невідомими, але обмеженими:

$$\|f^{(i)}(t)\| \leq \left(\int_{t_{i-1}}^{t_i} \left(\sum_{j=1}^n |f_j^{(i)}(\tau)|^q \right)^{\frac{q_1}{q}} d\tau \right)^{\frac{1}{q_1}} \leq \bar{R}^{(i)}, \quad 1 \leq q \leq \infty, \quad 1 \leq q_1 < \infty, \quad t \in [t_{i-1}, t_i], \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

Нехай Φ_t — множина допустимих станів вектора x у момент часу $t \in [t_0, T]$ ($0 \in \Phi_t$, $t \in [t_0, T]$), а G_0^x , $G_0^\alpha \subset G_\alpha$ — множини допустимих початкових станів і параметрів системи (1) відповідно.

Означення 1. Незбурений розв'язок $x(t, 0) = 0$ системи (1) будемо називати $\{G_0^x, G_0^\alpha, \Phi_t, t_0, T\}$ — стійким, якщо $x(t, \alpha) \in \Phi_t$, $t \in [t_0, T]$ для будь-яких початкових умов $x(t_0, \alpha) \in G_0^x$ та довільних $\alpha \in G_0^\alpha \subset G_\alpha$.

Якщо обмеження на вектори станів і параметрів сумісного типу: x , $\alpha \in \Phi_{t, \alpha}$, $t \in [t_0, T]$, а оцінка початкової області визначається множиною $G_0^{x, \alpha}$, за аналогією вводиться поняття $\{G_0^{x, \alpha}, \Phi_{t, \alpha}, t_0, T\}$ — стійкості.

Означення 2. Незбурений рух $x(t, 0) = 0$ системи (1) будемо називати $\{G_0^{x, \alpha}, \Phi_{t, \alpha}, t_0, T\}$ — стійким, якщо $x(t)$, $\alpha \in \Phi_{t, \alpha}$, $t \in [t_0, T]$, лише тільки $x(t_0)$, $\alpha \in G_0^{x, \alpha}$.

Для одержання чисельних алгоритмів стійкості розглянемо лінійні та не- лінійні обмеження [3] на фазові координати:

$$\Phi_t = \Gamma_t = \{x : |l_s^*(t)x| \leq 1, \quad s = 1, 2, \dots, N\}, \quad t \in [t_0, T]; \quad (4)$$

$$\Phi_t = \Psi_t = \{x : \psi(x, t) \leq 1\}, \quad t \in [t_0, T]. \quad (5)$$

У випадку, коли оцінка початкової області визначається множиною $G_0^{x, \alpha}$, розглядатимуться обмеження на фазові координати та параметри системи сумісного типу:

$$\Phi_{t, \alpha} = \Gamma_{t, \alpha} = \{x, \alpha : |l_s^*(t)x + m_s^* \alpha| \leq 1, \quad s = 1, 2, \dots, N\}, \quad t \in [t_0, T]; \quad (6)$$

$$\Phi_{t, \alpha} = \Psi_{t, \alpha} = \{x, \alpha : \psi(x, t, \alpha) \leq 1\}, \quad t \in [t_0, T]. \quad (7)$$

У співвідношеннях (4) — (7) $l_s(t)$, $s = 1, 2, \dots, N$ — задані вектори вимірності n з кусково-неперервними елементами; m_s , $s = 1, 2, \dots, N$ — відомі сталі m -вимірні вектори; $\psi(x, t, \alpha)$, $\psi(x, t)$ — неперервно-диференційовні по x , α скалярні функції, за змінною t умова диференційовності може, взагалі кажучи, не виконуватись у точках t_i , $i = 1, 2, \dots, N$.

Для чисельного оцінювання областей стійкості задамо множини початкових умов і параметрів у формі еліпсоїдів

$G_0^x = \{x | x^* B x \leq c^2\}$, $G_0^\alpha = \{\alpha | \alpha^* B_\alpha \alpha \leq c_\alpha^2\}$, $G_0^{x, \alpha} = \{x, \alpha | x^* B x + \alpha^* B_\alpha \alpha \leq c^2\}$, де B , B_α — відомі додатноозначені квадратні матриці вимірності n та m відповідно. Тоді незбурений розв'язок $x(t, 0) = 0$ системи (1) у розумінні

означення 1 стійкості будемо називати $\{c, B, c_\alpha, B_\alpha, \Phi_t, t_0, T\}$ — стійким, а за наявності сумісних обмежень — досліджувати $\{c, B, B_\alpha, \Phi_{t,\alpha}, t_0, T\}$ - стійкість [3].

