

ОБГРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПІВ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ АВТОНОМНИХ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

В. В. Козирський, доктор технічних наук
М. І. Трегуб, А. В. Петренко, кандидати технічних наук

Розглянуто загальні принципи адаптивного регулювання навантаження автономних вітроелектричних установок в режимі змінної швидкохідності вітроподвигуна.

Вітроелектрична установка, структурна схема, алгоритм адаптивного регулювання навантаження.

Найвищої енергетичної ефективності (ЕЕф) аеромеханічної системи вітроелектричної установки (ВЕУ) принципово можна досягти [3] за умови підтримання оптимальних кутів атаки передньої площини лопатей відносно напрямку змінного за швидкістю вітру, що забезпечує близькі до оптимальних значення швидкохідності та крутного моменту. Однак за таких умов частота обертання лопатевого ротора змінюється за спонтанно змінною швидкістю вітру, від якої потужність залежить у кубі. Тобто потужність вітрового потоку змінюється в часі за ймовірнісним законом, який описують, наприклад, розподілом Вейбула [8]. Таким чином, прийнята лопатевим ротором змінна потужність вітрового потоку за відсутності акумуляторів повинна одночасно виділятися на змінному за величиною електричному навантаженні. Тому розробка для ВЕУ системи керування, що враховує змінну миттєву потужність вітроподвигуна, адаптивну навантаження, є актуальним завданням.

Мета досліджень – розгляд загальних принципів адаптивного регулювання навантаження автономних вітроелектричних установок в режимі змінної швидкохідності вітроподвигуна.

Практичний досвід роботи сучасних ВЕУ мегаватного класу показав, що забезпечення жорстко регламентованих енергосистемою сталих енергетичних параметрів завжди викликає зменшення ЕЕф перетворення енергії, прийнятої від змінного за швидкістю вітрового потоку. Ще складніші проблеми вискоефективного використання вітрової енергії виникають перед автономними вітроенергетичними установками (АВЕУ), які не приєднані до потужної загальної електроенергетичної системи, а працюють на різномірне автономне електронавантаження. Тому для АВЕУ запропоновані відомі [6] різнотипові схеми адаптивного керування генератором і навантаженням, яке розподіляється на групи споживачів високої якості енергії з жорстко регламентованими параметрами та баластних технологічних енергоспоживачів. Окремою ланкою виділяються також блоки

тимчасового накопичення енергії, наприклад, електрохімічні акумулятори, термоси, маховики тощо[9]. Однак загальну ЕЕф всього аеромеханіко-електричного комплексу АВЕУ слід розглядати, як безперервний процес одночасного перетворення прийнятої вітрової енергії в корисну роботу. Загальні принципи розрахунків процесу перетворення енергії, прийнятої лопатями вітроподвигуна від безперервного вітрового потоку зі змінною потужністю, залежною від кубу швидкості, можуть базуватися на відомій теорії випадкових функцій, наприклад [1] і [4], та на певних варіантах теорії масового обслуговування [2] і теорії імпульсних потоків [5]. Проте серед відомих систем адаптивного керування АВЕУ недостатньо враховується вплив інерційності системи та оптимальних способів регулювання напруги генератора за змінної генерованої потужності.

Результати досліджень. Для системи електромеханічного перетворення енергії змінного за швидкістю вітрового потоку вхідним параметром потужності слід вважати не безпосередньо швидкість вітру, а крутний момент і кутову швидкість обертОВОї маси лопатевого ротора, яка має [7] певні інерційні показники, що особливо актуально для безредукторних АВЕУ. В такому разі структурна схема автоматичного регулювання аеромеханічної системи на стадії приймання енергії вітрового потоку лопатевим ротором зображується передавальними функціями з однією інерційною ланкою (рис.1).

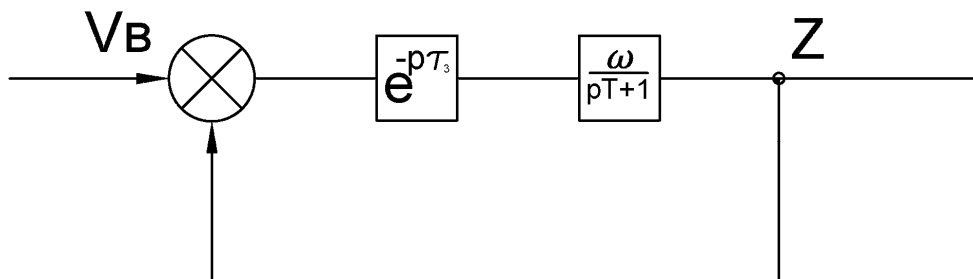


Рис. 1. Структурна схема системи автоматичного регулювання на стадії приймання енергії вітрового потоку з врахуванням інерції лопатевого ротора

Інтегральним показником аеродинамічної якості роботи вітроподвигуна вважається [3] коефіцієнт швидкохідності, який чисельно дорівнює відношенню колової швидкості руху кінців лопатей до швидкості діючого на вітроподвигун вітрового потоку за відомим виразом:

$$Z = \omega R/V = 2 \pi R n/V, \quad (1)$$

де Z – коефіцієнт швидкохідності вітроподвигуна, в.о.; ω – кутова швидкість обертання лопатей навколо осі, рад./с; R – радіус кола обертання периферійних кінців лопатей, м; n – частота обертів вітроподвигуна, с^{-1} ; V – модуль нормального вектора швидкості вітру перед вітроподвигуном, м/с.

Оскільки лопатевий ротор вітроподвигуна завжди має певний момент інерції J_B , то миттєве збільшення швидкості вітру викликає збільшення швидкості руху лопатей з деяким запізненням. Аналогічно зменшення миттєвої швидкості вітру не відразу викликає зменшення швидкості руху

лопатею, а згідно з роботою [7] завдяки інерційності певний період зберігаються сталі оберти. Таким чином, коефіцієнт швидкохідності є не лише згідно з традиційними визначеннями функцією миттєвої швидкості вітру $Z(V)$, але також і функцією часу $Z(V, t)$. Врахування впливу інерційних показників роботи особливо актуально для безредукторних АВЕУ з кільцеподібним ротором дугостаторного електрогенератора, схематично зображеного на рис.2.

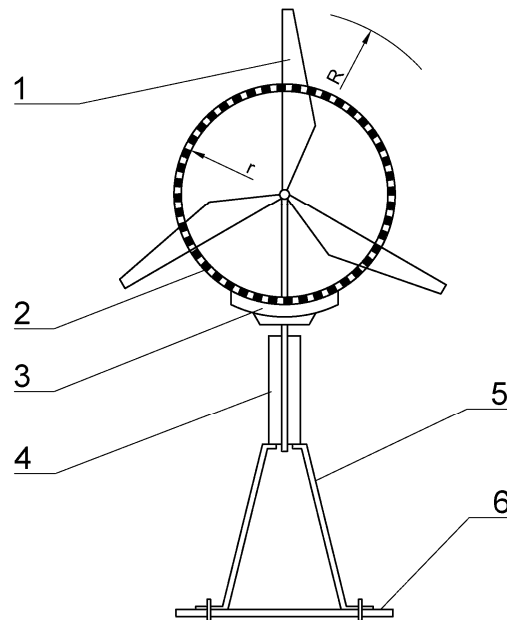


Рис. 2. Схема кільцеподібного ротора безредукторного дугостаторного електрогенератора на лопатях вітрогенератора:

- 1 – лопаті вітрогенератора; 2 – кільцеподібний діамантний ротор;
3 – дугостаторний індукторний аксіальний генератор; 4 – опорний стояк;
5 – основа опорного стояка; 6 – фундамент

У наведеній конструктивній схемі безредукторної ВЕУ незаперечною перевагою є відсутність механічного мультиплікатора і механічного контакту між ротором і статором. Однак розташування функціональних деталей ротора електрогенератора на кільцеподібному обертovому корпусі суттєво збільшує момент інерції системи. Для такої системи миттєві значення швидкохідності Z є стохастичною функцією $Z(t)$, яка є похідною від первинної стохастичної функції миттєвої швидкості вітру $V(t)$.

$$Z(t) = V'(t). \quad (2)$$

Ймовірнісні характеристики похідної $Z(t)$ стохастичної функції $V(t)$ отримуємо безпосередньо із характеристик вихідної функції. Значення математичного очікування стохастичної функції $Z(t)$ описуватиметься виразом:

$$m_{Z(t)} = dm_{V(t)} / dt, \quad (3)$$

де $m_{Z(t)}$ – математичне очікування стохастичної функції швидкохідності; $m_{V(t)}$ – математичне очікування функції швидкості вітру перед площиною обертання лопатей.

$$K_{Z(t)} = \partial^2 K_{V(t)} / \partial t_1 \partial t_2, \quad (4)$$

де $K_{Z(t)}$ – кореляційна функція швидкохідності; $K_{V(t)}$ – кореляційна функція швидкості вітру; t_1, t_2 – сусідні значення часового аргументу функції.

$$\mathbf{m}_{Z(T)} = \mathbf{T}^{-1} \int_0^T \mathbf{Z}(t) dt, \quad (5)$$

де $m_{Z(T)}$ – оцінка математичного очікування; T – період часу.

$$D(m_{Z(T)}) = 2 T^{-1} \int_0^T (1 - \tau/T) K_Z(\tau) d\tau, \quad (6)$$

де $D(m_{z(t)})$ – дисперсія оцінки математичного очікування; τ – часовий інтервал між значеннями часового аргументу t_1 і t_2 , $\tau = t_2 - t_1$; $K_z(\tau)$ – кореляційна функція оцінки математичного очікування.

The diagram illustrates a control system for a radio telescope antenna. It features a mechanical antenna assembly with a feed horn and a reflector. The system includes several functional blocks: **МТ** (Motor Drive), **Г** (Gear), **П** (Pulley), **АКБ** (Accumulator Bank), **И** (Inverter), **РЛ** (Radio Link), **Д ω** (Angular Displacement Detector), **Д V** (Voltage Detector), **ПК** (Personal Computer), and **КБ** (Control Block). The antenna is connected to the **МТ** block, which is driven by the **АКБ** and **И** blocks. The **Г** and **П** blocks are part of the mechanical drive. The **РЛ** block is connected to the antenna and the **Д ω** block. The **Д V** block is connected to the antenna and the **ПК** block. The **ПК** and **КБ** blocks are interconnected and provide control signals to the **МТ**, **Г**, **П**, **АКБ**, **И**, and **Д ω** blocks. The **КБ** block also outputs signals to the **С $_{ВП}$** , **С $_T$** , and **С $_{ЕТ}$** blocks, which are part of the **НАВАНТАЖЕННЯ** (Load) section.

13

Важливим завданням при розробці алгоритму є визначення основних функцій мети і пріоритетності певних груп енергоспоживачів. Так, загальна мета максимальної ЕЕф системи АВЕУ принципово може досягатися за умов підтримання максимальних значень ККД кожної зі стадій перетворення прийнятої енергії вітрового потоку в корисну роботу, що можна виразити формально функцією мети:

$$\Phi_1 = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n \rightarrow \text{MAX},$$

де $\eta_1 \eta_2 \dots \eta_n$ – добуток ККД необхідних n-стадій параметричного перетворення енергії для забезпечення більш якісною енергією побутових і технологічних енергоспоживачів. За умови застосування генераторів змінного струму для забезпечення регламентованих вихідних параметрів $U = \text{const}$, $f = \text{const}$, необхідно застосування акумуляторного та інверторного блоків.

Для енергоутилізаційного технологічного навантаження функція мети має інше формулювання:

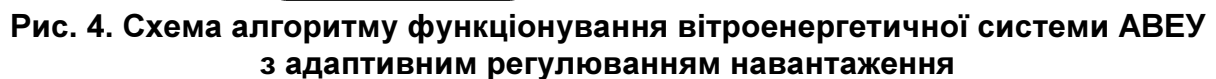
$$\Phi_2 = \sum_0^i n_i \rightarrow \text{MIN},$$

де n_i – кількість стадій перетворення енергії.

Тут можуть допускатися менш жорсткі регламентування вихідних параметрів утилізації електроенергії у певних межах $U = \text{var}$, $f = \text{var}$.

Структурно система АВЕУ з адаптивним регулюванням навантаження складається з окремих блоків (див. рис.3): блока вітродвигуна ВД, генераторного блока Г, перетворювального блока ПБ, акумуляторного блока АКБ, інверторного блока ІБ, комутаторного блока КБ, датчика швидкості вітру DV , датчика обертів вітродвигуна $D\omega$ та програмованого контролера ПК. Енергоспоживачі розподілені на окремі групи: побутові, для яких необхідне електроживлення напругою змінного струму $U = 127/220 \text{ В}$, частотою $f = 50 \text{ Гц}$ із регламентованими параметрами $\Delta U = \pm 10 \text{ В}$, $\Delta f = \pm 1 \text{ Гц}$. Виробничі та технологічні енергоспоживачі можуть задовольнятися такими ж параметрами електроживлення, як і побутові, однак можуть також потребувати інших регламентованих параметрів. Названі дві групи споживачів підключаються за потребами, які мають стохастичний характер, або певний змінний добовий графік. Групи технологічних енергоутилізаційних споживачів призначені для регульованого підключення в разі перевищення потужності генерування над потужністю споживання акумуляторним блоком та споживачами першої групи. За характером енергоспоживання енергоутилізаційні споживачі найраціональніше можна поділити на теплові та електротехнологічні, для яких вимоги до параметрів електроживлення можуть відрізнятися. Наприклад, для теплових потреб можна використовувати різні види струму, тоді, як для певних електротехнологічних процесів може бути потреба постійного струму, або змінного струму різної частоти.

Раціональна послідовність функціонування описаної системи АВЕУ з адаптивним регулюванням навантаження може реалізуватися таким алгоритмом (рис.4).



15

ряджання АКБ, то по чергово підключається енергоутилізаційне навантаження (ЕУАН) в першу чергу із найменш регламентованими параметрами енергоживлення. В разі зменшення потужності енергоспоживання стохастично змінним навантаженням, за незмінної потужності генерування, підключається наступна група ЕУАН. Оскільки ЕУАН забезпечується технологічними енергоспоживачами, які не мають жорстко регламентованих вимог до параметрів електроенергії, то електромеханічна система при цьому має мінімальну кількість стадій перетворення прийнятої енергії вітру і відповідно найвищий загальний ККД АВЕУ, тобто має найвищу ЕЕф.

Висновки

1. У системі керування вітроустановки інформативним параметром прийнятої вітровагоном потужності вітрового потоку можна вважати стохастичну функцію швидкохідності, яка є похідною стохастичної функції миттєвої швидкості вітру та враховує інерційність лопатевого ротора.

2. Стохастичну функцію швидкохідності лопатевого ротора можна вважати ергодичним процесом, для якого можна визначити оцінку математичного очікування та дисперсію оцінки математичного очікування за аналогією із відомими ймовірнісними залежностями.

3. У системі з адаптивним регулюванням навантаження споживачів поділяють на дві окремі групи: стохастичного режиму енергоживлення для побутових і виробничих потреб та енергоутилізаційного адаптивного навантаження, яке у свою чергу поділяється на теплоенергетичну та електротехнологічну підгрупи. Це забезпечує технічну можливість підтримання потужності енергоспоживання, враховуючи зміну потужності генерування в режимі максимальних значень ККД електромеханічного перетворення вітрової енергії.

Список літератури

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. / Е.С. Вентцель. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Физматгиз, 1962. – 564 с.
2. Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: Наука, 1966. – 432 с.
3. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика: учеб. / Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.
4. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций / А.А. Свешников. – М.: Наука, 1968. – 463 с.
5. Седякин Н.М. Элементы теории случайных импульсных потоков / Н.М. Седякин. – М.: Советское радио, 1965. – 261 с.
6. Толмачев В.Н. Эффективное использование энергии ветра в системах автономного энергообеспечения / Толмачев В.Н., Орлов А.В., Булат В.А.; под общ. ред. А.В. Орлова. – СПб.: ВИТУ, 2002. – 203 с.
7. Трегуб М.І. Зменшення впливу нерівномірності вітру на стабільність роботи автономного вітроагрегата / М.І. Трегуб // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2003. – № 2. – С. 82-89.
8. Фаворський Ю.П. Створення моделі оптимального співвідношення компонентів гібридних вітросонячних систем електропостачання [Електронний

ресурс] / Ю.П. Фаворский. – Режим доступа: http://www.avante.com.ua/rus/library/lib_stvormodeli.html.

9. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки / В.П. Харитонов. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

Рассмотрены общие принципы адаптивного регулирования загрузки автономных ветроэлектрических установок в режиме переменной скорости вращения ветродвигателя.

Ветроэлектрическая установка, структурная схема, алгоритм адаптивного регулирования нагрузки.

The article discusses the general principles of adaptive load control of autonomous wind power plants in the variable specific speed wind turbine.

Wind power plant, the block diagram, the algorithm is adaptive load control.

УДК 621.311:533.6

ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА ЗА СЧЕТ ЭНЕРГИИ ВЕТРА

Б.Х. Драганов, В.В. Козырский, доктора технических наук

Изложены основные положения гидродинамики ветра – процессы молекулярной и кинетической диффузии, турбулентная особенность потока. Отмечены зоны технической эффективности ветроэнергетической установки в зависимости от нагрузки. Приведена принципиальная схема ветроводородной установки.

Стохастичность, математическое ожидание, молекулярная и кинетическая диффузия, турбулентность, зоны эффективности, водород.

Эффективное средство экономии энергетических ресурсов заключается в использовании возобновляемых и нетрадиционных источников энергии. Важным является использование энергии ветра, которую применяют во многих отраслях производства.

Заслуживает внимание проблема использования энергии ветра для получения водорода. При этом эффективно решается комплекс взаимосвязанных задач энергетики, экологии, экономики.

Цель исследований – анализ гидродинамики ветра и, как следствие, указание наиболее эффективных средств использования энергии ветра для получения водорода.

Материалы и методика исследований. Движение воздуха в земной атмосфере, начиная от слабого ветра у поверхности земли и заканчивая общей его циркуляцией, является турбулентным. Атмосферная

ресурс] / Ю.П. Фаворский. – Режим доступа: http://www.avante.com.ua/rus/library/lib_stvormodeli.html.

9. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки / В.П. Харитонов. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

Рассмотрены общие принципы адаптивного регулирования загрузки автономных ветроэлектрических установок в режиме переменной скорости вращения ветродвигателя.

Ветроэлектрическая установка, структурная схема, алгоритм адаптивного регулирования нагрузки.

The article discusses the general principles of adaptive load control of autonomous wind power plants in the variable specific speed wind turbine.

Wind power plant, the block diagram, the algorithm is adaptive load control.

УДК 621.311:533.6

ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА ЗА СЧЕТ ЭНЕРГИИ ВЕТРА

Б.Х. Драганов, В.В. Козырский, доктора технических наук

Изложены основные положения гидродинамики ветра – процессы молекулярной и кинетической диффузии, турбулентная особенность потока. Отмечены зоны технической эффективности ветроэнергетической установки в зависимости от нагрузки. Приведена принципиальная схема ветроводородной установки.

Стохастичность, математическое ожидание, молекулярная и кинетическая диффузия, турбулентность, зоны эффективности, водород.

Эффективное средство экономии энергетических ресурсов заключается в использовании возобновляемых и нетрадиционных источников энергии. Важным является использование энергии ветра, которую применяют во многих отраслях производства.

Заслуживает внимание проблема использования энергии ветра для получения водорода. При этом эффективно решается комплекс взаимосвязанных задач энергетики, экологии, экономики.

Цель исследований – анализ гидродинамики ветра и, как следствие, указание наиболее эффективных средств использования энергии ветра для получения водорода.

Материалы и методика исследований. Движение воздуха в земной атмосфере, начиная от слабого ветра у поверхности земли и заканчивая общей его циркуляцией, является турбулентным. Атмосферная

турбулентность определяет такие явления, как переносы тепла и влаги воздушными массами, испарения влаги с поверхности земли и водоемов, формирование климата на Земле, распространение примесей в воздушной среде.

При анализе турбулентности в атмосфере необходимо учитывать наличие в ней температурной стратификации, создающей систематическое изменение плотности среды с высотой. Как известно, в поле тяжести наличие неоднородностей плотности жидкости приводит к появлению архимедовых сил, способствующих перемещению вверх частиц, более плотных, чем окружающая среда. Эти архимедовы силы складываются с силами чисто гидродинамического происхождения, которые действуют на частицы и при отсутствии силы тяжести.

В результате частицы менее (более) плотные, чем окружающая среда, при движении вверх (вниз) получают дополнительную энергию за счет работы архимедовых сил, а при движении вниз (вверх), наоборот, теряют часть своей энергии на преодоление архимедовых сил. Тем самым потенциальная энергия может непосредственно переходить в энергию турбулентности, а энергия турбулентности может обратно переходить в потенциальную энергию неоднородной тяжелой среды.

При исследовании динамики ветряного потока следует учитывать особенности этого процесса:

- зависимость от случайных явлений, т. е. его стохастичность;
- подчиненность закономерностям молекулярной и кинетической диффузии;
- наличие флуктуации.

При формулировке задачи следует учесть условия на границах рассматриваемой области пространства [2].

Результаты исследований. Уравнения движения атмосферы в приземном слое сводится к уравнениям конвективного переноса.

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p'}{\partial x} + \mu \nabla U; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p'}{\partial y} + \mu \nabla V; \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p'}{\partial z} + \mu \nabla W - \frac{g}{T_0} T', \quad (3)$$

где τ – время, с; u, v, w – компоненты вектора скорости, м/с; p' – давление, Па; μ – динамический коэффициент вязкости среды; ∇ – оператор Лапласа; g – ускорение свободного падения, м/с²; T – пульсационная температура, К; T_0 – исходное, так называемое стандартное значение температуры, К. В этих уравнениях член $-\frac{g}{T_0} T'$ учитывает влияние силы тяжести.

Уравнение неразрывности для чисел Маха вплоть до $M \leq 0,6$ может быть записано, как для несжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Кроме этих уравнений, необходимо записать уравнение притока теплоты, определяющее изменения температуры T во времени:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = a \nabla^2 T + Q, \quad (5)$$

где a – коэффициент температуропроводности; Q – приток теплоты за счет изменений фазового состояния содержащейся в воздухе влаги. Если пренебречь притоком теплоты Q , то получим известное дифференциальное уравнение теплопроводности.

К записанным выше уравнениям следует добавить уравнение состояния:

$$p_0 = R \rho_0 T_0, \quad (6)$$

где R – газовая постоянная.

С помощью системы уравнений можно решить задачу течения ветряного потока для данного конкретного случая. Флуктуации происходят у любых величин, зависящих от случайных факторов, и характеризует случайные отклонения физических величин от их средних значений. Количественная оценка флуктуации основана на методах математической статистики и теории вероятностей [6].

Простейшей мерой флуктуации величины x служит ее дисперсия σ_x^2 , т. е. средний квадрат отклонения x от среднего значения $\bar{x}$, $\sigma_x^2 = \overline{(x - \bar{x})^2} = \bar{x}^2 - x^2$, где черта сверху означает статистическое усреднение. Эквивалентной мерой является среднеквадратичное отклонение σ_x , равное корню квадратному из дисперсии, или его относительная величина $\delta_x = \sigma_x / \bar{x}$.

Целесообразно перейти от пульсаций плотности к пульсациям температуры, легко доступным непосредственному измерению. Будем учитывать только пульсации плотности, связанные с пульсациями температуры, а гораздо меньшими пульсациями плотности, вызываемыми относительно очень малыми пульсациями атмосферного давления, пренебрежем.

При анализе турбулентных процессов атмосферы надо учитывать наличие вертикальной температурной стратификации и связанного с ней вертикального турбулентного потока тепла. С другой стороны, горизонтальной неоднородностью подстилающей поверхности, всегда в какой-то мере имеющейся в реальной атмосфере, можно пренебречь.

Атмосферные условия существенно зависят от времени суток и времени года, причем, кроме регулярных суточных и годовых колебаний,

значения любого гидродинамического элемента в данной точке атмосферы испытывают еще нерегулярные колебания самых разнообразных периодов. Эти нерегулярные колебания будем рассматривать.

При $z \gg z_0$ характеристики турбулентности на высоте будут зависеть от пяти величин: $z, \rho_0, g/T_0, u_*$ и $q/c_p \rho_0$.

Поскольку в данном случае имеется четыре независимых размерности – длина, время, масса и температура, то из этих четырех величин можно составить лишь одну (с точностью до числового множителя) независимую безразмерную комбинацию. В качестве этой безразмерной комбинации выберем величину

$$\zeta = \frac{z}{L}, \quad (7)$$

$$\text{где} \quad L = \frac{u_*^3}{\chi \frac{g}{T_0} \frac{q}{c_p \rho_0}} - \quad (8)$$

масштаб длины, составленный из параметров $g/T_0, u_*, q/c_p \rho_0$ (безразмерная постоянная Кармана χ введена в выражение для L выбрана так, чтобы было $L > 0$ при установочной термической стратификации, когда $q > 0$). Тогда можно утверждать, что зависимость от высоты любой осредненной характеристики f развитого турбулентного режима в приземном слое воздуха, независимой от свойств подстилающей поверхности, может быть записана в виде

$$\frac{\bar{f}(z)}{f_0} = F\left(\frac{z}{L}\right), \quad (9)$$

где f_0 – комбинация размерности $\bar{f}$, составленная из параметров $\rho_0, g/T_0, u_*$ и $q/c_p \rho_0$, а $F(\zeta)$ – универсальная функция. В качестве масштаба f_0 для осредненной скорости ветра мы примем величину u_*/χ , а для осредненной температуры – величину

$$T_* = -\frac{1}{\chi u_*} \frac{q}{c_p \rho_0}, \quad (10)$$

где χ – постоянная.

Согласно выводам из теории подобия, изменения скорости ветра с высотой во всех случаях должны определяться универсальной функцией $f(\zeta)$ от безразмерной высоты $\zeta = z/L$, где $L = -c_p \rho_0 T_0 u_*^3 / \chi g q$. Для непосредственной проверки этого результата и установления точного вида функции $f(\zeta)$ надо иметь наряду со значениями $\bar{u}(z)$ также и значения величин $u_* = (\tau / \rho_0)^{1/2}$ и q , позволяющие подсчитать масштаб L .

Экспериментально проведенные исследования указывают на зависимость турбулентной энергии ветра от высоты, исчисляемой с поверх-

ности земляного покрова. По данным Lamlej J. L. и Panofsky H. A. на небольших высотах ($z = 2$ м) изменение турбулентности пренебрежимо мало. На больших высотах (в пределах от $z = 25$ до $z = 100$ м) обнаруживается заметная неустойчивость диффузии энергии, которая играет значительную роль в общем балансе турбулентной энергии. Та же закономерность подтверждается исследованиями, результаты которых приведены в монографии [3].

Кроме турбулентности необходимо принимать во внимание приток тепла, приводящий к изменению во времени температуры T .

Уравнение притока тепла имеет вид:

$$c_p \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c_p \rho \alpha \Delta T + Q, \quad (11)$$

где c_p – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кг·К; ρ – плотность, кг/м³; t – время, с; u, v, w – соответствующие скорости в направлении координат x, y, z , м/с; Q – приток тепла за счет излучения и изменения фазового состояния содержащийся в воздухе аэрозоли (другими формами притока тепла, в частности притоком тепла за счет диссипации кинетической энергии в приземном слое вполне можно пренебречь), Дж.

Водород является высококалорийным топливом. При воздействии водорода с кислородом выделяется тепло на единицу массы в 2,5–3,5 раза больше, чем при сгорании любого другого органического топлива (уголь, природный газ, нефть).

Другое преимущество водорода перед органическим топливом в том, что уменьшаются техногенные выбросы в окружающую среду.

В качестве топлива водород используется в газообразном или жидком состоянии. В газообразном состоянии его применяют в двигателях внутреннего сгорания, в жидком – в ракетных двигателях [5].

Жидкий водород получают в криогенных установках. Опыт накопленный при использовании жидкого водорода в ракетной технике, доказывает возможность и обоснованности его применения во многих областях техники [7, 8].

Одним из наиболее распространенных методов получения водорода является термодинамическое разложение воды на водород и кислород при использовании большого количества теплоты, вследствие чего получают практически чистый водород (99,6...99,9 %).

Теоретически количество энергии, затраченной на получение одного моля водорода, равно его теплоте сгорания.

Один из перспективных путей производства водорода основан на электролизе за счет ветроэнергетических установок [7].

Перспективна следующая структурная схема: использование энергии ветра в период, когда электроэнергия не требуется. Ее в этом случае направляют в электролизную систему с целью получения водорода.

При этом полученный водород может аккумулироваться в баллонах, ресиверах, газгольдерах и использоваться как топливо для разных производственных целей.

Схематическое ветроводородной установки приведена на рис. 1 [4].

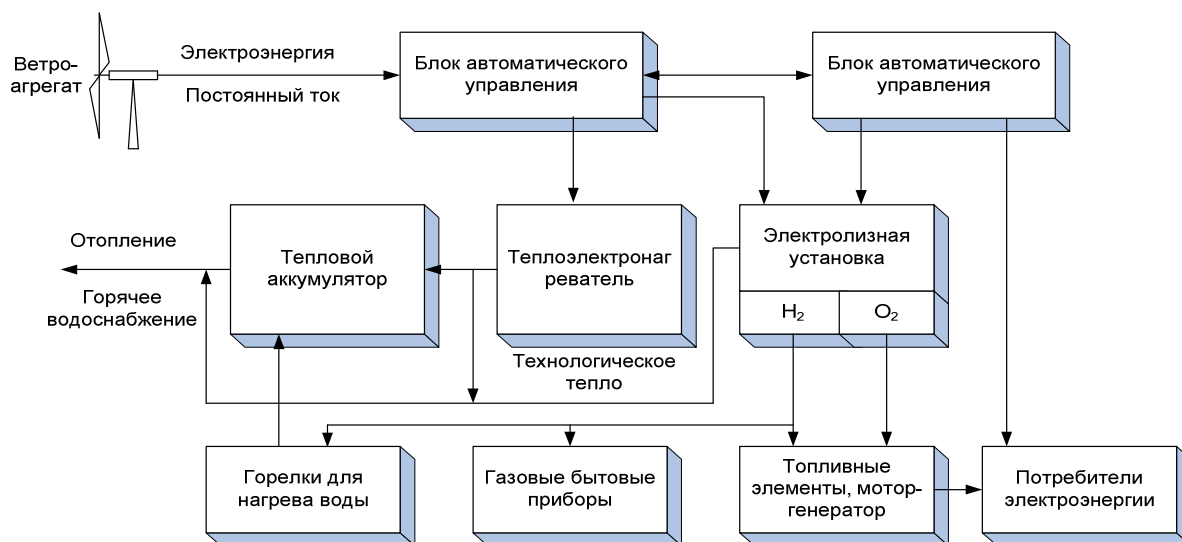


Рис. 1. Схема ветроводородной станции

Другие варианты решений ветроводородной установки приведены в работе [1].

Результаты расчетов показывают, что при современных технико-экономических показателях оборудования водородная система пока еще не конкурентоспособна по сравнению с дизельной электростанцией, но в ближайшее время станет экономически эффективной [1].

Эффективность вариантов ветроводородных станций определена на основе расчетных данных.

На рис. 2 показаны зоны эффективности работы ветроэнергетической установки (ВЭУ) по сравнению с аналогичными энергетическими установками при нагрузке 50 кВт. Подобные зависимости при нагрузке 1000 кВт показаны на рис. 3 [1].