Критерій 1. Для того, щоб системи (1) була $\{c, B, c_\alpha, B_\alpha, \Gamma_t, t_0, T\}$ — стійкою за наявності відомих збурень, необхідно та достатньо, щоб виконувалась нерівність

$$c^2 \leq \min_{i=1,2,\dots,N} \min_{t \in [t_{i-1}, t_i]} \min_{s=1,2,\dots,N} \min_{\alpha \in G_\alpha^0} \frac{[1 - l_s^*(t)P^{(i)}(t, \alpha)]^2}{l_s^*(t)[Q^{(i)}(t)]^{-1}l_s(t)}, |l_s^*(t)P^{(i)}(t, \alpha)| < 1, t \in [t_{i-1}, t_i], i = 1, 2, \dots, N, \\ s = 1, 2, \dots, N, \alpha \in G_0^\alpha = \{\alpha \mid \alpha * B_\alpha \alpha \leq c_\alpha^2\}. \quad (8)$$

Тут

$$P^{(i)}(t, \alpha) = X^{(i)}(t, t_{i-1}) X^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2}) \dots X^{(2)}(t_2, t_1) [\tilde{G}^{(1)}(t_1)\alpha + \tilde{a}^{(1)}(t_1)] + X^{(i)}(t, t_{i-1}) \\ X^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2}) \dots$$

$$X^{(3)}(t_3, t_2) [\tilde{G}^{(2)}(t_2)\alpha + \tilde{a}^{(2)}(t_2)] + X^{(i)}(t, t_{i-1}) X^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2}) \dots X^{(4)}(t_4, t_3) [\tilde{G}^{(3)}(t_3)\alpha + \tilde{a}^{(3)}(t_3)] +$$

$$+ \dots + X^{(i)}(t, t_{i-1}) [\tilde{G}^{(i-1)}(t_{i-1})\alpha + \tilde{a}^{(i-1)}(t_{i-1})] + \tilde{G}^{(i)}(t)\alpha + \tilde{a}^{(i)}(t), i = 1, 2, \dots, N;$$

$$\tilde{G}^{(i)}(t) = \int_{t_{i-1}}^t X^{(i)}(t, \tau) G^{(i)}(\tau) d\tau;$$

$$\tilde{a}^{(i)}(t) = \int_{t_{i-1}}^t X^{(i)}(t, \tau) f^{(i)}(\tau) d\tau; X^{(i)}(t, t_{i-1}) - \text{нормована за моментом } t_{i-1} \text{ фундамен-}$$

тальна матриця розв'язків однорідної системи (1) при $\alpha = 0$:

$$\frac{dX^{(i)}(t, t_{i-1})}{dt} = A^{(i)}(t)X^{(i)}(t, t_{i-1}), X(t_{i-1}, t_{i-1}) = E, t \in [t_{i-1}, t_i], \quad (9)$$

а матриця $[Q^{(i)}(t)]^{-1} = [X^{(i)}(t, t_{i-1})X^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2})X^{(i-2)}(t_{i-2}, t_{i-3}) \dots X^{(1)}(t_1, t_0)]$.

$$\cdot B^{-1} [X^{(i)}(t, t_{i-1})X^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2})X^{(i-2)}(t_{i-2}, t_{i-3}) \dots X^{(1)}(t_1, t_0)]^*, t \in [t_{i-1}, t_i].$$

Доведення. Якщо послідовно, на кожному проміжку $[t_{i-1}, t_i]$, записати розв'язок системи (1) у формі Коші, одержимо таку формулу загального розв'язку для будь-якого моменту часу $t \in [t_{i-1}, t_i]$:

$$x(t) = X^{(i)}(t, t_{i-1}) X^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2}) \dots X^{(1)}(t_1, t_0) x(t_0, \alpha) + P^{(i)}(t, \alpha).$$

Далі подамо умову належності траєкторії системи (1) множині Γ_t у вигляді:

$$z(t) \in \{z(t) : -1 - l_s^*(t)P^{(i)}(t, \alpha) \leq l_s^*(t)z(t) < 1 - l_s^*(t)P^{(i)}(t, \alpha), s = 1, 2, \dots, N\}, t \in [t_{i-1}, t_i],$$

де $z(t) = X^{(i)}(t, t_{i-1}) X^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2}) \dots X^{(1)}(t_1, t_0) x(t_0, \alpha)$.

Визначивши відповідні екстремуми лінійної форми $l_s^*(t)z(t)$ на еліпсоїдах $\{z(t) : z^*(t)Q^{(i)}(t)z(t) \leq c^2\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, приходимо до нерівності (8).

Якщо постійно діючі збурення $f^{(i)}(t)$, $t \in [t_{i-1}, t_i]$ задовольняють умові (2), необхідно у формулі (8) взяти додатково мінімум по області $\{f^{(i)}(t): \|f^{(i)}(t)\| \leq \tilde{R}^{(i)}\}$.

Критерій 2. Для того, щоб система (1) була $\{c, B, c_\alpha, B_\alpha, \Psi_t, t_0, T\}$ – стійкою за наявності відомих збурень, необхідно та достатньо, щоб

$$c^2 \leq \min_{i=1,2,\dots,N} \min_{t \in [t_{i-1}, t_i]} \min_{\bar{x} \in \Psi'_t} \min_{\alpha \in G_\alpha^0} \frac{[g^*(\bar{x}, t)(\bar{x} - P^{(i)}(t, \alpha))]^2}{g_s^*(\bar{x}, t)[Q^{(i)}(t)]^{-1} g(\bar{x}, t)},$$

$g^*(\bar{x}, t)(\bar{x} - P^{(i)}(t, \alpha)) > 0$, $\bar{x} \in \Psi'_t$, $t \in [t_{i-1}, t_i]$, $i = 1, 2, \dots, N$, $\alpha \in G_\alpha^0 = \{\alpha \mid \alpha^* B_\alpha \alpha \leq c_\alpha^2\}$, де Ψ'_t , $t \in [t_0, T]$ – межа множини Ψ_t , $g^*(\bar{x}, t) = \text{grad}_x^* \psi(\bar{x}, t)$.