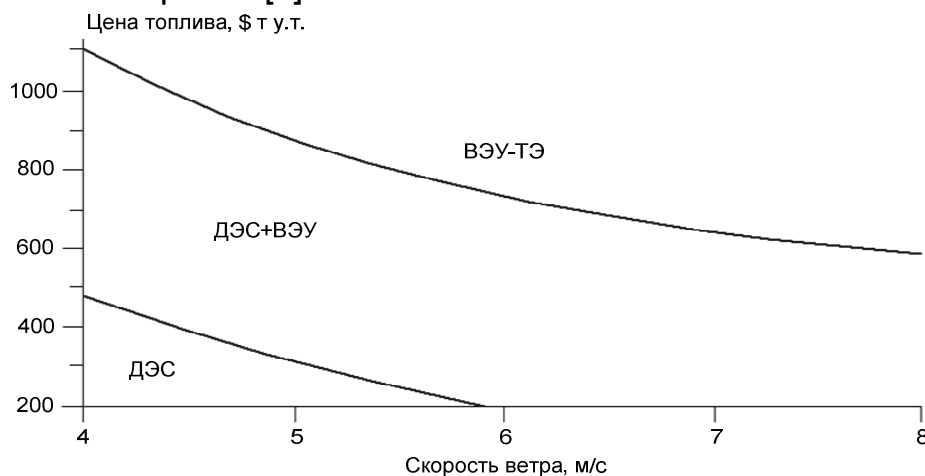


Рис. 2. Зоны эффективности технологий при нагрузке 50 кВт

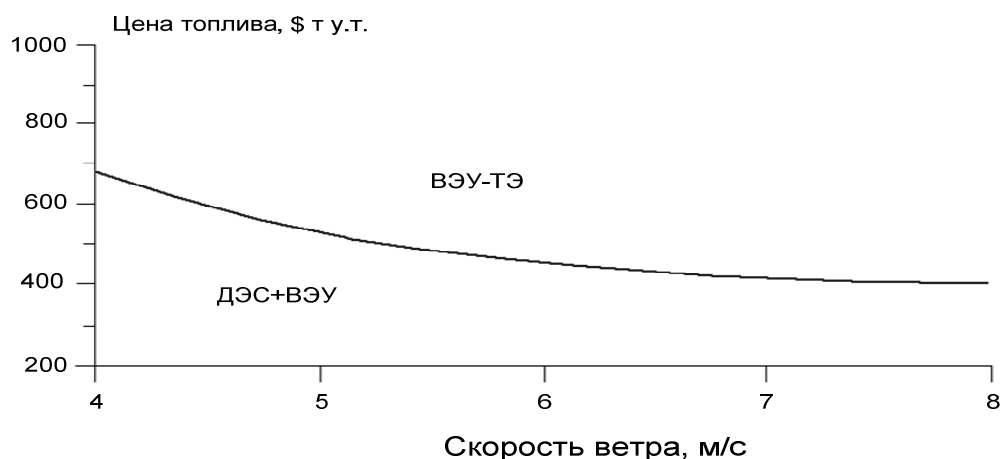


Рис. 3. Зоны эффективности технологий при нагрузке 1000 кВт

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что при малых скоростях ветра в дешевом топливе для электроснабжения потребителей целесообразно использовать ДЭС (при нагрузке до 50 кВт). С увеличением цены топлива и скорости ветра более экономичной является ветродизельная система и ВЭУ с водородной системой. При этом ВЭУ играет роль базисного источника энергии, ТЭ — пикового. Применение ВЭУ и ТЭ дает возможность при нагрузке 1000 кВт достигнуть экономичности при меньших скоростях ветра и ценах на дизельное топливо, чем при нагрузке 50 кВт, вследствие лучших удельных показателей более крупных энергоисточников.

Выводы

Возобновляемые источники энергии, в первую очередь, энергия солнечного излучения, имеют выраженный стохастический характер. Следует отметить, что на интенсивности солнечной радиации большое влияние оказывает облачность. Взаимосвязь между указанными факторами можно рассматривать как линейную. Подобный подход к анализируемым явлениям позволяет с достаточно высокой точностью моделировать изучаемые процессы.

Приведен метод определения статистических характеристик взаимокорреляционных функций случайных величин.

Список литературы

1. Кривцова В.И. Неисчерпаемая энергия: учеб. [у 4 кн]. Кн. 4. Ветроводородная энергетика / Кривцова В.И., Олейников А.М., Яковлев А.И. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун.-т, Харьков. Нац. ин.-т, 2007. — 606 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газов / Л.Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1970. — 904 с.
3. Монин А.С. Статистическая гидродинамика / А.С. Монин, А.М. Яголом. — М.: Наука, 1965. — 639 с.
4. Мхитарян Н.М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / Н.М. Мхитарян. — К.: Наук. думка, 1999. — 320 с.
5. Перспективы использования водородного топлива в тепловой энергетике / Ю.М. Мацевитый, В. В. Соловей, В. Н. Голощанов, О. В. Кравченко // Во-

зобновляемая энергетика XXI столетия: материалы VII междунар. конф., А. Р. Крым, п.г.т. Николаевка, 11–15 сент., 2006.

6. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М.: Мир, 2002. – 462 с.

7. Якименко Л.М. Электролиз воды / Якименко Л.М., Модылевская Л.М., Ткачек З.А. – М.: Химия, 1970. – 204 с.

8. Яковлев А.И. Химический источник электропитания с расходуемым электродом / А.И. Яковлев, А.А. Бояркин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: сб. наук. праць держ. аерокосм. ун-ту ім. М. С. Жуковського «ХАІ»*. Вип. 5. – Харків, 1999. – С. 128 – 132.

Викладено основні положення гідродинаміки вітру – процеси молекулярної і кінетичної дифузії, турбулентна особливість потоку. Визначено зони технічної ефективності вітроенергетичної установки залежно від навантаження. Наведено принципову схему вітроводневої установки.

Стохастичність, математичне сподівання, молекулярна і кінетична дифузія, турбулентність, зони ефективності, водень.

The basic position of the wind hydrodynamics - the processes of molecular and kinetic diffusion, turbulent flow feature. Marked areas of technical efficiency of the wind power plant, depending on the load. Shows a schematic diagram vetrovodorodnoy installation.

Stochastics, mathematical expectation, and the kinetic molecular diffusion, turbulence, zone efficiency, hydrogen.

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОГО РІВНЯ ТА ЯКОСТІ ВИПУСКНИХ РОБІТ

В.В. Козирський, Г.Б. Іноземцев, доктори технічних наук

Наведено та проаналізовано найхарактерніші недоліки, які мають місце при виконанні та захисті випускних робіт. Запропоновано ряд пропозицій щодо усунення недоліків та покращення якості цих робіт.

Необхідність публікації пов'язана із ситуацією, яка склалася останнім часом із рівнем і якістю підготовки, виконанням і захистом випускних робіт, їх відповідності існуючим вимогам. Незважаючи на пропозиції, які наводилися раніше у відповідній науково-технічній літературі [1–3], автори вважають за необхідне повернутися до цих питань ще раз, тому що існуючі недоліки, на жаль, набувають систематичний характер і потребують їх виправлення.

Мета досліджень – аналіз найхарактерніших недоліків при виконанні випускних робіт, їх захисті та надання пропозицій щодо підвищення кваліфікаційного рівня та покращення якості при їх виконанні.

зобновляемая энергетика XXI столетия: материалы VII междунар. конф., А. Р. Крым, п.г.т. Николаевка, 11–15 сент., 2006.

6. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М.: Мир, 2002. – 462 с.

7. Якименко Л.М. Электролиз воды / Якименко Л.М., Модылевская Л.М., Ткачек З.А. – М.: Химия, 1970. – 204 с.

8. Яковлев А.И. Химический источник электропитания с расходуемым электродом / А.И. Яковлев, А.А. Бояркин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: сб. наук. праць держ. аерокосм. ун-ту ім. М. С. Жуковського «ХАІ»*. Вип. 5. – Харків, 1999. – С. 128 – 132.

Викладено основні положення гідродинаміки вітру – процеси молекулярної і кінетичної дифузії, турбулентна особливість потоку. Визначено зони технічної ефективності вітроенергетичної установки залежно від навантаження. Наведено принципову схему вітроводневої установки.

Стохастичність, математичне сподівання, молекулярна і кінетична дифузія, турбулентність, зони ефективності, водень.

The basic position of the wind hydrodynamics - the processes of molecular and kinetic diffusion, turbulent flow feature. Marked areas of technical efficiency of the wind power plant, depending on the load. Shows a schematic diagram vetrovodorodnoy installation.

Stochastics, mathematical expectation, and the kinetic molecular diffusion, turbulence, zone efficiency, hydrogen.

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОГО РІВНЯ ТА ЯКОСТІ ВИПУСКНИХ РОБІТ

В.В. Козирський, Г.Б. Іноземцев, доктори технічних наук

Наведено та проаналізовано найхарактерніші недоліки, які мають місце при виконанні та захисті випускних робіт. Запропоновано ряд пропозицій щодо усунення недоліків та покращення якості цих робіт.

Необхідність публікації пов'язана із ситуацією, яка склалася останнім часом із рівнем і якістю підготовки, виконанням і захистом випускних робіт, їх відповідності існуючим вимогам. Незважаючи на пропозиції, які наводилися раніше у відповідній науково-технічній літературі [1–3], автори вважають за необхідне повернутися до цих питань ще раз, тому що існуючі недоліки, на жаль, набувають систематичний характер і потребують їх виправлення.

Мета досліджень – аналіз найхарактерніших недоліків при виконанні випускних робіт, їх захисті та надання пропозицій щодо підвищення кваліфікаційного рівня та покращення якості при їх виконанні.

Рівень значної кількості випускних робіт ще далекий від досконалості і не відповідає існуючим вимогам. Це твердження має багаточисельні підтвердження, хоча б у відсутності у роботах загальної мети, актуальності та обґрунтування прийнятих рішень, наявності "проблемної ситуації", критичної оцінки негативної та позитивної інформації, прив'язки до конкретних об'єктів із застосуванням прогресивних та новітніх рішень.

Недостатня увага приділяється тематиці, яка вирішує питання енергоресурсозбереження, надійності електроенергопостачання та електрообладнання, автоматизації технологічних процесів, розробки та удосконалення існуючих інженерно-технічних рішень із врахуванням сучасних вимог.

У ряді робіт розглядаються та вирішуються малоефективні, неактуальні питання, які базуються на використанні морально-застарілого електроенергетичного обладнання, а в деяких випадках застосовується обладнання, яке вже десятки років не випускається або не має ніякого відношення до теми розробки. Це, в першу чергу, стосується електротехнічного, теплотехнічного та технологічного обладнання, систем автоматизації і контрольно-вимірювальної, пуско-захисної апаратури тощо.

Така ситуація викликає цілком природне питання, що корисного може почерпнути студент від такої тематики, в т.ч. і для подальшої своєї діяльності.

Безумовно рівень розробки, відповідність існуючим вимогам в значній мірі визначається й участю керівника. На жаль, знайомство із значною кількістю випускних робіт демонструє недостатню увагу з боку керівників на етапах підготовки і виконання їх.

А як же тоді можна пояснити наявність таких недоліків як: невідповідність тексту назві роботи, невміння студента логічно та аргументовано викласти матеріали роботи, відсутність конкретики щодо прив'язки рішень до мети розробки, переповнення тексту загальними питаннями, ретельним наведенням опису тривіальних рішень, наявність ілюстраційного матеріалу у вигляді загальних всім відомих видів різного обладнання (замість конкретних схем, будови та характеристик), розміщення фотографій об'єктів з "пташиного польоту", невідповідністю графічних матеріалів вимогам стандартів, їх мала інформативність та ін.

Треба звернути увагу на неконкретність або відсутність питань з організації та експлуатації наведених розробок, безпеки праці з прив'язкою до конкретних рішень, наявність конкретики в техніко-економічних розрахунках замість наведення узагальненої інформації. Неконкретність має місце в більшості робіт при формулюванні висновків, які практично являють собою перелік виконаних робіт, без наведення кількісної інформації, в т.ч. і техніко-економічних показників. У ряді робіт наводяться посилання на речі, які взагалі в роботі не розглядалися.

На наш погляд, втрачає свій сенс відгук керівника, який являє собою практично відписку у вигляді трафаретного тексту, теж саме можна сказати і про рецензії, в яких практично відсутня оцінка інженерно-технічних рішень, прийнятих у роботі, їх вірогідність і доцільність, а основ-

ними недоліками є наголос на орфографію, недостатню кількість літературних джерел.

Треба зупинитись і на захисті робіт, який перетворився на формальність, тому що студент протягом п'яти хвилин зачитує текст з листка, практично не посилаючись на представлений графічний матеріал (який і так дуже далекий від теми розробки й являє собою анотоване повідомлення). Такі доповіді, на жаль, не дають уявлення про кваліфікаційний рівень та підготовку студента, а частенько нерозуміння самої роботи членами державної екзаменаційної комісії і присутніх на захисті.

Наведений перелік найбільш характерних і поширених недоліків викликає в авторів необхідність пригадати хоча б анотовано головні вимоги до випускних робіт.

У першу чергу, необхідно нагадати, що тема повинна бути присвячена одній з актуальних проблем, пов'язаних з енергетикою в АПК, а саме:

- електрифікації та автоматизації технологічних процесів с.-г. виробництва;
- електропостачанню та електроспоживанню АПК;
- автоматизації енергетичних установок;
- теплозабезпеченню в АПК;
- електрифікації процесів обслуговування, ремонту електрообладнання та с.-г. техніки.

Випускна робота є підсумковою кваліфікаційною роботою, яка виявляє рівень засвоєння теоретичних знань та практичної підготовки студента за вибраною спеціальністю. Вона повинна містити поглиблений аналіз теми, самостійні дослідження та розрахунки, обґрунтування прийнятих інженерно-технічних рішень.

Робота має складатися зі вступної частини, основних розділів (4 – 5), висновків та пропозицій, списку літератури. Робота повинна бути проілюстрована графічними матеріалами, які відображають основні інженерно-технічні рішення студента.

Вступна частина має містити актуальність та практичну значущість вибраної теми, необхідність її розробки, формулювання мети.

Перший розділ повинен містити характеристику виробничого об'єкта розробки, техніко-економічні показники його діяльності, основні параметри обладнання, аналіз та перелік задач, вирішення яких спрямовано на досягнення мети (удосконалення, модернізацію, розробку і застосування нових інженерно-технічних рішень та ін.).

Наступні розділи (2 – 3) містять матеріали залежно від спрямованості теми, її мети та являють собою аналіз, обґрунтування, розрахунки і вибір елементів енергетичних та електротехнічних систем в АПК. Тут розглядаються питання технологічного та електротехнологічного спрямування, електропостачання і споживання електроенергії, автоматизації та засобів контролю електро-теплопостачання, електрифікації процесів вирощування та переробки с.-г. продукції, питання підвищення надійності та якості електропостачання, енергозберігаючі рішення, питання підвищення продуктивності та ефективності електрообладнання. В цих розділах наво-

дяться конкретні розрахунки і вибір електротехнічного, енергетичного та технологічного обладнання згідно з тематикою випускної роботи.

Випускна робота повинна мати розділ, в якому виконується детальна розробка однієї із задач, що вирішуються у роботі. Крім цього, в роботі має бути матеріали стосовно технічного обслуговування і ремонту енергетичного обладнання, яке запропоновано в роботі, а також питання з охорони праці при роботі з цим обладнанням, техніко-економічні розрахунки щодо ефективності прийнятих рішень.

Висновки повинні бути конкретними, максимально підкріплені кількісною і достовірною інформацією за суттю роботи, мати обґрунтовану доцільність та техніко-економічну ефективність їх реалізації.

Список літератури, в першу чергу, повинен містити посилання на фундаментальну науково-технічну літературу, підручники та монографії з відповідного напрямку, що і є основними джерелами інформації.

Висновки

Вважаємо за необхідне навести ряд пропозицій, які на наш погляд можуть сприяти підвищенню вимог та кваліфікаційного рівня випускних робіт.

1. Підвищити вимоги до інженерно-технічних та технологічних рішень, що приймаються, шляхом ретельного обґрунтування на базі відповідних розрахунків та техніко-економічної їх доцільності, можливості їх реалізації та використання.

2. Не допускати розробки тематики, які не є актуальними, застарілими, в яких використовуються тривіальні застарілі рішення, необхідно робити наголос тільки на сучасні, новітні рішення.

3. Не допускати в роботах повторів, розрахунків та матеріалів, які вже було використано при виконанні курсових робіт, наприклад вибір електропривода (в 95 % випадків наводять вибір вентилятора), розрахунок освітлення, мікроклімату та ін., замість розрахунків нових прийнятих нетривіальних рішень.

4. Підвищити вимоги до рецензування робіт та оцінки їх з боку керівників, надавши цим матеріалам більшої конкретики, особливо в доцільності та обґрунтованості прийнятих рішень, відповідності їх існуючим стандартам.

5. Підвищити вимоги до процедури захисту випускних робіт, їх підготовки та виконання протягом роботи над ними, не допускати, щоб доповідь студента перетворювалась на формальне читання тексту, який не має логічного зв'язку з темою та змістом самої роботи.

6. Розглянути питання про тимчасове усунення керівників тих випускних робіт, які не відповідають існуючим вимогам, виконані без врахування необхідної їх прив'язки до реальних рішень та обґрунтування їх доцільності.

Автори цієї публікації сподіваються, що ознайомлення широкого кола читацької аудиторії Наукового вісника з наведеними матеріалами обумовить більш вимогливе ставлення всіх причетних до випускних робіт, що

буде сприяти підвищенню інженерно-технічного рівня, практичної корисності та їх доцільності.

Список літератури

1. Дипломне проектування енергетичних та електротехнічних систем в агропромисловому комплексі: навч. посіб. Г.Б. Іноземцев, В.В. Козирський, М.Т. Лут, І.П. Радько. – К.: ТОВ «Аграр Медіа Груп», 2012.–274 с.

2. Іноземцев Г.Б. Методика наукового дослідження – основа стратегії наукового дослідження /Г.Б. Іноземцев// Електрифікація та автоматизація сільськогосподарства. – 2006.–№1(16).– С. 16–25.

3. Козирський В.В. Деякі пропозиції щодо виконання магістерських робіт науково-дослідного спрямування /В.В. Козирський, Г.Б. Іноземцев// Науковий вісник НУБіП України.–2009.– №139. – С.15–21.

Приведены и проанализированы наиболее характерные недостатки, которые имеют место при выполнении и защите выпускных работ. Предложено ряд предложений по устранению недостатков и улучшению качества этих работ.

Presented and analyzed most typical flaws that occur in the enforcement of the final work. A number of proposals to correct deficiencies and improve the quality of these works.

УДК 631.24.243

СУЧАСНІ РЕАЛІЇ І ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОСЛИННИЦТВІ

Г.Б. Іноземцев, доктор технічних наук

Розглянуто питання стану проблеми та реальність застосування методів дії електромагнітної енергії на активацію розвитку рослин

Електромагнітна енергія, енергетичний ресурс, доза обробки, енергія проростання, насіння, передпосівна обробка, схожість, біоб'єкт, рослинництво.

Проблема підвищення врожайності сільськогосподарських культур залишається відкритою. Сучасні агротехнології нині себе вичерпали і не можуть вирішити цієї проблеми. У зв'язку з цим пошук нових шляхів і особливо, із застосуванням електротехнологій, які є достатньо досконалими і згідно із результатами останніх досліджень варті сприяння вирішення цієї проблеми.

Мета досліджень – на базі аналізу дії електромагнітної енергії визначення шляхів ефективної і практичної реалізації процесів активації розвитку рослин.

© Г.Б. Іноземцев, 2013

буде сприяти підвищенню інженерно-технічного рівня, практичної корисності та їх доцільності.

Список літератури

1. Дипломне проектування енергетичних та електротехнічних систем в агропромисловому комплексі: навч. посіб. Г.Б. Іноземцев, В.В. Козирський, М.Т. Лут, І.П. Радько. – К.: ТОВ «Аграр Медіа Груп», 2012.–274 с.

2. Іноземцев Г.Б. Методика наукового дослідження – основа стратегії наукового дослідження /Г.Б. Іноземцев// Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2006.–№1(16).– С. 16–25.

3. Козирський В.В. Деякі пропозиції щодо виконання магістерських робіт науково-дослідного спрямування /В.В. Козирський, Г.Б. Іноземцев// Науковий вісник НУБіП України.–2009.– №139. – С.15–21.

Приведены и проанализированы наиболее характерные недостатки, которые имеют место при выполнении и защите выпускных работ. Предложено ряд предложений по устранению недостатков и улучшению качества этих работ.

Presented and analyzed most typical flaws that occur in the enforcement of the final work. A number of proposals to correct deficiencies and improve the quality of these works.

УДК 631.24.243

СУЧАСНІ РЕАЛІЇ І ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОСЛИННИЦТВІ

Г.Б. Іноземцев, доктор технічних наук

Розглянуто питання стану проблеми та реальність застосування методів дії електромагнітної енергії на активацію розвитку рослин

Електромагнітна енергія, енергетичний ресурс, доза обробки, енергія проростання, насіння, передпосівна обробка, схожість, біоб'єкт, рослинництво.

Проблема підвищення врожайності сільськогосподарських культур залишається відкритою. Сучасні агротехнології нині себе вичерпали і не можуть вирішити цієї проблеми. У зв'язку з цим пошук нових шляхів і особливо, із застосуванням електротехнологій, які є достатньо досконалими і згідно із результатами останніх досліджень варті сприяння вирішення цієї проблеми.

Мета досліджень – на базі аналізу дії електромагнітної енергії визначення шляхів ефективної і практичної реалізації процесів активації розвитку рослин.

© Г.Б. Іноземцев, 2013

Матеріали та методика досліджень. Результати останніх досліджень вчених України, Росії, США, Німеччини, Японії, Малайзії та ін. [1, 3, 5, 6, 7] показують високу ефективність застосування електромагнітної енергії в аграрному виробництві і, в першу чергу, за рахунок високих ергономічних, економічних та функціональних можливостей таких електротехнологій. Це, в першу чергу, стосується питань передпосівної обробки насіння, вирощування та зберігання продукції рослинництва.

Активація дії електромагнітної енергії на різні біологічні об'єкти обумовлює можливості збільшення врожаю сільськогосподарських культур до 1,2–1,3 раза, зменшення необхідності застосування не завжди екологічно чистих добрив, які нині використовують для підтримки родючості ґрунтів [2].

Результати досліджень. Базуючись на величезному обсязі накопиченої інформації можна констатувати, що електротехнології, в яких використовуються різноманітні види носіїв електромагнітної енергії (електричне поле, поле коронного розряду, електромагнітне випромінювання, магнітне поля, радіаційне та акустичні енергоносії та ін.) обумовлюють не тільки достатньо вагомі, але і практично дуже схожі результати.

Так, урожайність рослин при застосуванні різних носіїв енергії зростає на 10 – 24 %, схожість на 9 – 14 % при значному наростанні зеленої маси. При електромагнітній дії на біологічні об'єкти спостерігається збільшення, наприклад маси бульб (картопля буряк), паростків та стручків у гороха, підвищення вмісту білка (яра пшениця) та деяких поживних речовин, наприклад, вітаміну С (картопля, цукрові буряки).

Разом з тим, підвищення кількості та якості кінцевого продукту, на наш погляд, повинно здійснюватися цілеспрямовано, базуючись на взаємодії носіїв енергії із біологічними об'єктами, із врахуванням закладеного природою в різні рослини енергетичного ресурсу, необхідної енергії проростання.

Справедливість цього підтверджується і результатами численних досліджень, які при обробці насіння різних рослин (томати, огірки, горох, рис, соя та ін.) різними дозами енергії обумовлюють як стимулюючий, так і пригнічуючий ефект.

Так, вченими Японії (м. Токіо, інститут біофізики рослин) та вітчизняними вченими при обробці насіння салату, томатів, гороху дозами 0,5 ... 3,0 Вт/см² спостерігалася посилення їх здатності до проростання, а при збільшенні до 4,5 Вт/см², навпаки, затримання росту, а в ряді випадків (салат, огірки) навіть їх загибель.

Неадекватні результати спостерігалися і при обробці насіння ячменю, кукурудзи, пшениці. Наприклад, при дозі обробки (носій – електричне поле коронного розряду) 100... 200 Дж·год/м² ефект пророщування не спостерігався, при дозі 1100 ... 1300 Дж · год/ м² ефект досягав практично максимальних значень, а при збільшенні її знову спостерігався ефект пригнічення [3].

Аналогічні результати було отримано у випадку передпосівної обробки насіння ярої пшениці в електричному полі коронного розряду при різній напруженості. При напруженості $E = 0,5...1,5$ кВ/см ефект проростання

практично не спостерігався, при $E = 2 \dots 5$ кВ/см схожість досягала максимальних значень 12 – 15 %, при $E \geq 5 \dots 6$ кВ/см ефект не спостерігався. Крім цього, при таких значеннях напруженості спостерігався коронний розряд, збільшувалися ефекти іонізації, що негативно впливало на фізіологічний стан біологічних об'єктів [4].

Численні дослідження показують неоднозначність впливу напруженості на різні біологічні об'єкти. Так, максимальна схожість насіння цукрових буряків спостерігається при $E = 3,0 \dots 3,5$ кВ/см, ячменю при $E = 2,5 \dots 1,0$ кВ/см, пшениці при $E = 4,0 \dots 5,0$ кВ/см, насіння хвойних порід при $E = 0,5 \dots 2,5$ кВ/см, цибулі, салату, томатів при $E = 2,0 \dots 2,5$ кВ/см. Розбіжності у параметрах обробки (доза обробки, експозиція) спостерігаються і при застосуванні мікрохвильових технологій, електромагнітної обробки тощо.

Згідно із дослідженнями вчених США (штат Айова) обробка насіння озимини, соняшнику, кукурудзи у магнітному полі обумовлювала підвищення врожайності на 12 ... 20 % при енергетичній дозі 1 ... 5 Дж·с/кг та індукції 1 ... 1,5 Тл. Схожі результати отримано в ННІ енергетики і автоматики НУБіП України (підвищення врожайності пшениці на 17 ... 21 %), але при енергетичній дозі 0,2 ... 0,5 Дж·с/кг та індукції 30 мТл.

Підвищення врожайності овочевих культур (насіння томатів, моркви, капусти, перцю) на 12 ... 25 % спостерігалось при застосуванні мікрохвильових технологій, але знову ж таки при різних частотах (від 2450 МГц до 37 ... 39 ГГц) і різній питомій потужності (0,05 ... 1,0 кВт/кг).

Наведені приклади дії різних енергоносіїв, демонструючи високу ефективність, суттєво відрізняються за параметрами і режимами обробки, принципами трансформації і прийому енергії біоб'єктами, впливом на ефект посилення або пригнічення росту рослин, технологічністю та коефіцієнтом дії залежно від різних видів рослин.

Існуючі розбіжності, неадекватність проробки питань щодо методів підведення енергії, відсутність єдиної думки щодо "технологічності" їх, витрат електроенергії, широкого діапазону зміни величини коефіцієнта корисної дії та ін. значно ускладнюють реалізацію таких перспективних електротехнологій, розробку конструкторсько-технологічних рішень при створенні відповідного обладнання.

На наш погляд, до негативних дій належить і прагнення ряду дослідників вирішувати існуючі проблеми шляхом копання проблеми у шир, а не "усередину", що безумовно стримує реалізацію цих електротехнологій в рослинництві, обмежує можливості, що закладені у фізичній суті дії електромагнітної енергії на продукцію рослинництва, не дає однозначної відповіді на ряд питань, наприклад доцільності застосування того чи іншого енергоносія, шляхів трансформації його до об'єкта тощо.

Висновки

1. Впровадження високоефективних електротехнологій в рослинництві шляхом електромагнітної дії на процеси активації розвитку рослин може реально сприяти підвищенню врожайності сільськогосподарських

культур, вирішенню проблеми забезпечення потреб країни рослинними продуктами.

2. Незважаючи на досягнуті позитивні результати, вирішення проблеми може бути здійснено шляхом більш глибокої проробки питань впливу електромагнітної енергії на життєдіяльні процеси в біологічних об'єктах; встановлення залежності енергетичної дози і носія енергії від меж енергетичного ресурсу біооб'єкта, закладеного природою, його генотипу; визначення ефективності методу (енерговитрати, коефіцієнт корисної дії, технологічність) залежно від призначення обробки і конструктивно-технологічних особливостей електротехнологічного обладнання, його параметрів.

Список літератури

1. Блонская А.П. Предпосевная обработка семян с/х культур в электромагнитном поле постоянного тока в сравнении с другими методами воздействия / А.П. Блонская, В.А. Окулова // Электронная обработка материалов. – 1982. – №3 (105). – С. 72 – 75.
2. Іноземцев Г.Б. Електротехнології в рослинництві: навч. посібник / Г.Б. Іноземцев, В.В. Козирський, О.В. Окушко; за ред. Г.Б. Іноземцева. – К.: ТОВ "Аграр Медіа Груп, 2012. – 160 с.
3. Іноземцев Г.Б. Електромагнітна енергія як фактор активації розвитку та підвищення врожайності в рослинництві / Г.Б. Іноземцев // Наук. вісник НУБіП України. – 2012. – Вип. 174, ч. 1. – С. 7 – 11.
4. Іноземцев Г.Б. Підвищення надійності і працездатності електротехнологічних установок у рослинництві / Г.Б. Іноземцев, О.В. Окушко, А.С. Нанавов // Наук. вісник НУБіП України. – 2012. – Вип. 174, ч. 2. – С. 30 – 34.
5. Ono T. Equipment for spraying agricultural chemicals using static electricity, Japan, Soc Agr. Mach. – 1999. – Vol. 61. - № 1. – P. 43 – 44.
6. Pickett J.M. Responses of avena coleoptiles to magnetic fields / J.M. Pickett, A.R. Schrank // Texas J.Sci – 1985. – V.17, №3. – P. 243 – 256.
7. Sale A.J Effects of high electric fields on microorganism / A.J. Sale, W.A. Hamilton // Biochimica et Biohisica Acta . – 1988. – Vol 163. – №1. – P. 37 – 43.

Рассмотрены вопросы состояния проблемы и реальность реализации методов воздействия электромагнитной энергии на активацию растений.

Електромагнітна енергія, енергетический ресурс, доза обробки, енергія проростання, семя, предпосевная обробка, всхожесть, биообъект, растениеводство.

The problems of the problem and the reality of the methods of influence on the activation of the electromagnetic energy plants.

Electromagnetic energy, energy source, the dose of treatment, the vigor, the seed, pre-sowing germination, biological object, crop.

СИСТЕМА ЭФФЕКТИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОКА НА ФЕРМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХЛАДОНОСИТЕЛЕЙ С НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ЗАМЕРЗАНИЯ

***А.Б. Коршунов, кандидат технических наук
ГНУ ВИЭСХ РОССЕЛЬХОЗАКАДЕМИИ, г. Москва***

Проведены исследования по выбору хладоносителей с низкой температурой замерзания для охлаждения молока на фермах. Предложено в качестве хладоносителя в охлаждающих установках использовать Экосол-40. Разработана и исследована система охлаждения молока на фермах, позволяющая снизить эксплуатационные расходы и повысить надежность работы оборудования.

Система охлаждения, молоко, хладоноситель, охладитель молока.

В связи с вступлением в ВТО современная технология предъявляет все более жесткие требования к поддержанию режимов не только к охлаждению молока на фермах, но и на всех стадиях холодильной обработки при производстве молочных продуктов на молокозаводах.

Цель исследований – разработка системы с использованием хладоносителей с низкой температурой замерзания, обеспечивающую эффективное охлаждение молока на фермах.

Материалы и методика исследований. Из анализа существующих технологий можно выделить четыре варианта систем охлаждения с использованием танков-охладителей [1].

Первый, один из самых простых и дешевых по сравнению с другими вариант, когда используется резервуар-охладитель с непосредственным охлаждением. Однако в такой схеме возможно примерзание молока к внутренней поверхности резервуара, что недопустимо.

Второй вариант – парокомпрессионные холодильные машины (ПКХМ) с аккумуляторами льда. Охлаждение стенок резервуара с молоком производится ледяной водой. В этом случае исключается примерзание молока к стенкам, охлаждение происходит быстрее, т.к. ПКХМ включается сразу в момент поступления молока в резервуар-охладитель. Кроме того, применение аккумуляторов холода позволит значительно снизить затраты электроэнергии, т.к. намораживать лед можно в ночное время, при минимальных нагрузках в электросетях, когда стоимость электроэнергии в 3-4 раза ниже, чем днем. Однако при вторичном заполнении резервуара возникает проблема, связанная с изменением свойств молока при смешивании теплого и холодного молока, как и в первом варианте, что снижает его качество.

При третьем варианте резервуар-охладитель с аккумулятором холода комплектуется проточным охладителем. В этом случае обеспечивается быстрое охлаждение молока и снимается проблема изменения его свойств при смешивании теплого и холодного молока.

Четвертый вариант отличается от систем с намораживанием льда (2-й и 3-й варианты) тем, что с целью энергосбережения в проточных охладителях, где осуществляется первая ступень охлаждения молока, используется проточная вода (грунтовая или водопроводная), которая в дальнейшем может использоваться для поения животных или на технологические нужды. Однако в этом случае надо учитывать, что пластинчатые охладители очень чувствительны к качеству воды.

С целью быстрого охлаждения молока и сохранения его качества проводятся исследования по замене ледяной воды альтернативными хладоносителями. Так, в институте холода и биотехнологий Санкт-Петербургского национального университета проводятся исследования электролитных водно-пропиленгликолевых хладоносителей с температурой – 3...+2 °С. Как утверждают авторы, применение таких хладоносителей позволит увеличить срок службы холодильного оборудования, будет способствовать улучшению качества молока благодаря его более быстрому охлаждению и предотвращению развития в нем микроорганизмов [2].