Доведення критерію 2 здійснюється аналогічно. При цьому замкнена опукла множина Ψ_t попередньо апроксимується дотичними гіперплощинами:

$$\Psi_t = \{x: \psi(x, t) \leq 1\} = \{x: g^*(\bar{x}, t)x \leq g^*(\bar{x}, t)\bar{x}, \bar{x} \in \Psi'_t\}, \quad t \in [t_0, T].$$

Критерій 3. Для того, щоб система (1) була $\{c, B, B_\alpha, \Gamma_{t,\alpha}, t_0, T\}$ – стійкою при відомих $f^{(i)}(t)$, $t \in [t_{i-1}, t_i]$, необхідно та достатньо, щоб виконувалось співвідношення

$$c^2 \leq \min_{i=1,2,\dots,N} \min_{t \in [t_{i-1}, t_i]} \min_{s=1,2,\dots,N} \frac{[1 - |p_s^*(t)\bar{P}^{(i)}(t, \alpha)|]^2}{p_s^*(t)[\tilde{Q}^{(i)}(t)]^{-1} p_s(t)},$$

$$|p_s^*(t)\bar{P}^{(i)}(t, \alpha)| < 1, \quad t \in [t_{i-1}, t_i], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad s = 1, 2, \dots, N.$$

де $p_s(t) = \begin{pmatrix} l_s(t) \\ m_s \end{pmatrix}$ – $(n+m)$ - вимірний вектор, а матриця $[\tilde{Q}^{(i)}(t)]^{-1}$

визначається за такою рівністю:

$$[\tilde{Q}^{(i)}(t)]^{-1} = [Y^{(i)}(t, t_{i-1})Y^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2})Y^{(i-2)}(t_{i-2}, t_{i-3}) \dots Y^{(1)}(t_1, t_0)] \cdot \begin{pmatrix} B^{-1} & 0 \\ 0 & B_\alpha^{-1} \end{pmatrix}.$$

$$[Y^{(i)}(t, t_{i-1})Y^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2})Y^{(i-2)}(t_{i-2}, t_{i-3}) \dots Y^{(1)}(t_1, t_0)]^*, \quad t \in [t_{i-1}, t_i].$$

$$P^{(i)}(t, \alpha) = Y^{(i)}(t, t_{i-1}) Y^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2}) \dots Y^{(2)}(t_2, t_1) \bar{a}^{(1)}(t_1) + Y^{(i)}(t, t_{i-1}) Y^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2}) \dots Y^{(3)}(t_3, t_2) \bar{a}^{(2)}(t_2) +$$

$$+ Y^{(i)}(t, t_{i-1}) Y^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2}) \dots Y^{(4)}(t_4, t_3) \bar{a}^{(3)}(t_3) + \dots + Y^{(i)}(t, t_{i-1}) \bar{a}^{(i-1)}(t_{i-1}) + \bar{a}^{(i)}(t),$$

$$\bar{a}^{(i)}(t) = \int_{t_i}^t Y^{(i)}(t, \tau) \bar{f}^{(i)}(\tau) d\tau, \quad \bar{f}^{(i)}(t) = \begin{pmatrix} f^{(i)}(t) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad Y^{(i)}(t, t_{i-1}) = \begin{pmatrix} X^{(i)}(t, t_i) & \tilde{G}^{(i)}(t) \\ 0 & E \end{pmatrix}.$$

Щоб одержати необхідні й достатні умови стійкості у випадку нелінійних обмежень (7) необхідно множину $\Psi_{t,\alpha}$ апроксимувати гіперплощинами та скористатися результатами критерію 3.

Наведені алгоритми можна застосовувати для розрахунку областей практичної стійкості нелінійних систем зі змінною структурою шляхом їх попередньої лінеаризації лінійно-незалежними функціями [2].

Результати досліджень. Для лінійних параметричних систем зі змінною структурою доведено необхідні та достатні умови практичної стійкості, що поширюються на нелінійні системи шляхом їх попередньої лінеаризації.

Висновки

На підставі загальних теорем практичної стійкості для параметричних систем розроблено алгоритми оцінки областей початкових умов і параметрів, зв'язаних з проектуванням реальних динамічних об'єктів.

Список літератури

1. Бублик Б.Н. Структурно-параметрическая оптимизация и устойчивость динамики пучков / Бублик Б.Н., Гаращенко Ф.Г., Кириченко Н.Ф. – К.: Наук. думка, 1985. – 304 с.
2. Панталієнко Л.А. Дослідження практичної стійкості нелінійних систем, залежних від параметрів / Л.А. Панталієнко // Науковий вісник НАУ. – 2005. – №90 – С. 185–191.
3. Панталієнко Л.А. Дослідження практичної стійкості параметричних моделей зі змінною структурою / Л.А. Панталієнко // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2012. – Вип. 174, ч.1. – С. 152–156.
4. Розенвассер Е.Н. Чувствительность систем управления / Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
5. Самойленко А.М. Дифференциальные уравнения с импульсным воздействием / А.М. Самойленко, Н.А. Перестюк – К.: Вища шк., 1987. – 287 с.