Результаты исследований. В ВИЭСХ совместно с МГУИЭ проводились исследования по выбору хладоносителей с низкой температурой замерзания. Учитывая относительно низкую стоимость и теплофизические свойства в качестве хладоносителя в охлаждающих установках был выбран Экосол-40. Он обладает относительно малой вязкостью, в том числе и при низких температурах, что улучшает его циркуляцию и теплопроводимость в применяемых системах. Удельная теплоемкость экосола такая же, как у молока (3,8–3,9 кДж/кг·°С). Кроме того, при понижении температуры экосол уменьшается в объеме и, в связи с этим, разрыв труб исключен. В гигиеническом сертификате, выданном центром Госсанэпиднадзора, указано, что по степени воздействия на человека экосол относится к веществам безопасным. Его также отличает низкое коррозионное воздействие на различные металлы (в десятки раз меньше, чем у известных антифризов), нетоксичность, взрывобезопасность, плохая горючесть.

Для оценки эффективности в ВИЭСХ были проведены лабораторные испытания. Проверялись две схемы быстрого охлаждения молока с использованием экосола. В первом варианте дополнительно к традиционной системе с аккумулятором льда, где процесс намораживания льда происходит на поверхности испарителей (трубчатых или пластинчатых) ПКХМ, опущенных в резервуар с водой, была установлена теплоизолированная емкость с водой, с установленной в ней теплообменником, по которому циркулировал экосол, охлаждавшийся наружным воздухом.

При проведении лабораторных испытаний установки контролировалась температура воды и масса замороженного льда в аккумуляторе холода, температура экосола на входе и выходе из теплообменника, а

также температура наружного воздуха. При температуре наружного воздуха $-9...-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ время охлаждения воды до $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило около 3 ч.

Во втором варианте, к традиционной охлаждающей системе с аккумуляторами льда, был добавлен еще один проточный охладитель молока, установленный перед существующим в начале потока теплого молока, в котором в качестве хладоносителя циркулировал экосол, охлаждавшийся наружным воздухом.

Известно, что отличительной особенностью работы пластинчатого охладителя молока доильных установок является импульсный режим подачи молока из молокоприемника, регулируемый объем которого обычно меняется ступенчато, например на отечественных установках АДМ-8, УДМ-100, УДМ-200 в диапазоне 5, 10, 15 л, или устанавливается только одна величина, например у доильной установки «Unicala» фирмы De Laval.

Во время паузы между включениями молочного насоса молоко охлаждается при вынужденном движении хладоносителя и неподвижном состоянии молока в межпластинной полости. Это не приводит к подмораживанию молока, т.к. хладоносителем в основном проточном охладителе является ледяная вода с температурой $+0,5...2\text{ }^{\circ}\text{C}$. В дополнительном проточном охладителе в качестве хладоносителя использовался Экосол-40, температура которого зависела от температуры окружающего наружного воздуха и в зимний период достигала отрицательных значений.

Проведенные расчеты и предварительные лабораторные испытания показали, что для исключения подмораживания молока в межпластинной полости дополнительного охладителя включение и выключение насоса экосола должно быть согласовано с импульсным включением молочного насоса доильной установки при температуре наружного воздуха не выше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температуре наружного воздуха выше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ управлением насоса хладоносителя осуществляется по другому алгоритму.

В этом варианте система охлаждения работает следующим образом. В ночное время, когда стоимость электроэнергии в 3–4 раза ниже, включается холодильный агрегат, который намораживает на испарителе лед и охлаждает находящуюся в баке льдоаккумулятора воду до температуры $0\text{ }^{\circ}\text{C}...+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. При достижении необходимого количества льда, толщину намерзания которого контролирует специальный датчик, холодильный агрегат автоматически прекращает свою работу – льдоаккумулятор полностью готов к работе.

С началом дойки включается насос ледяной воды, который обеспечивает циркуляцию ее через основной проточный охладитель. При температуре окружающего воздуха ниже температуры охлаждаемого молока автоматически включается насос хладоносителя (Экосол-40) другого контура, который обеспечивает предварительное охлаждение молока в дополнительном проточном охладителе.

Выводы

Проведенные исследования показали, что применение предложенной системы охлаждения позволяет повысить надежность, и уменьшить

эксплуатационные затраты. При этом расходы на электроэнергию уменьшаются в 1,5–3 раза в зависимости от региона, где устанавливается оборудование для быстрого охлаждения молока.

Список литературы

1. Цой Ю.А. Процессы и оборудование доильно-молочных отделений животноводческих ферм / Ю.А. Цой. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. – 424 с.
2. Эглит А.Я. Проблемы холодоснабжения молокозаводов / А.Я. Эглит, В.В. Кириллов, А.А. Брусенцев. // Холодильная техника. – 2012. – №12. – С. 26–27.

Проведено дослідження з вибору холодоносія з низькою температурою замерзання для охолодження молока на фермах. Запропоновано як холодоносій в охолоджуючих установках використовувати Екосол-40. Розроблено і досліджено систему охолодження молока на фермах, що дозволяє знизити експлуатаційні витрати і підвищити надійність роботи обладнання.

Система охолодження, молоко, холодоносій, охолоджувач молока.

The researches on the choice of refrigerants with a low freezing point for cooling milk on the farm are carried out. Proposed as a coolant in the cooling units use Ecosol-40. Developed and investigated cooling of milk on farms, reduce operating costs and improve the reliability of the equipment.

The cooling system, milk, refrigerant, milk cooler.

УДК 530(075.8)

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ВЕТРА

Р.А. Амерханов, доктор технических наук

К.А. Гарькавый, кандидат технических наук

Кубанский государственный аграрный университет, Россия

Приведена математическая модель трехмерного турбулентного потока. Изложен метод анализа распространения в атмосфере техногенных примесей под действием ветра.

Турбулентный поток, межфазовый поток, метод Галеркина, распространение примесей, распространение облаков.

Одна из актуальных проблем, волнующая человечество и требующая свое решение, – это загрязнение окружающей среды. Существенный отрицательный экологический эффект вызван выбросом в атмосферу аэрозолей, содержащих твердые частицы. Для решения этой проблемы необходимо, в числе других способов, изучить закономерности распростра-

эксплуатационные затраты. При этом расходы на электроэнергию уменьшаются в 1,5–3 раза в зависимости от региона, где устанавливается оборудование для быстрого охлаждения молока.

Список литературы

1. Цой Ю.А. Процессы и оборудование доильно-молочных отделений животноводческих ферм / Ю.А. Цой. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. – 424 с.
2. Эглит А.Я. Проблемы холодоснабжения молокозаводов / А.Я. Эглит, В.В. Кириллов, А.А. Брусенцев. // Холодильная техника. – 2012. – №12. – С. 26–27.

Проведено дослідження з вибору холодоносія з низькою температурою замерзання для охолодження молока на фермах. Запропоновано як холодоносій в охолоджуючих установках використовувати Екосол-40. Розроблено і досліджено систему охолодження молока на фермах, що дозволяє знизити експлуатаційні витрати і підвищити надійність роботи обладнання.

Система охолодження, молоко, холодоносій, охолоджувач молока.

The researches on the choice of refrigerants with a low freezing point for cooling milk on the farm are carried out. Proposed as a coolant in the cooling units use Ecosol-40. Developed and investigated cooling of milk on farms, reduce operating costs and improve the reliability of the equipment.

The cooling system, milk, refrigerant, milk cooler.

УДК 530(075.8)

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ВЕТРА

Р.А. Амерханов, доктор технических наук

К.А. Гарькавый, кандидат технических наук

Кубанский государственный аграрный университет, Россия

Приведена математическая модель трехмерного турбулентного потока. Изложен метод анализа распространения в атмосфере техногенных примесей под действием ветра.

Турбулентный поток, межфазовый поток, метод Галеркина, распространение примесей, распространение облаков.

Одна из актуальных проблем, волнующая человечество и требующая свое решение, – это загрязнение окружающей среды. Существенный отрицательный экологический эффект вызван выбросом в атмосферу аэрозолей, содержащих твердые частицы. Для решения этой проблемы необходимо, в числе других способов, изучить закономерности распростра-

нения этих выбросов. Атмосфера, загрязненная антропогенными выбросами, представляет собой гетерогенную многофазную среду.

Технологические процессы, при которых имеют место химические реакции и теплофизические превращения, сопровождаются большим количеством выбросов, вредных для окружающей среды. Значительная часть вредных ингредиентов попадают в атмосферу. Под действием ветра они могут распространяться в пространстве, а затем выпадать на землю, что может нанести значительный вред окружающей растительному и животному миру.

Эти явления подчиняются закономерностям гидродинамики многокомпонентных сред. Кроме того, в многокомпонентной среде имеют место молекулярная и кинетическая диффузия.

Под действием солнечной радиации и потока ветра аэродинамическое поле перемещается, расширяет свой объем и поэтому, выпадая может покрыть большой участок Земли.

Анализ гидродинамики указанных явлений позволит указать путь уменьшения степени вреда от техногенных выбросов.

Цель исследований – определение закономерности распределения примеси в атмосфере и указание метода уменьшения интенсивности их распространения.

Материалы и методика исследований. Анализ обмена импульсами между компонентами техногенной среды проводится методом моделирования гидродинамики процесса. При этом учитывается вероятность действия ветра.

Результаты исследований. Интенсивность обмена импульсом между компонентами выражается отношением:

$$P_{ji} = -P_{ji} = R_{ji} + J_{ji}v_{ji}; (i, j = 1, 2, \dots, N; i \neq j). \quad (1)$$

В этой формуле R_{ji} – межкомпонентная (межфазная) сила, отнесенная к единице объема смеси и обусловленная силами трения, давления, сцепления между компонентами. Так как фазовые превращения имеют место на границе между фазами (компонентами), то величину v_{ji} следует рассматривать как скорость i -й фазы на границе с j -й фазой. В гетерогенных системах с вязкими жидкостями на межфазовых границах отсутствуют скачки скорости и поэтому $v_{ij} = v_{ji}$. В таком случае

$$R_{ji} = -R_{ij}. \quad (2)$$

Интенсивность обмена энергией между фазами представляется в виде уравнения:

$$E_{ji} = W_{ji} + Q_{ji} + J_{ji}v_{ji}(u_{ji} + 1/2v_{ji}^2) \quad (3)$$

При этом $E_{ji} = -E_{ij}; (i, j = 1, 2, \dots, N; i \neq j)$.

В этом уравнении первый член выражает приток энергии в i -ю фазу за счет работы W_{ji} межфазных (межкомпонентных) сил, а именно трения, давления, взаимного сцепления и др.; второй член уравнения – приток энергии за счет теплообмена Q_{ji} на границе фаз. Последний член урав-

нения выражает перенос внутренней u_{ji} кинетической $1/2 v_{ji}^2$ энергии вместе с переносом массы из одной фазы в другую.

В уравнении (1) – (3) – приняты обозначения: P_y – интенсивность обмена импульсом между j -й и i -й фазами; R_0 – полная межфазовая сила со стороны j -й фазы на i -ю и отнесенная к единице объема смеси, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^2)$; v_{ji} – скорость массы, претерпевающий фазовый переход, $\text{м}/\text{с}$; E_y – интенсивность обмена энергией между i -й и j -й фазами в единице объема смеси в единицу времени, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; W_y – работа межфазных сил i -й фазы на межфазной границе с j -й фазой, отнесенная к единице объема смеси, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; J_{ji} – интенсивность фазовых переходов или фазовых переходов при переносах массы в единице объема смеси из j -й фазы в i -ю $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; μ_y – внутренняя энергия.

Заслуживает внимания вопрос о структуре скорости потока при $Z > Z_0$. Многочисленные исследования показывают, что в нижнем слое атмосферы средняя скорость изменяется по высоте по логарифмической зависимости. На основе исследований определена зависимость [1]:

$$\frac{d\bar{V}_B(z)}{dz} = \frac{V_*}{\wp} g \left(\frac{h_0}{z} \right), \quad (4)$$

где V_B – среднее значение скорости, $\text{м}/\text{с}$; $V_* = \sqrt{\tau/\rho}$; τ – напряжение трения; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; $\wp = 0,38 - 0,4$ – постоянная Кармана; h_0 – высота шероховатостей почвы, м .

Согласно выводам из теории подобия, изменения скорости ветра с высотой во всех случаях должны определяться универсальной функцией $f(\xi)$ от безразмерной высоты $\xi = \frac{z}{L}$, где $L = -c_p \rho_0 T_0 u_*^3 / xgq$ [2]. Для непосредственной проверки этого результата и установления точного вида функции $f(\xi)$ надо иметь наряду со значениями $\bar{u}(z)$ также и значения величины $u_* = \left(\frac{\tau}{\rho_0} \right)$ и q , позволяющие подсчитать масштаб L . Однако непосредственные измерения турбулентных потоков q и τ в приземном слое атмосферы начали проводиться лишь сравнительно недавно и до сих пор являются относительно немногочисленными и довольно неточными.

Возможен и иной подход при анализе распространения в атмосфере примесей под воздействием ветра.

В работе [3] исследуется распространение облака примеси под действием ветра. При этом учитывается процесс турбулентной диффузии, а также вертикального профиля скорости ветра. Авторами рассматриваются как двумерное, так и трехмерное распространения примеси. Трехмерная задача позволяет учитывать турбулентную диффузию, как в вертикальном направлении, так и в направлении, перпендикулярном скорости ветра.

Распространение примеси под действием ветра в ее вертикальной диффузии, имеет вид:

$$u(=)\partial_x n(x, z) = D_t [\partial_z n], \quad (5)$$

где $n(x, z)$ – числовая плотность молекул примеси.

Коэффициент турбулентной диффузии D_t можно записать в стандартном виде так:

$$D = \delta(r),$$

где δ – коэффициент шероховатости, как правило, находится в пределах 0,01 – 0,4 м и зависит от свойств подстилающей поверхности, вдоль которой распространяется примесь.

В приземном слое часть примеси может всасываться почвой. Облако примеси в основном распространяется в атмосферу:

$$\frac{\partial n(x, 0)}{\partial z} = 0, \quad (6)$$

Будем рассматривать простейший вид начальных условий для задачи о распространении: на расстоянии от земли до высоты числовая плотность примеси постоянна:

$$n(0, z) = n_0, \quad (7)$$

на остальной высоте ее числовая плотность равна нулю. Очевидно, что начальное условие (3) согласуется с граничным условием (6). Отметим, что условие (7) является аппроксимацией распределения примеси о высоте над подстилающей поверхностью, ранее полученного в [4]. Учет более реалистических профилей числовой плотности возможен, но практически мало влияет на выходы этой работы.

Прежде чем выполнять численное моделирование, проведем качественный анализ задачи, используя метод Галеркина. Будем искать решение (5) в виде:

$$n(x, z) = A(x) \exp[-2z^2 / h^2] \quad (8)$$

Отметим, что выражение (8) точно удовлетворяет граничным условиям (5), (6), что, как правило, существенно повышает точность применения метода Галеркина [5]. Подставляя (8) в уравнение (4) и используя метод Галеркина, для неизвестной функции $A(x)$ получаем уже обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$k_0 \frac{dA}{dx} = -Ak_1, \quad (9)$$

где

$$k_0 = \int_0^\infty u(z) \exp[-4z^2 / h^2] dz, \quad k_1 = \frac{8}{h^4} \int_0^\infty D(z) z^2 \exp[-4z^2 / h^2] dz.$$

В приближении постоянной скорости приземного потока u_0 интервалы легко вычисляются аналитически, в результате решение уравнения (9) имеет вид:

$$A(x) = A_0 \exp[-k_1 x / k_0] = A_0 \exp[-Dx / h^2 u_0] \quad (10)$$

Как следует из выражения (11), плотность примеси экспоненциально убывает по мере удаления от начального источника. Введем, исполь-

зую выражение (10) характерную длину l рассеяния облака молекул примеси вследствие турбулентной диффузии

$$l = \frac{u_0 h^2}{D} = \frac{h^2}{\delta}. \quad (11)$$

Обратим внимание на то, что характерная длина рассеяния l не зависит от скорости ветра. В частности, при $h=1$ м и $\delta=0,1$ м имеем, что $l = 10$ м.

Увеличение величины δ и, следовательно, коэффициента турбулентной диффузии приводит к существенному уменьшению числовой плотности примеси на высотах до 2 м. На этих высотах практически исчезает зависимость от координаты, другими словами, профиль числовой плотности молекул примеси выхолаживается. Таким образом, увеличение коэффициента шероховатости приводит к увеличению диффузионного потока в вертикальном направлении и уменьшению плотности молекул примеси на высотах, сравнимых со средним ростом человека (~ 2 м), и на сравнительно небольших расстояниях от начала распространения облака.

В трехмерном случае уравнение конвективной диффузии примеси имеет вид:

$$u(z)\partial_x n(x, y, z) = D_l [\partial_{zz} n + \partial_{yy} n] \quad (12)$$

При этом ставится дополнительное граничное условие:

$$n(x, \pm\infty, z) = 0. \quad (13)$$

С помощью метода Галеркина будем искать приближенное решение трехмерного уравнения в следующем виде:

$$n(x, y, z) = n(x, z) \exp[-4y^2 / W^2], \quad (14)$$

где W – ширина пролива жидкости, которая является источником паров, м.

Таким образом, с помощью выражения (14) и метода Галеркина удастся свести трехмерную задачу о распространении к двумерной со стоком. Фактически введенная функция $n(x, z)$ описывает значение плотности в центре распространяющегося облака, а экспоненциальный член приближенно описывает уменьшение числовой плотности за счет диффузии в направлении, перпендикулярном направлению ветра. Ясно, что для достаточно широкого пролива значение в центре облака будет совпадать с решением двумерной задачи. Заметим, что выражение (14) точно удовлетворяет граничному условию (13).

Этот вывод подтверждается при анализе экспериментальных данных. При этом величина l не зависит от скорости ветра. Ее значение определяется начальным вертикальным размером облака примеси и обратно пропорционально коэффициенту шероховатости подстилающей поверхности.

Выводы

Увеличение коэффициента турбулентной диффузии примеси существенно усиливает рассеивание примеси в ветровом потоке. Кроме того, определены границы распространения примеси в воздухе. В силу вертикальной диффузии примеси на достаточно большом расстоянии x кривая 2 имеет такое поведение, что и кривая 1. Другими словами, отнормиро-

ванная числовая плотность молекул примеси в области, ограниченной сверху кривой 2, больше 10^{-2} [1].

Список литературы

1. Катков В.Л. Математическое моделирование ветрового переноса загрязнений / В.Л.Катков. – Минск: Изд-во БГУ, 2005. – 88 с.
2. Котов Г.В. Моделирование распространения облака примесей под действием ветра в приземленном слое / Г.В.Котов, С.П.Фесенко. // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84, №3. – С. 535 – 539.
3. Лазеров Н.П. Топливо-энергетические ресурсы / Н.П.Лазеров // Вестник РАН. – 2006. – №5. – С. 398 – 408.
4. Монин А.С. Атмосферная диффузия / А.С.Монин. // Успехи физических наук. – М. 1959. – К. 1. – С. 119 – 130.
5. Монин А.С. Безразмерные характеристики в приземном шаре атмосферы / А.М.Монин, А.М.Обухов. // Докл. АН СССР, 1993. – №2. – С. 223 – 226.
6. Монин А.М. Новое о климате / А.А.Брестов, А.М.Монин. // Вестник РАН. – 2005. Т. 75, – №2. – С. 126 – 138.

Наведено математичну модель тривимірного турбулентного потоку. Викладено метод аналізу поширення в атмосфері техногенних домішок під дією вітру.

Турбулентний потік, міжфазовий потік, метод Галеркіна, поширення домішок, поширення хмар.

A mathematical model of three-dimensional turbulent flow. A method for analyzing the propagation of man-made contaminants in the atmosphere by the wind.

Turbulent flow, interphase flow, Galerkin method, distribution of impurities, distribution of clouds.

УДК 621.47: 677.057

ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА ИЗ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

***И.К.Жмакин, кандидат технических наук
Всероссийский научно-исследовательский институт
электрификации сельского хозяйства, г. Москва
Л.И. Жмакин, доктор технических наук
А.А. Крюков, кандидат технических наук
Московский государственный университет дизайна
и технологии, г. Москва***

Описан солнечный коллектор для нагрева воды, абсорбер которого изготовлен из водостойкой ткани с полимерным покрытием. Проведены экспериментальные исследования его теплотехнических характери-

ванная числовая плотность молекул примеси в области, ограниченной сверху кривой 2, больше 10^{-2} [1].

Список литературы

1. Катков В.Л. Математическое моделирование ветрового переноса загрязнений / В.Л.Катков. – Минск: Изд-во БГУ, 2005. – 88 с.
2. Котов Г.В. Моделирование распространения облака примесей под действием ветра в приземленном слое / Г.В.Котов, С.П.Фесенко. // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84, №3. – С. 535 – 539.
3. Лазеров Н.П. Топливо-энергетические ресурсы / Н.П.Лазеров // Вестник РАН. – 2006. – №5. – С. 398 – 408.
4. Монин А.С. Атмосферная диффузия / А.С.Монин. // Успехи физических наук. – М. 1959. – К. 1. – С. 119 – 130.
5. Монин А.С. Безразмерные характеристики в приземном шаре атмосферы / А.М.Монин, А.М.Обухов. // Докл. АН СССР, 1993. – №2. – С. 223 – 226.
6. Монин А.М. Новое о климате / А.А.Брестов, А.М.Монин. // Вестник РАН. – 2005. Т. 75, – №2. – С. 126 – 138.

Наведено математичну модель тривимірного турбулентного потоку. Викладено метод аналізу поширення в атмосфері техногенних домішок під дією вітру.

Турбулентний потік, міжфазовий потік, метод Галеркіна, поширення домішок, поширення хмар.

A mathematical model of three-dimensional turbulent flow. A method for analyzing the propagation of man-made contaminants in the atmosphere by the wind.

Turbulent flow, interphase flow, Galerkin method, distribution of impurities, distribution of clouds.

УДК 621.47: 677.057

ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА ИЗ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

***И.К.Жмакин, кандидат технических наук
Всероссийский научно-исследовательский институт
электрификации сельского хозяйства, г. Москва
Л.И. Жмакин, доктор технических наук
А.А. Крюков, кандидат технических наук
Московский государственный университет дизайна
и технологии, г. Москва***

Описан солнечный коллектор для нагрева воды, абсорбер которого изготовлен из водостойкой ткани с полимерным покрытием. Проведены экспериментальные исследования его теплотехнических характери-

стик. Получены опытные данные по коэффициентам потерь тепла и эффективности этих коллекторов. Ряд характеристик коллектора определен с использованием математического моделирования.

Солнечный коллектор, водостойкая ткань, коэффициент потерь тепла, эффективность коллектора.

В настоящее время самой распространенной и освоенной технологией в солнечной энергетике является сезонное горячее водоснабжение с использованием плоских солнечных коллекторов [2]. В них вырабатывается низкопотенциальная теплота, что позволяет экономить энергоресурсы, снизить зависимость региона от привозного топлива и сократить выбросы вредных веществ в окружающую среду.

Цель исследований – разработка конструкции коллектора из современных текстильных и полимерных материалов.

Материалы и методика исследований. Как известно, основным элементом коллектора является водонаполненная панель (абсорбер), в которой происходит поглощение потока солнечного излучения и передача его теплоты жидкости. Нами был разработан и исследован опытный образец коллектора с панелью, изготовленной с помощью клеевой технологии из двух полотнищ водонепроницаемой тентовой ткани черного цвета с двухсторонним поливинилхлоридным покрытием. Использовалась ткань марки «Unisol – 630», выпускаемая южнокорейской фирмой «Hanwha». Она имела толщину $0,53 \pm 0,02$ мм и поверхностную плотность $630 \pm 0,4\%$ г/м², а её основой служили полиэстеровые нити 1100 дтекс. По данным изготовителя такая ткань работоспособна в диапазоне температур – $30...+70$ °С и выдерживает давление воды до 3 бар. В процессе склеивания панели в ней формировалась система параллельных каналов (17 шт.) для движения жидкости и два гидравлических коллектора – раздающий и собирающий. В последних монтировались штуцеры для воды.



Рис. 1. Торцевой срез ткани

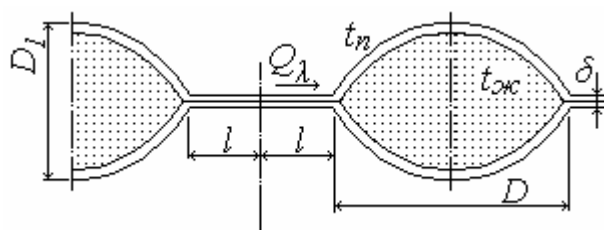


Рис. 2. Конфигурация каналов в тканевой панели

На рис. 1 показан торцевой срез водостойкой ткани при 100 – кратном увеличении, а на рис. 2 – конфигурация каналов в панели. Сечение канала формируют два круговых сегмента с размерами $D = 19$ мм и $D_1 =$

12 мм; каналы соединены ребрами с полудлиной $l = 6$ мм, толщина ребер $\delta = 1,06$ мм.

Площадь тканевой панели составляла $0,84 \text{ м}^2$; она имела размеры 1320×640 мм, сухую удельную массу $1,7 \text{ кг/м}^3$ и вмещала $4,4$ л воды. В экспериментах панель размещалась в теплоизолированном корпусе с прозрачным покрытием из листового сотового поликарбоната толщиной 4 мм. Поликарбонат непрозрачен для излучения с длинами волн $\lambda < 380$ нм и, тем самым, защищает текстильную панель от повреждения жестким ультрафиолетом. В видимой же области спектра его коэффициент пропускания достаточно высок и составляет $81,5\text{--}82\%$ [1].

Отказ от традиционных для солнечной энергетики материалов (металла и стекла) позволил нам существенно снизить удельную массу коллектора и повысить его ударостойкость при сохранении удовлетворительных теплотехнических характеристик, что подтвердили лабораторные испытания и эксперименты в натурных условиях (г. Москва). Последние проводились с использованием квазистационарной методики на универсальном теплогидравлическом стенде с замкнутым контуром циркуляции теплоносителя. Автоматизированная система записи и обработки опытных данных, подключенная к персональному компьютеру, позволяла с заданной периодичностью регистрировать и архивировать результаты измерений. На стенде определяли мгновенные КПД коллекторов:

$$\eta = gc_p(t'' - t')/E, \quad (1)$$

которые аппроксимировали уравнениями Уиллера и Уиллера-Хоттеля-Блисса [6]:

$$\eta = F_R\eta_0 - F_RU_L \frac{t' - t_0}{E} = A_1 - B_1t_1^*, \quad (2)$$

$$\eta = F'\eta_0 - F'U_L \frac{0,5(t' + t'') - t_0}{E} = A_2 - B_2t_2^*, \quad (3)$$

где F_R и F' – коэффициент отвода тепла из коллектора и эффективность поглощающей панели; U_L – полный коэффициент потерь; E – плотность лучистого потока; $g = G/F_K$ – удельный расход теплоносителя (G – расход, F_K – площадь панели); c_p – теплоемкость воды; t' и t'' – ее температура на входе и на выходе; t_0 – температура окружающей среды; $\eta_0 = \tau\alpha$ – оптический КПД (произведение коэффициента пропускания покрытия и коэффициента поглощения панели); t^* – приведенная температура. Уравнения (2) и (3) устанавливают линейную связь между КПД и приведенной температурой при условии, что коэффициент потерь является постоянной величиной. В соответствии с действующими стандартами комплексы $A_1 = F_R\eta_0$; $A_2 = F'\eta_0$ и $B_1 = F_RU_L$; $B_2 = F'U_L$ являются основными параметрами теплотехнического совершенства солнечных коллекторов.

Результаты исследований. Регрессионные уравнения для мгновенных КПД коллекторов с текстильным абсорбером, полученные при натурных испытаниях, имеют вид:

$$\eta = 0,69 - 6,37t_1^*;$$

$$\eta = 0,72 - 6,81t_2^*.$$

Инструментальная погрешность измерений КПД не превышала 12 %, однако разброс опытных точек приводил к дополнительным ошибкам аппроксимации, составлявшим 5 – 7 %.

Для солнечного коллектора с текстильной панелью были проведены и независимые измерения коэффициентов тепловых потерь с использованием метода регулярного режима охлаждения [5]. Они проводились в лабораторном помещении при остывании коллекторов с отключенной циркуляцией жидкости. В опытах фиксировалась температура воды в панели в различные моменты времени. Из уравнения дифференциального теплового баланса коллектора можно получить следующее выражение для полного коэффициента потерь:

$$U_L = mc_p M_{ж} / F_K, \quad (4)$$

где $M_{ж}$ – масса воды в панели; m – темп ее охлаждения, определяемый при обработке соответствующих термограмм. Среднее значение коэффициента потерь для коллектора с тканевой панелью оказалось равным 5,77 Вт/м²гр, что на 10–15 % превышает потери отечественных коллекторов, не имеющих селективных покрытий [3, 4].

Методами математического моделирования [6] для текстильной панели солнечного коллектора были определены следующие характеристики:

- 1) эффективность ребра (при теплопроводности ткани 0,22 Вт/мК) $E_p = 0,73$;
- 2) рассчитаны распределения температуры по длине ребра;
- 3) эффективность текстильной панели коллектора $F' = 0,84$;
- 4) доля кондуктивного теплового потока Q_A от ребер к жидкости в канале достигала 31 % общего энергопоступления.

При моделировании были также рассчитаны температуры воды на выходе из панели, а также выработка тепла коллектором при различных внешних условиях; определены коэффициенты потерь тепла в окружающую среду. Расчетные данные в пределах погрешности согласуются с найденными в экспериментах.

Выводы

Технико-экономические оценки показали, что затраты на комплектующие материалы для изготовления опытных образцов коллекторов с текстильными панелями составляют около 1400 руб. Это позволяет надеяться, что при массовом производстве их себестоимость не превысит 2000 руб/м². Применение таких коллекторов будет экономически оправдано у децентрализованных потребителей горячей воды, но лишь при условии замещения ими теплоты, вырабатываемой электрическими водонагревателями. К примеру, в средней полосе России по нашим расчетам они окупятся за два сезона эксплуатации.

Список литературы

1. Опыт разработки солнечного коллектора из теплостойких пластмасс / О.С. Попель, М.Ж. Сулейманов, С.Е. Фрид [и др.] // Теплоэнергетика. – 2008. – №12. – С. 6–8.

2. Солнечная энергетика / [Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.]. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 276 с.

3. Сравнительный анализ показателей конструкций солнечных коллекторов зарубежного и отечественного производства. Новые технологические решения / О.С. Попель, С.Е. Фрид, В.Н. Щеглов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2006. – №3. – С. 11– 15.

4. Тарнижевский Б.В. Технический уровень и освоение производства плоских солнечных коллекторов в России / Б.В. Тарнижевский, И.М. Абуев // Теплоэнергетика. – 1997. – №4. – С. 18–22.

5. Теория теплообмена / [под ред. Леонтьева А.И.] – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 1997. – 683 с.

6. Duffie J.A, Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, 2 Ed., J.Wiley & Sons, USA. – 1991. – 919 p.

Описано сонячний колектор для нагрівання води, абсорбер якого виготовлений з водостійкої тканини з полімерним покриттям. Проведено експериментальні дослідження його теплотехнічних характеристик. Отримані дослідні дані за коефіцієнтами втрат тепла та ефективності цих колекторів. Деякі характеристики колектора визначені з використанням математичного моделювання.

Сонячний колектор, водостійка тканина, коефіцієнт втрат тепла, ефективність колектора.

Describes a solar collector to heat water, the absorber is made of water-resistant fabric with a polymer coating. An experimental study of its thermal characteristics. Experimental data obtained from the coefficients of heat loss and efficiency of these collectors. A number of reservoir characteristics determined using mathematical modeling.

Solar collector, water-resistant fabric, the coefficient of heat loss, the efficiency of the collector.

УДК 621.3: 631.53.027.33

ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ЗЕРНОВОЇ МАСИ В КАМЕРІ ОБРОБКИ ПРИ ВІБРАЦІЙНОМУ ВИТІКАННІ

**О.М. Берека, доктор технічних наук
О.В. Науменко, аспірант***

Розглянуто процес витікання зерна з камери обробки під дією сил тяжіння та штучної вібрації. Наведено залежності швидкості та часу витікання зерна від кута відкриття затвора під дією вібрації.

Зернова маса, швидкість витікання, час обробки, кут відкриття, вібрація, сильне електричне поле.

*Науковий керівник – доктор технічних наук, професор О.М. Берека

© О.М. Берека, О.В. Науменко, 2013

2. Солнечная энергетика / [Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.]. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 276 с.

3. Сравнительный анализ показателей конструкций солнечных коллекторов зарубежного и отечественного производства. Новые технологические решения / О.С. Попель, С.Е. Фрид, В.Н. Щеглов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2006. – №3. – С. 11– 15.