Приведены результаты численного расчета областей практической устойчивости линейных параметрических систем с переменной структурой. Рассмотрены постановки задач устойчивости на конечном промежутке времени для структурно заданных множеств начальных условий и параметров.

Параметры, практическая устойчивость, линейные системы с переменной структурой, возмущения.

The results of numerical calculation of areas of practical stability of linear parametric systems with variable structure. Considered tasking stability in a finite period of time for given sets of structural parameters of the initial conditions.

Parameters, practical stability, linear systems with variable structure, perturbations.

АНАЛІТИЧНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ СФЕРИЧНО-СИМЕТРИЧНИХ ДВОЧАСТКОВИХ РОЗПОДІЛІВ

О.Ю. Грищук, кандидат фізико-математичних наук
Інститут хімії поверхні НАН України
С.В. Стеценко, старший викладач
Національний університет
біоресурсів і природокористування України

Показано, що для сферично-симетричних двочасткових розподілів всі мультипольні моменти, крім дипольного, рівні нулю. Тому результат Максвелл-Гарнетта, або, відповідно співвідношення Клаузиуса-Моссотті для сферичних частинок, є вірним незалежно від концентрації частинок.

Сферична частинка, мультипольний момент, ефективна діелектрична проникність.

Застосування аналітичного підходу до дослідження граничної поляризованості гетерогенних систем було розглянуто в [1,3]. Для випадку частинок сферичної форми було виведено формули всіх мультипольних моментів, електричного поля та ефективної діелектричної проникності, які є справедливими для будь-якого заданного розподілу. Для несферичних розподілів наша діелектрична проникність відрізняється від результату Максвелл-Гарнетта: в цьому випадку відмінність має порядок долі об'єму, який займає частинка і може бути досить суттєвою. Ці результати отримані в [2].

Мета досліджень – аналіз важливого окремого випадку застосування аналітичного підходу до дослідження діелектричної системи сферичних частинок, при якому функція $f(\vec{r} - \vec{r}_i)$ є повністю сферично-симетричною.

Матеріали та методика досліджень. Якщо функція $f(\vec{r} - \vec{r}_i)$ є повністю сферично-симетричною, тоді $f_l^{(i)} = 0$ в силу ортогональності сферичних гармонік. Це означає, що інші частинки із зони кореляції не дають взагалі ніякого вкладу в локальне поле, що діє на дану частинку. Відповідно локальне поле стає однорідним, незалежно від того, яка при цьому може бути радіальна залежність $f(\vec{r} - \vec{r}_i)$. Це справедливо для частинок довільних форм та орієнтацій.

Для сферичних частинок рівняння

$$\sum_{l'} G_{l0}^{l'l'} = \delta_l^{l'} - v\alpha \delta_l^1 \delta_l^{l'} + (2l+1)\beta_l f_l^{l'}$$

із [2] зводиться до

$$G_l^{l'} = \delta_l^{l'} - v\alpha \delta_l^1. \quad (1)$$

Отже, безпосередньо знаходимо:

$$(G^{-1})_l^{l'} = \delta_l^{l'} + \frac{v\alpha}{1-v\alpha} \delta_l^1 \delta_l^{l'}. \quad (2)$$

Підставляючи (2) у

$$q_{l0} = \sqrt{\frac{2}{4\pi}} \alpha \alpha^2 E_0 \delta_l^1.$$

із [2], отримуємо для мультипольних моментів:

$$q_{l0} = \sqrt{\frac{2}{4\pi(1-v\alpha)}} \alpha \alpha^2 E_0 \delta_l^1. \quad (3)$$

очасткового розподілу з дрібномасштабною сферично-симетричною кореляцією відмінні від нуля лише дипольні моменти.

Підставляючи

$$\sum_{l'} G_{l0}^{l'l'} (\vec{r} - \vec{r}_i) = f_l^{l'} + \left(\frac{8\pi}{9}\right) n^0 \delta_l^1 \delta_l^{l'} - \left(\frac{4\pi}{3}\right) n^0 \delta_l^1 \delta_l^{l'}$$

із [2] разом із $f_l^{l'} = 0$ та (3) у

$$U_{внут}(\vec{r}) = (V_0 / 2 - E_0 \vec{r}_i) - E_0 (\vec{r} - \vec{r}_i) + 4\pi \sum_{lm} \frac{q_{ilm}}{(2l+1)a_i^{2l+1}} |\vec{r} - \vec{r}_i|^l Y_{l,m}(\vec{r} - \vec{r}_i) +$$

$$4\pi \sum_{i'l'm'} q_{i'l'm'} \sum_{lm} C_{lm}^{l'm'} (\vec{r}_{i'} - \vec{r}_i) |\vec{r} - \vec{r}_i|^l Y_{l,m}(\vec{r} - \vec{r}_i), \quad |\vec{r} - \vec{r}_i| \leq a_i,$$

$$U_{зовн}(\vec{r}) = (V_0 / 2 - E_0 \vec{r}_i) - E_0 (\vec{r} - \vec{r}_i) + 4\pi \sum_{lm} \frac{q_{ilm}}{(2l+1)} \frac{Y_{l,m}(\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_{i'k}|^{l+1}} +$$

$$4\pi \sum_{i'l'm'} q_{i'l'm'} \sum_{lm} C_{lm}^{l'm'} (\vec{r}_{i'} - \vec{r}_i) |\vec{r} - \vec{r}_i|^l Y_{l,m}(\vec{r} - \vec{r}_i), \quad a_i \leq |\vec{r} - \vec{r}_i| \leq |\vec{r}_{i'} - \vec{r}_i| - a_{i'}, \quad i' \neq i. \text{ із [3],}$$