4. Тарнижевский Б.В. Технический уровень и освоение производства плоских солнечных коллекторов в России / Б.В. Тарнижевский, И.М. Абуев // Теплоэнергетика. – 1997. – №4. – С. 18–22.

5. Теория теплообмена / [под ред. Леонтьева А.И.] – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 1997. – 683 с.

6. Duffie J.A, Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, 2 Ed., J.Wiley & Sons, USA. – 1991. – 919 p.

Описано сонячний колектор для нагрівання води, абсорбер якого виготовлений з водостійкої тканини з полімерним покриттям. Проведено експериментальні дослідження його теплотехнічних характеристик. Отримані дослідні дані за коефіцієнтами втрат тепла та ефективності цих колекторів. Деякі характеристики колектора визначені з використанням математичного моделювання.

Сонячний колектор, водостійка тканина, коефіцієнт втрат тепла, ефективність колектора.

Describes a solar collector to heat water, the absorber is made of water-resistant fabric with a polymer coating. An experimental study of its thermal characteristics. Experimental data obtained from the coefficients of heat loss and efficiency of these collectors. A number of reservoir characteristics determined using mathematical modeling.

Solar collector, water-resistant fabric, the coefficient of heat loss, the efficiency of the collector.

УДК 621.3: 631.53.027.33

ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ЗЕРНОВОЇ МАСИ В КАМЕРІ ОБРОБКИ ПРИ ВІБРАЦІЙНОМУ ВИТІКАННІ

**О.М. Берека, доктор технічних наук
О.В. Науменко, аспірант***

Розглянуто процес витікання зерна з камери обробки під дією сил тяжіння та штучної вібрації. Наведено залежності швидкості та часу витікання зерна від кута відкриття затвора під дією вібрації.

Зернова маса, швидкість витікання, час обробки, кут відкриття, вібрація, сильне електричне поле.

*Науковий керівник – доктор технічних наук, професор О.М. Берека

© О.М. Берека, О.В. Науменко, 2013

Для знищення комах-шкідників у зерновій масі за допомогою сильного електричного поля (СЕП) необхідно забезпечити ефективну дозу обробки. Основними складовими дози обробки є концентрація озону та час експозиції. Схема установки для обробки в СЕП наведена на рис. 1.

Концентрація озону залежить від напруженості електричного поля в зерновій масі, виду культури та вологості зерна [2, 4]. Час знаходження комах-шкідників в СЕП залежить від висоти камери обробки та швидкості руху зернової маси. В наведеній установці [3] рух зернового матеріалу здійснюється під дією сили тяжіння, вібрації та СЕП. На швидкість руху зернової маси в камері обробки впливає кожний із наведених чинників. У цій роботі розглянемо гравітаційне витікання зернової маси під дією вібрації.

Мета досліджень – вивчення процесу витікання зерна під впливом сил тяжіння та вібрації; теоретичне обґрунтування та практична перевірка залежностей часу та швидкості витікання зерна від кута відкриття затвора витікання з урахуванням впливу вібрації.

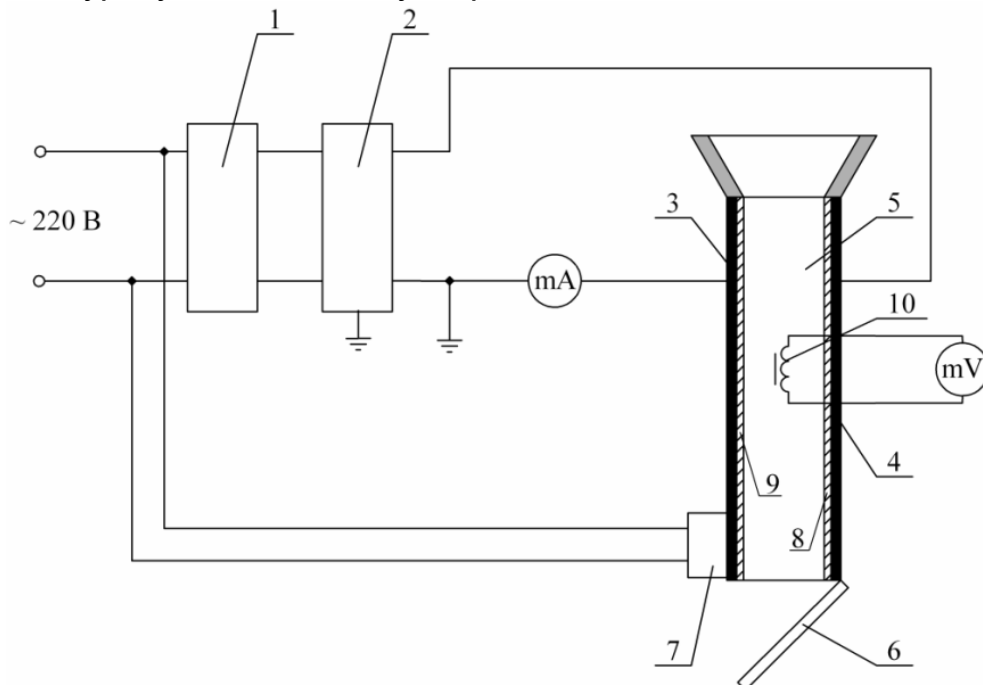


Рис. 1. Схема установки для знищення комах-шкідників у зерновій масі під дією СЕП:

1 – регулятор напруги; 2 – джерело високої напруги; 3, 4 – електроди; 5 – робоча камера; 6 – затвор витікання; 7 – електромагнітний вібратор; 8, 9 – ізоляційні пластини; 10 – індуктивний датчик

Матеріали та методика досліджень. Швидкість витікання зернової маси при гравітаційному витіканні з отвору визначається за виразом:

$$v_{a-a} = \lambda \sqrt{\sin^2 \alpha + m \cos^2 \alpha} \sqrt{2g(\chi R_{a-a} - \frac{\tau_0}{g\rho f})}, \quad (1)$$

де α – кут відкриття затвора (кут нахилу потоку зерна до горизонталі); R_{a-a} – гідралічний радіус перерізу випускного отвору, м; m – коефіцієнт сипучості зернової маси; χ – коефіцієнт, що залежить від величини коефіцієнта внутрішнього тертя в зерновому матеріалі; f – коефіцієнт

внутрішнього тертя зернового матеріалу; t_0 – початкова напруга зсуву, Н/м²; ρ – насипна густина зерна, кг/м³; g – прискорення вільного падіння ($g = 9,81$ м/с²); λ – коефіцієнт витікання.

Аналіз впливу вібрації на процес гравітаційного витікання зернової маси з камери обробки проведено з використанням положень теорії механіки насипних матеріалів під дією змінних сил та застосуванням математичного моделювання, практичною перевіркою результатів розрахунку.

Результати досліджень. На рис. 2 зображено розрахункову схему витікання зернової маси з камери обробки під дією вібрації.

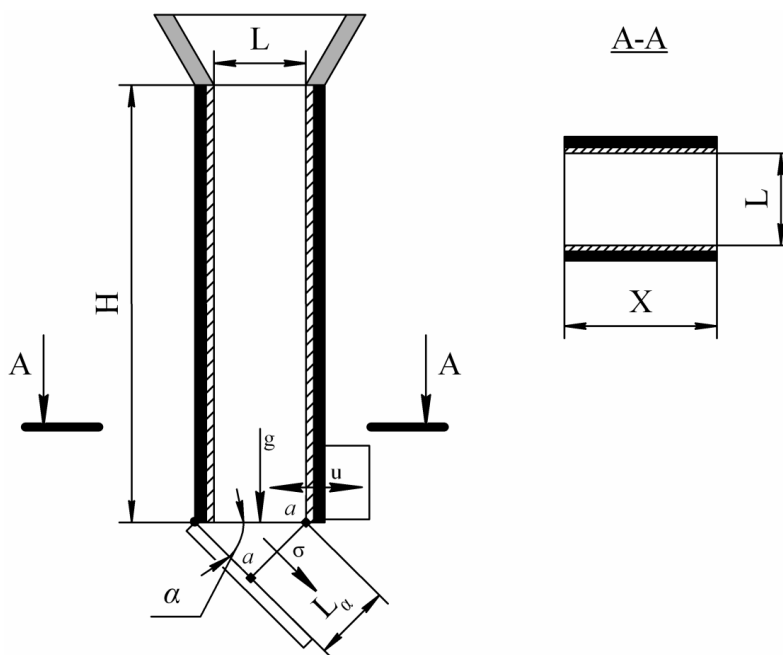


Рис. 2. Розрахункова схема установки при витіканні зернової маси під дією вібрації

За наявності горизонтальних коливань сипучого тіла з максимальним прискоренням $\pm u$ (рис. 3) результуюча сила, яка діє на об'єм зернової маси визначиться як геометрична сума сили тяжіння та сили інерції (вібраційної сили) [5, 7, 8].

Вектор динамічної об'ємної ваги матиме найбільшу величину:

$$\gamma_u = \gamma \sqrt{1 + \left(\frac{u}{g}\right)^2}, \quad (2)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²; u – прискорення коливань, м/с²; γ – об'ємна (насипна) вага сипучого тіла, Н/м³, що визначається за виразом

$$\gamma = \rho g, \quad (3)$$

де ρ – об'ємна маса тіла, кг/м³.

З урахуванням (3) вираз (2) можна записати у вигляді:

$$g_u = g \sqrt{1 + \left(\frac{u}{g}\right)^2}, \quad (4)$$

де g_u – геометрична сума прискорень, що діють на об'єм зернової маси, м/с^2 .

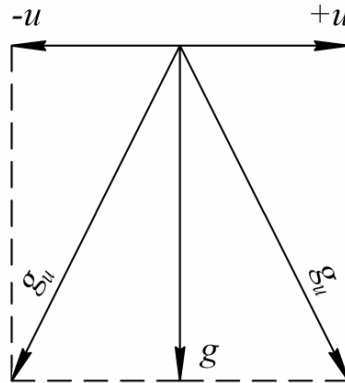


Рис. 3. Додавання векторів сил, які діють на об'єм зернової маси

Вібраційне прискорення визначиться за виразом:

$$u = 4B\pi^2 v^2, \quad (5)$$

де B – амплітуда коливань, м; v – частота коливань, Гц.

Підставивши (4) замість g у вираз (1) з урахуванням (5), отримаємо вираз для визначення швидкості гравітаційного витікання під дією вібрації:

$$v_{z-g} = \lambda \sqrt{\sin^2 \alpha + m \cos^2 \alpha} \sqrt{2g \sqrt{1 + \left(\frac{4B\pi^2 v^2}{g} \right)^2} \left(\chi R_{a-a} - \frac{\tau_0}{g \sqrt{1 + \left(\frac{4B\pi^2 v^2}{g} \right)^2} \rho f} \right)} \quad (6)$$

Пропускна здатність камери обробки визначиться за виразом:

$$q_{z-g} = v_{z-g} S_{a-a}, \quad (7)$$

де q_{z-g} – продуктивність камери обробки, $\text{м}^3/\text{с}$; S_{a-a} – площа випускного вікна, м.

Час витікання (час обробки) зерна з камери обробки:

$$t_{z-g} = \frac{V}{q_{z-g}}, \quad (8)$$

де t_{z-g} – час витікання зерна з камери обробки, с; V – об'єм камери, м^3 .

Середня швидкість v_{cp} проходження зерном камери обробки:

$$v_{cp} = \frac{H}{t}, \quad (9)$$

де H – висота камери, м.

За встановленими теоретичними залежностями в програмному забезпеченні Mathcad 14 проведено розрахунок граничних значень часу та швидкості витікання зерна ячменю під дією вібрації.

Значення величин фізико-механічних властивостей приймалися для умов експериментів [1]. Параметри вібрації приймалися за даними [6]: амплітуда коливань $B = 0,0008$ м, частота коливань $f = 50$ Гц.

Експериментальна перевірка отриманих теоретичних залежностей проводилася на зерні ячменю сорту «Солнцедар» вологістю 12,5 % урожаю 2012 року, вирощеного в Київській області. Для цього зерно ячменю засипали в камеру, відкривали затвор на певний кут, вмикали вібратор і визначали час витікання зерна. За виразом (9) визначали середню швидкість проходження зерном камери обробки.

Результати математичних розрахунків та експериментальні дані наведені на рисунках 4 та 5.

З наведених на рисунках 4 та 5 результатів видно, що дані експериментальних досліджень знаходяться в межах області теоретично допустимих значень часу та швидкості проходження зерном камери обробки, які визначені кривими 1 та 2 на рисунках 3 та 4.

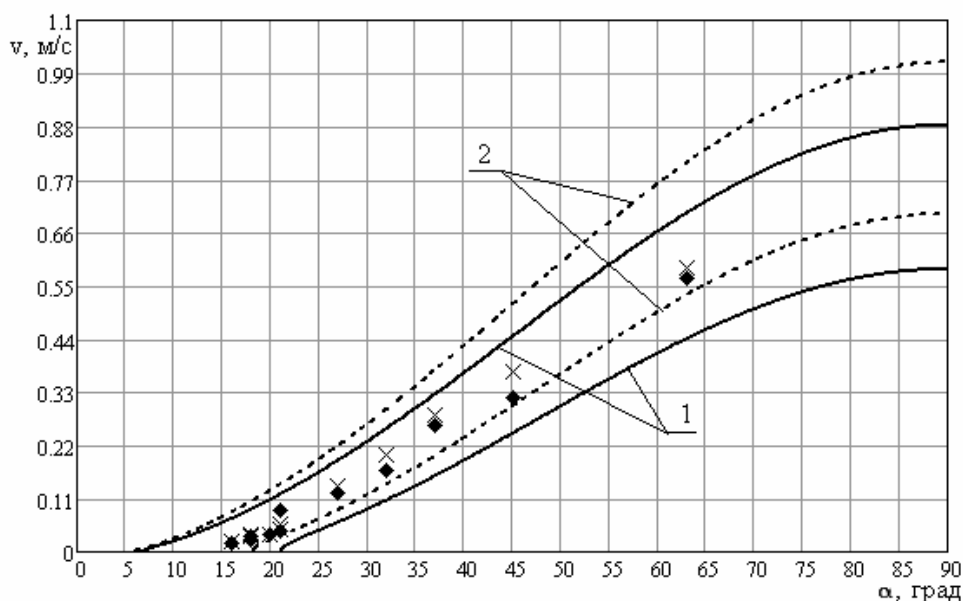


Рис. 4. Залежності швидкості гравітаційного витікання зернової маси та її витікання під дією вібрації:

1 – верхня і нижня межі швидкості гравітаційного витікання зерна ячменю з камери обробки; 2 – верхня і нижня межі швидкості витікання зерна ячменю під дією вібрації; ♦ – експериментальні дані для ячменю сорту «Солнцедар» вологістю 12,5 % при гравітаційному витіканні; x – експериментальні дані для зерна ячменю сорту «Солнцедар» вологістю 12,5 % при витіканні під дією вібрації

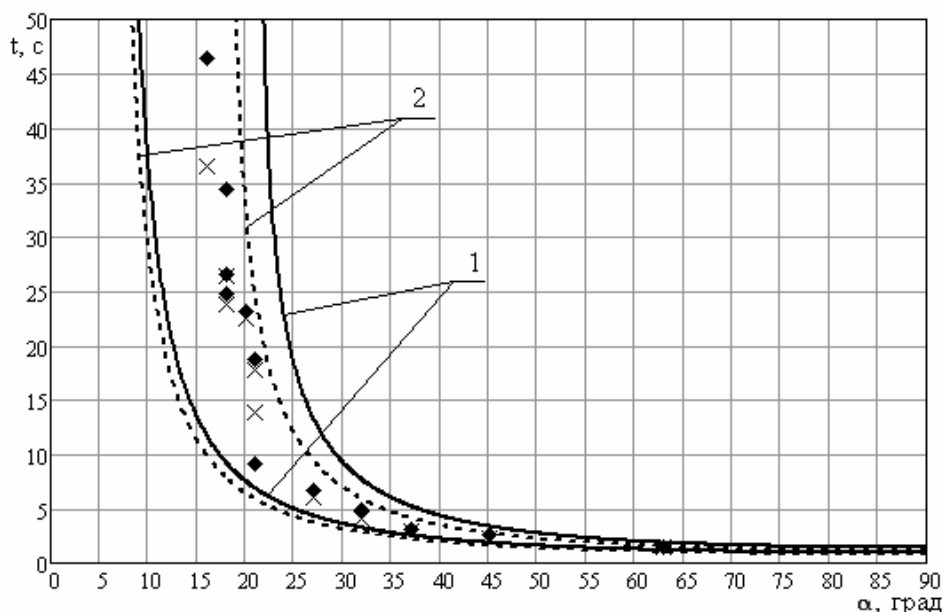


Рис. 5. Залежності часу гравітаційного витікання зернової маси та її витікання під дією вібрації:

1 – верхня і нижня межі часу гравітаційного витікання зерна ячменю з камери обробки; 2 – верхня і нижня межі часу витікання зерна ячменю під дією вібрації; ◆ – експериментальні дані для ячменю сорту «Солнцедар» вологістю 12,5 % при гравітаційному витіканні; x – експериментальні дані для зерна ячменю сорту «Солнцедар» вологістю 12,5 % при витіканні під дією вібрації

Висновки

Обґрунтовано процес гравітаційного витікання зернової маси з камери обробки під дією штучної вібрації. Встановлено залежності часу та швидкості гравітаційного витікання зернової маси від кута відкриття затвора витікання.