отримаємо для електричного поля:

$$\vec{E}_{внутр} = \vec{E}_0 + \frac{3v\alpha}{(1-v\alpha)} \vec{E}_0 - \frac{2v\alpha}{(1-v\alpha)} \vec{E}_0 - \frac{v\alpha}{(1-v\alpha)} \vec{E}_0, \quad (4)$$

$$|\vec{r} - \vec{r}_i| \leq \alpha,$$

$$\vec{E}_{\text{зовні}} = \vec{E}_0 + \frac{3v\alpha}{(1-v\alpha)}\vec{E}_0 - \frac{2v\alpha}{(1-v\alpha)}\vec{E}_0 - \frac{\alpha\alpha^3[3n_i(E_0n_i) - E_0]}{(1-v\alpha)|\vec{r} - \vec{r}_i|^3}, \quad (5)$$

$$a \leq |\vec{r} - \vec{r}_i| < a + \delta,$$

$$\text{де } \vec{n}_i = \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}.$$

Доданками в (4) і (5) є прикладене поле, поле зображень, поле інших частинок і поле самої i -тої частинки. Зовнішнє поле, яке рівне сумі прикладеного поля і поля зображень, дійсно є однорідним, хоч і залежить від властивостей системи.

Підставляючи (3) або (2) в

$$\frac{\epsilon_l}{\epsilon_m} = 1 + 4\pi \sqrt{\frac{4\pi n^0 q_{10}}{3}} \frac{1}{E_0} = 1 + 3v\alpha(G^{-1})_1^1$$

із [2], отримаємо ефективну діелектричну проникність:

$$\frac{\epsilon_l}{\epsilon_m} = \frac{1+2v\alpha}{1-v\alpha}, \quad (6)$$

що збігається з формулою Максвелл-Гарнетта.

Таким чином, ми довели, що це справедливо для будь-якого сферично-симетричного розподілу двох частинок, незалежно від концентрації частинок.

Результати досліджень. У рамках наближення середнього поля поправки до формули Максвелл-Гарнетта можуть впливати лише із несферичності розподілу, при якому мультипольні моменти сусідніх частинок дають вклад у локальне поле цієї частинки. Ці поправки з'являються перед усім із коефіцієнтів $f_i^{l'}$, а не із середньої концентрації частинок. Тому будь-яка теорія в рамках наближення середнього поля, що передбачає видозмінення формули Максвелл-Гарнетта, яка базується на середній концентрації частинок, а не специфіці двочасткового розподілу, несумісна з нашим результатом.

Висновки

Розглянуто важливий окремий випадок сферично-симетричного двочасткового розподілу. В цьому випадку частинки, які знаходяться за межами відстані кореляції від розглянутої частинки, не дають ніякого вкладу в локальне поле, що діє на цю частинку. Тому кожна частинка зазнає дії однорідного локального поля незалежно від того, якою при цьому є радіальна залежність розподілу, а також форма та орієнтація частинок. Якщо частинки сферичні, то вказане однорідне локальне поле може індукувати лише дипольні моменти, в той час як вищі мультипольні моменти зникають. Тому результат Максвелл-Гарнетта, або, відповідно, співвідношення Клаузиуса-Массотті для сферичних частинок, є чітким

наслідком і необмеженим у застосуванні до розбавлених систем або застосуванні дипольного наближення. Тому, відповідно, модифікації результату Максвелл-Гарнетта в рамках наближення середнього поля, які враховують лише концентрацію частинок і залишають без уваги специфічну форму двочасткового розподілу, відрізняються від нашого результату.

Список літератури

1. Гречко Л.Г. Эффективна 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. Грищук О.Ю. Аналітичний підхід до розподілу дрібномасштабних кореляцій включень дисперсних матричних систем / О.Ю. Грищук, С.В. Стеценко // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2011. – №166, ч.3. – С. 254–258.
3. Грищук О.Ю. Застосування аналітичного підходу до граничної поляризованості гетерогенних систем / О.Ю. Грищук, С.В. Стеценко // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2012. – №174, ч.1. – С.161–167.
4. Поглинання електромагнітного випромінювання багат шаровими кульовими частинками та матричними дисперсними системами / Л.Г. Гречко, Ю.Б. Гнучій, С.В. Шостак, С.В. Стеценко // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2010. – №153. – С. 188–198.

Показано, что для сферически-симметричных двухчастичных распределений все мультипольные моменты, кроме дипольного, равны нулю. Поэтому результат Максвелл-Гарнетта, или, соответственно соотношение Клаузиуса-Моссотти для сферических частиц, является верным независимо от концентрации частиц.

Сферическая частица, мультипольный момент, эффективная диэлектрическая проницаемость.

It is shown that for spherically-symmetric double-particle distributions all multipole moments, except dipole, levels to the zero. Therefore, result of Maxwell-Garnett, or, accordingly correlation of Clausius-Mossotti for spherical particles, is faithful regardless of concentration of particles.

Spherical particle, multipole moment, effective dielectric function.

МОДУЛІ ГЛАДКОСТІ НА МНОЖИНАХ КОМПЛЕКСНОЇ ПЛОЩИНИ З КУСКОВО-ГЛАДКОЮ МЕЖЕЮ

О. Ю. Дюженкова, кандидат фізико-математичних наук

Розглянуто аналог модуля гладкості Дітзіана-Тотіка для функцій, неперервних на кусково-гладких кривих комплексної площини. Означено D -модуль гладкості на областях з кутами та досліджено його властивості.

Наближення функцій, комплексна площина, множини з кусково-гладкою межею, D -модуль гладкості.

Нині у теорії наближень широко використовують модулі гладкості Дітзіана-Тотіка (DT -модулі гладкості) для функцій, неперервних на відрітку $[-1;1]$ ([5]). Вперше конструктивна характеристика рівномірного наближення функцій на множинах комплексної площини з кусково-гладкою межею була одержана в роботах В.К. Дзядика [1], Г.А. Алібекова, Ю.І. Волкова та інших. Її було наведено в термінах модулів гладкості функції $\tilde{f}(\omega) = f(\psi(\omega))$, де $\psi(\omega)$ – конформне відображення зовнішності круга на зовнішність розглядуваної множини.

Мета досліджень – аналіз теорії гладкостей З.Дітзіана і В.Тотіка для її поширення на множини комплексної площини з кусково-гладкою межею, введення аналога DT -модуля гладкості $\overline{\omega}_k(f, t)$ на областях з кутами та дослідження його властивостей для подальшої побудови конструктивної характеристики в термінах введенного D -модуля гладкості функції f .

Матеріали та методика досліджень. У роботі використовуються методи рівномірного наближення функцій ([1], [3], [4]), зокрема інтерполяція функцій многочленами Лагранжа.

Результати досліджень. Для функцій, неперервних на кусково-гладких кривих комплексної площини, введемо аналог модуля гладкості Дітзіана–Тотіка та дослідимо його властивості, зокрема доведемо властивості нормальності D -модуля гладкості.

Нехай $M \subset \mathbb{C}$ – замкнена обмежена множина, межа Γ якої є жордановою кривою і складається із скінченного числа гладких дуг Γ_j , які утворюють у точках стику a_j зовнішні кути $\alpha_j\pi$, $0 < \alpha_j < 2$.

Для всіх $z \in \Gamma$ і $h > 0$ позначимо

$$\rho_h(z) := h(|z - a_{j_*}|^{\frac{1}{\alpha_{j_*}} + h})^{\alpha_{j_*}}, \quad (1)$$

де j_* – індекс найближчої до z точки стику.

Нехай $L(z, f) := L(z, f; z_1, \dots, z_k)$ – многочлен Лагранжа степеня $\leq k-1$, який інтерполює функцію f у k різних точках $z_i \in \mathbb{C}$, $i = \overline{1, k}$.

Означення. D -модулем гладкості порядку k на кривій Γ неперервної на Γ функції f назовемо функцію

$$\overline{\omega}_k(\tau, f, \Gamma) := \sup_{h \in [0; \tau]} \sup_{\tilde{z} \in \Gamma \setminus \{z_0, z_1, \dots, z_k\}} \sup_{|f(z_0) - L(z_0, f; z_1, \dots, z_k)|}, \quad (2)$$

де внутрішній супремум береться по всіх наборах $\{z_0, z_1, \dots, z_k\}$ точок z_i , які задовольняють нерівності

$$|z_i - \tilde{z}| \leq \rho_h(\tilde{z}) \leq (3k+1)|z_i - z_j|, \quad i, j = \overline{0, k}, i \neq j. \quad (3)$$

Основним результатом роботи є теорема, в якій доведено, що D -модуль, як і класичний модуль гладкості, має властивість нормальності.

Теорема. Якщо функція f є неперервною на Γ , то для всіх $n \in \mathbb{N}$, $\tau \geq 0$ має місце нерівність

$$\overline{\omega}_k(n\tau, f, \Gamma) \leq cn^{\overline{\alpha}k} \overline{\omega}_k(\tau, f, \Gamma), \quad (4)$$

де $\overline{\alpha}$ – найбільше серед чисел α_j ; c – стала, що не залежить від n, τ, f .

Для доведення теореми скористаємося допоміжними лемами.

Позначимо через $U[z, r] := \{\zeta : |\zeta - z| \leq r\}$, $v[z, r] := \{\zeta : |\zeta - z| = r\}$ відповідно *круг* і *коло* радіусом $r > 0$ з центром у точці $z \in \mathbb{C}$.

Лема 1. Нехай M – зв'язна множина, $z \in M$ і точки $z_0, z_1, \dots, z_k$ містяться в $M \cap U[z, r]$. Якщо $M \cap v[z, r] \neq \emptyset$, то знайдеться k точок $z'_1, \dots, z'_k$, для яких виконуються співвідношення:

$$z'_i \in M \cap U[z, r], \quad i = \overline{1, k};$$

$$r \leq (3k+1)|z'_i - z'_j|, \quad i, j = \overline{1, k}, i \neq j; \quad (5)$$

$$r \leq (3k+1)|z_i - z'_j|, \quad i = \overline{0, k}, j = \overline{1, k}. \quad (6)$$

Лема 2. Нехай $C = \text{const} > 0$, $\tilde{z} \in \Gamma$, $z_0, \dots, z_k \in \Gamma$. Якщо при всіх $i, j = \overline{1, k}$, $i \neq j$ виконується $\rho_h(\tilde{z}) \leq C|z_i - z_j|$ і при всіх $i = \overline{0, k}$ – $|\tilde{z} - z_i| \leq \rho_h(\tilde{z})$, то

$$|f(z_0) - L(z_0, f; z_1, \dots, z_k)| \leq (1 + k(2C)^k) \overline{\omega}_k(h, f, \Gamma). \quad (7)$$

Лема 3. Нехай функція f задана в точках z_j , $j = \overline{j_*, j_*^*}$. Для довільного набору $\{j_1, \dots, j_k\}$ індексів має місце тотожність

$$L(z, f; \zeta_{j_1}, \dots, \zeta_{j_k}) = L(z, f; \zeta_{j_*}, \zeta_{j_*+1}, \dots, \zeta_{j_*+k-1}) +$$

$$+ \sum_{j=j_*}^{j^*-k} (L(\zeta_j, f; \zeta_{j+1}, \dots, \zeta_{j+k}) - f(\zeta_j)) \cdot A_j(z), \quad (8)$$

$$\text{де } A_j(z) := \sum_{p=1}^k \prod_{q=1}^{k-1} \frac{(\zeta_{j_p} - \zeta_{j+q})_+}{(\zeta_j - \zeta_{j+q})} \prod_{q=1, q \neq p}^k \frac{(z - \zeta_{j_q})}{(\zeta_{j_p} - \zeta_{j_q})}, \quad (9)$$

$$(\zeta_i - \zeta_j)_+ := \begin{cases} \zeta_i - \zeta_j, & i > j, \\ 0, & i \leq j. \end{cases}$$

Зауважимо, що в лемі 3 наведено у зручній формі відому тотожність Поповічіу [3], [4].

Надалі для зручності вважатимемо, що $a_1 := 0$ є точкою стику дуг Γ_1 і Γ_2 , при цьому $\alpha := \alpha_1$.

Лема 4. Існує число $R = R(\Gamma) > 0$, яке задовольняє умови:

- 1) для всіх точок $z \in U[0, R]$ точка 0 є найближчою точкою стику;
- 2) частина кривої Γ , що потрапила до круга $U[0, R]$, складається з двох гладких дуг γ_1 і γ_2 , які є частинами відповідно дуг Γ_1 і Γ_2 ;

3) коливання кута дотичної до кривої γ_1 не перевищує $\frac{\pi}{6}$, тобто має місце нерівність

$$|z' - z''| \leq 2||z'| - |z''|| \quad (10)$$

для всіх $z' \in \gamma_1$, $z'' \in \gamma_1$; так само коливання кута дотичної до γ_2 не перевищує $\frac{\pi}{6}$, отже виконується нерівність (9) для всіх $z' \in \gamma_2$, $z'' \in \gamma_2$;

4) для відстані $d(z, \Gamma_1)$ від точки $z \in \gamma_2$ до дуги Γ_1 має місце нерівність

$$|z| \leq cd(z, \Gamma_1), \quad (11)$$

де c – стала, що залежить тільки від α .

Візьмемо точку $\tilde{z} \in \Gamma$, числа $h > 0, n \in \mathbb{N}$ і розглянемо набір точок $\{z_0, z_1, \dots, z_k\}$, що задовольняють умову (3). Через c позначатимемо різні сталі, які можуть залежати тільки від k і Γ . Для доведення теореми достатньо довести нерівність

$$|f(z_0) - L(z_0, f; z_1, \dots, z_k)| \leq cn^{\bar{\alpha}k} \bar{\omega}_k(ch, f, \Gamma), \quad (12)$$

при цьому обмежимося розглядом тільки основного випадку: $\tilde{z} \in \gamma_2$,

$|\tilde{z}| \leq \frac{1}{2}R$, $nh < c$, де γ_2 і R визначені в лемі 4, а стала c задовольняє нерівність (16).

При $i \leq l \leq j$ з нерівностей (10) і (11) леми 4 випливає

$$c|\zeta_i - \zeta_j| \leq \rho_{|i-j|h}(\zeta_l) \leq c|\zeta_i - \zeta_j|. \quad (13)$$

Зокрема $|\zeta_j - \zeta_{j+k}| = \rho_{\theta_{jh}}(\zeta_j)$, $\theta_j < c$ і для всіх $l, p = \overline{1, k}, l \neq p$

$$|\zeta_j - \zeta_{j+k}| \leq c |\zeta_l - \zeta_p|,$$

тоді за лемою 2 одержуємо

$$|f(\zeta_j) - L(\zeta_j, f; \zeta_{j+1}, \dots, \zeta_{j+k})| \leq c \overline{\omega}_k(ch, f, \Gamma). \quad (14)$$

Позначивши через j_1 найбільше серед чисел j таких, що $\zeta_{j-1} \in U[\tilde{z}, \rho_{nh}(\tilde{z})]$, припустимо, що $j_p := j_1 + pn$.

Для довільної точки $z \in (\gamma_1 \cup \gamma_2) \cap U[\tilde{z}, \rho_{nh}(\tilde{z})]$ позначимо через j_* індекс найближчої до z серед точок ζ_j з $j \leq j_1$. Аналогічно до (14) одержимо

$$|f(z) - L(z, f; \zeta_{j_*}, \zeta_{j_*+1}, \dots, \zeta_{j_*+k-1})| \leq c \overline{\omega}_k(ch, f, \Gamma). \quad (15)$$

Для всіх $p, q = \overline{1, k}, p \neq q$ та $j = j_*, \dots, j_k - k$ з умови (14) знаходимо:

$$\frac{|z - \zeta_{j_q}|}{|\zeta_{j_p} - \zeta_{j_q}|} < c, \quad \frac{|\zeta_{j_p} - \zeta_{j+q}|}{|\zeta_j - \zeta_{j+q}|} \leq c \frac{\rho_{nh}(\zeta_j)}{\rho_h(\zeta_j)} \leq cn \left(\frac{n+|j|}{1+|j|} \right)^{\alpha-1},$$

звідки маємо

$$|A_j(z)| \leq cn^{k-1} \left(\frac{n+|j|}{1+|j|} \right)^{(\alpha-1)(k-1)} \quad (16)$$

де $A_j(z)$ визначається рівністю (9). Тоді з рівностей (15), (16) і (14) за лемою 3 одержимо

$$\begin{aligned} |f(z) - L(z, f; \zeta_{j_1}, \dots, \zeta_{j_k})| &\leq |f(z) - L(z, f; \zeta_{j_*}, \zeta_{j_*+1}, \dots, \zeta_{j_*+k-1})| + \\ &+ \sum_{j=j_*}^{j_1+k(n-1)} |(f(\zeta_j) - L(\zeta_j, f; \zeta_{j+1}, \dots, \zeta_{j+k}))| \cdot |A_j(z)| \leq \\ &\leq c \overline{\omega}_k(ch, f, \Gamma) + c \overline{\omega}_k(ch, f, \Gamma) n^{k-1} \sum_{j=j_*}^{j_1+k(n-1)} \left(\frac{n+|j|}{1+|j|} \right)^{(\alpha-1)(k-1)} \leq \\ &\leq cn^k \overline{\omega}_k(ch, f, \Gamma) + cn^{\alpha k} \overline{\omega}_k(ch, f, \Gamma) n^{k-1} \sum_{j=1}^{cn} \left(\frac{1}{j} \right)^{(\alpha-1)(k-1)} \leq cn^{\alpha k} \overline{\omega}_k(ch, f, \Gamma). \end{aligned}$$

Звідси випливає нерівність (12). Отже, теорему доведено.

Властивості введеного D -модуля гладкості $\overline{\omega}_k(f, t)$ та пряма теорема наближення функцій алгебраїчними многочленами на областях з кутами розглядаються також у роботі [2].

Висновки

У роботі поширено означення модулів гладкості З.Дітзіана і В.Тотіка на функції, неперервні на кусково-гладких кривих комплексної площини. При цьому досліджено основні властивості введеного D -

модуля гладкості, зокрема доведено властивість нормальності, сформульовану у вигляді теореми.

Список літератури

1. Дзядык В.К. Введение в теорию равномерного приближения функций полиномами / В.К. Дзядык. – М.: Наука, 1977. – 512 с.
2. Дюженкова О.Ю. DT-модулі гладкості на областях з кутами/ О.Ю. Дюженкова, І.О.Шевчук// Теория приближения функций.: тр. Ин-та прикладной математики и механики. – Донецк, 1998. – Т.3.– С.65–70.
3. Тамразов П.М. Гладкости и полиномиальные приближения/ П.М. Тамразов. – К.: Наук. думка, 1975. – 272 с.
4. Шевчук И.А. Приближение многочленами и следы непрерывных на отрезке функций/ И.А.Шевчук. – К.: Наук. думка, 1992. – 223 с.
5. Ditzian Z. Moduli of smoothness/ Ditzian Z., Totik V. Springer-Verlag, New York/Berlin, 1987. – 300 p.

Рассмотрен аналог модуля гладкости Дитзиана-Тотика для функций, непрерывных на кусочно-гладких кривых комплексной плоскости. Определен D -модуль гладкости на областях с углами, исследованы его свойства.

Приближение функций, комплексная плоскость, множества с кусочно-гладкой границей, D -модуль гладкости.

We extend the definition of Ditzian-Totik modules of smoothness for the functions, continuous on piecewise smooth curves of complex plane, and investigate the properties of these modules.

Function approximation, complex plane, piecewise smooth curves, modules of smoothness.