Наведені аналітичні вирази дозволяють визначати час та швидкість витікання зерна з камери обробки з урахуванням дії штучної вібрації.

Встановлено, що під дією вібрації покращується процес витікання зернового матеріалу з камери обробки: цей процес стає більш стабільним порівняно з витіканням без застосування вібрації та збільшується швидкість витікання зерна з камери обробки.

Список літератури

1. Алферов К.В. Бункерные установки. Проектирование, расчет и эксплуатация / К.В. Алферов, Р.Л. Зенков. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной лит-ры, 1955. – 208 с.
2. Берека О.М. Дослідження режимних параметрів при знезаражуючій обробці зерна різних видів культур у сильному електричному полі / О.М. Берека, С.М. Усенко // Науковий вісник НУБіП України. – 2011. – Вип. 166, ч.3. – С. 32 – 37.
3. Берека О.М. Знешкодження в сильних електричних полях комах-шкідників зерна / О.М. Берека, О.В. Наumenко // Motrol. Motorization and power industry in agriculture. – 2011. – Volume 13D. – С. 291 - 295.

4. Берека О.М. Часткові розряди в зерновій масі під дією сильного електричного поля / О.М. Берека, С.М. Усенко, С.В. Петриченко // Праці Таврійського держ. агротехн. ун-ту. – Вип. 11, Т. 6. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – С. 184 – 191.
5. Вибрации в технике: справ. в 6 т. / [Г.Г. Азбель, И.И. Блехман, И.И. Быховский и др.]; ред. сов. В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4. Вибрационные процессы и машины / [Г.Г. Азбель, И.И. Блехман, И.И. Быховский и др.]; под ред. Э.Э. Лавендела, 1981. – 509 с.
6. Зенков Р.Л. Машины непрерывного транспорта: учеб. для студ. вузов, обучающихся по спец. "Подъемно-транспортные машины и оборудование" / Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 432 с.
7. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов (основания расчета погрузочно-разгрузочных и транспортирующих устройств) / Р.Л. Зенков. – Москва: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной лит-ры (Машгиз), 1952. – 217 с.
8. Roberts A.W. Vibration of Powders and its Application / Roberts A.W. // Handbook of Powder Science and Technology (під редакцією M.E. Fayed, L. Otten). – Van Nostrand., 1984. – с. 166-185.

Рассмотрен процесс истечения зерна с камеры обработки под действием сил тяжести и искусственной вибрации. Представлены зависимости скорости и времени истечения зерна от угла открытия затвора под действием вибрации.

Зерновая масса, скорость истечения, время обработки, угол открытия, вибрация, сильное электрическое поле.

It is looked at grain flow process from processing cell under gravity and made vibration. It is determined grain flood speed and time dependences on bolt turning angle by vibration.

Grain mass, flow speed, processing time, turning angle, vibration, high electric field.

УДК 621.327.539

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ ТА ЧАСТОТИ СТРУМУ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМ-НАСОСІВ

О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, кандидати технічних наук

Проведено дослідження впливу відхилення напруги та частоти струму на кутову швидкість і технологічні характеристики вакуум-насосів. Встановлено залежності продуктивності і потужності вакуум-насоса від напруги і частоти струму.

Вакуум-насос, відхилення напруги, частота струму, електропривод, продуктивність, потужність.

4. Берека О.М. Часткові розряди в зерновій масі під дією сильного електричного поля / О.М. Берека, С.М. Усенко, С.В. Петриченко // Праці Таврійського держ. агротехн. ун-ту. – Вип. 11, Т. 6. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – С. 184 – 191.
5. Вибрации в технике: справ. в 6 т. / [Г.Г. Азбель, И.И. Блехман, И.И. Быховский и др.]; ред. сов. В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4. Вибрационные процессы и машины / [Г.Г. Азбель, И.И. Блехман, И.И. Быховский и др.]; под ред. Э.Э. Лавендела, 1981. – 509 с.
6. Зенков Р.Л. Машины непрерывного транспорта: учеб. для студ. вузов, обучающихся по спец. "Подъемно-транспортные машины и оборудование" / Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 432 с.
7. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов (основания расчета погрузочно-разгрузочных и транспортирующих устройств) / Р.Л. Зенков. – Москва: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной лит-ры (Машгиз), 1952. – 217 с.
8. Roberts A.W. Vibration of Powders and its Application / Roberts A.W. // Handbook of Powder Science and Technology (під редакцією М.Е. Fayed, L. Otten). – Van Nostrand., 1984. – с. 166-185.

Рассмотрен процесс истечения зерна с камеры обработки под действием сил тяжести и искусственной вибрации. Представлены зависимости скорости и времени истечения зерна от угла открытия затвора под действием вибрации.

Зерновая масса, скорость истечения, время обработки, угол открытия, вибрация, сильное электрическое поле.

It is looked at grain flow process from processing cell under gravity and made vibration. It is determined grain flood speed and time dependences on bolt turning angle by vibration.

Grain mass, flow speed, processing time, turning angle, vibration, high electric field.

УДК 621.327.539

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ ТА ЧАСТОТИ СТРУМУ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМ-НАСОСІВ

О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, кандидати технічних наук

Проведено дослідження впливу відхилення напруги та частоти струму на кутову швидкість і технологічні характеристики вакуум-насосів. Встановлено залежності продуктивності і потужності вакуум-насоса від напруги і частоти струму.

Вакуум-насос, відхилення напруги, частота струму, електропривод, продуктивність, потужність.

При відхиленні показників якості електроенергії від номінального значення виникають збитки, які мають дві складові: електромагнітну і технологічну. Електромагнітна складова визначається втратою активної потужності і зміною терміну служби ізоляції електрообладнання. Технологічна складова збитків обумовлена впливом якості електричної енергії на продуктивність технологічних установок та собівартість продукції, що випускається [1].

Відхилення напруги і частоти струму викликає зміну кутової швидкості електродвигуна, яка, в свою чергу, обумовлює зміну технологічних характеристик робочих машин.

Мета досліджень – встановлення впливу відхилення напруги і частоти струму на технологічні характеристики вакуум-насосів.

Матеріали та методика досліджень. Аналіз зміни кутової швидкості електроприводів вакуум-насосів та втрат енергії при відхиленні напруги і частоти струму проводився з використанням положень теорії електропривода, які стосуються електромеханічних властивостей асинхронних електродвигунів, приводних характеристик робочих машин і механізмів та застосуванням математичного моделювання.

При експериментальних дослідженнях напругу на двигуні змінювали за допомогою автотрансформатора, частоту струму – перетворювача частоти, вимірюючи при цьому частоту обертання вала тахометром. Використовуючи залежності продуктивності транспортерів від кутової швидкості, визначали зміну технологічних параметрів транспортера при відхиленні напруги та частоти струму від номінального значення.

Результати досліджень. При відхиленні напруги механічна характеристика електродвигуна на робочій ділянці описується рівнянням [2]:

$$M_{\delta} = \beta_{\delta} U_*^2 (\omega_0 - \omega), \quad (1)$$

де M_{δ} – момент двигуна, Н·м; β_{δ} – жорсткість механічної характеристики електродвигуна, Н·м·с; ω_0 – синхронна кутова швидкість, с⁻¹; ω – задана кутова швидкість, с⁻¹; $U_* = U/U_H$ – напруга у відносних одиницях.

Механічна характеристика вакуум-насоса має слабо виражений вентиляторний вигляд [3], тому можна вважати, що $M_c \approx \text{const}$. Тоді в установлених режимі роботи

$$\beta_{\delta} U_*^2 (\omega_0 - \omega) = M_c, \quad (2)$$

або

$$\beta_{\delta} U_*^2 (\omega_0 - \omega_n \omega_*) = M_c, \quad (3)$$

де $\omega_* = \omega/\omega_n$ – кутова швидкість у відносних одиницях.

Після перетворення отримаємо

$$\omega_* = \frac{\omega_0}{\omega_n} - \frac{M_c}{\beta_{\delta} \omega_n U_*^2}. \quad (4)$$

Продуктивність вакуум-насосів із зростанням кутової швидкості змінюється за лінійним законом:

$$Q = 0,98 e D L \omega \varphi_n \eta_m, \quad (5)$$

де e – ексцентриситет, м; D – діаметр статора, м; L – довжина статора, м; ω – кутова швидкість, с^{-1} ; φ_n – коефіцієнт наповнення; η_m – манометричний коефіцієнт:

$$\eta_m = (p_{\bar{o}} - h) / p_{\bar{o}}, \quad (6)$$

де $p_{\bar{o}}$ – атмосферний тиск, Па; h – вакуум, Па.

Тоді

$$Q_* = \omega_*, \quad (7)$$

а закон зміни продуктивності вакуум-насоса при зміні напруги записується у вигляді:

$$Q_* = \frac{\omega_0}{\omega_n} - \frac{M_{cn}}{\beta_o \omega_n U_*^2}. \quad (8)$$

Експериментальні залежності продуктивності і потужності вакуум-насоса від напруги наведені на рис. 1. Встановлено, що продуктивність і потужність вакуум-насоса змінюються нелінійно при зміні напруги.

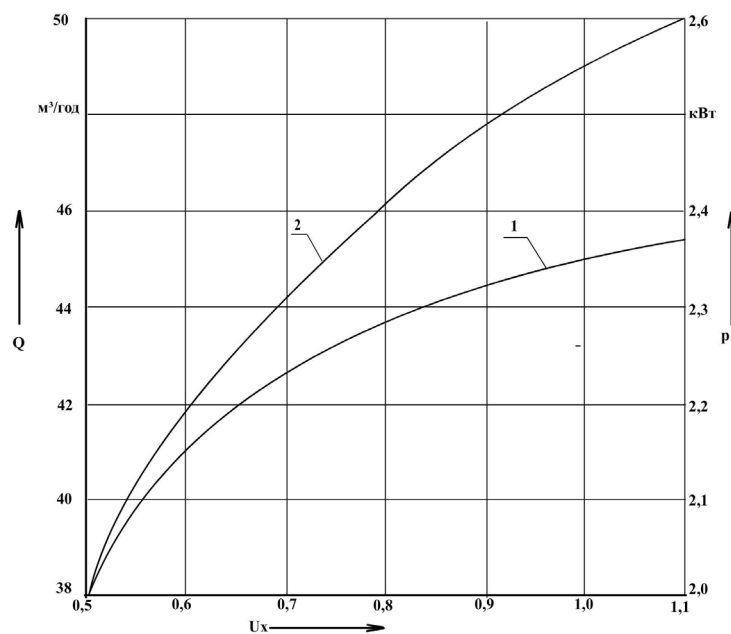


Рис.1. Залежності продуктивності (1) і потужності (2) вакуум-насоса установки УВУ60/45 від напруги при вакуумі 53,32 кПа

При зміні частоти струму механічна характеристика асинхронного електродвигуна на робочій ділянці описується рівнянням:

$$M_o = \beta_o \left(\frac{2\pi f}{p} - \omega \right), \quad (9)$$

де f – частота струму, Гц; p – число пар полюсів.

В усталеному режимі роботи

$$\beta_o \left(\frac{2\pi f}{p} - \omega \right) = M_{cn}, \quad (10)$$

або

$$\beta_o \left(\frac{2\pi f}{p} - \omega_n \omega_* \right) = M_{cn}. \quad (11)$$

Синхронна кутова швидкість електродвигуна при номінальній частоті струму f_H визначається за формулою:

$$\omega_{0H} = \frac{2\pi f_H}{p}. \quad (12)$$

Тоді рівняння (11) запишеться у вигляді:

$$\beta_o (\omega_{0H} f_* - \omega_n \omega_*) = M_{cn}, \quad (13)$$

звідки отримаємо

$$\omega_* = \frac{\omega_{0H}}{\omega_n} f_* - \frac{M_{cn}}{\beta_o \omega_n}. \quad (14)$$

Для двигунів з жорсткою механічною характеристикою $\omega_H \approx \omega_{0H}$, тому другим доданком у виразі (14) можна знехтувати. Тоді отримаємо:

$$f_* \approx \omega_*, \quad (15)$$

а закон зміни продуктивності вакуум-насоса при цьому запишеться у вигляді:

$$Q_* = f_*. \quad (16)$$

Експериментальні залежності продуктивності і потужності вакуум-насоса від частоти струму показані на рис. 2. Як впливає із наведених залежностей, при відхиленні частоти струму продуктивність вакуум-насоса змінюється прямо пропорційно зміні частоти струму, а потужність – нелінійно зростає із підвищенням частоти струму.

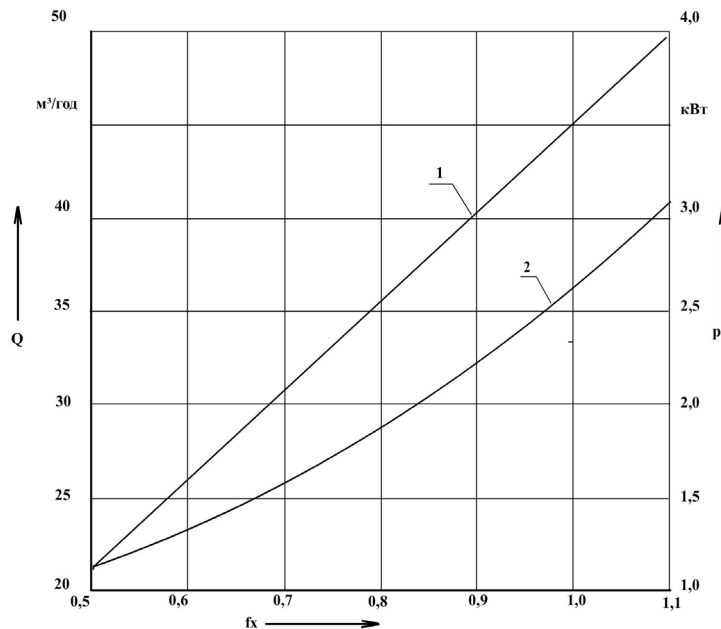


Рис.2. Залежності продуктивності (1) і потужності (2) вакуум-насоса установки УВУ60/45 від частоти струму при вакуумі 53,32 кПа

Висновки

При відхиленні напруги кутова швидкість і продуктивність вакуум-насоса змінюється обернено пропорційно квадрату напруги, а при відхи-

ленні частоти струму – прямо пропорційно частоті струму. Потужність вакуум-насоса залежить нелінійно від напруги і частоти струму.

На основі проведених досліджень встановлено, що при зниженні напруги на 20 % продуктивність вакуум-насосів знижується до 3 %, а при зниженні частоти струму на 2 % – до 2 %.

Список літератури

1. Аванесов В.М. Анализ структуры потерь электрической энергии в электроустановках при отклонении напряжения от оптимального значения / В.М. Аванесов, Е.В. Садков // Энергобезопасность в документах и фактах. – 2005. – №4. – С. 19–21.

2. Електропривод / [Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Савченко П.І. та ін.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: Ліра-К, 2009. – 504 с.

3. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній / [Жулай Є.Л., Зайцев Б.В., Лавріненко Ю.М та ін.]; за ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.

Проведено исследование влияния отклонения напряжения и частоты тока на угловую скорость и технологические характеристики вакуум-насосов. Установлены зависимости производительности и мощности вакуум-насоса от напряжения и частоты тока.

Вакуум-насос, отклонение напряжения, частота тока, электропривод, производительность, мощность.

Studies of voltage deviation and current frequency to the angular speed and technological characteristics of vacuum pumps have been conducted. The dependences of performance and capacity vacuum pump from the voltage and frequencies were established.

Vacuum pump, voltage deviation, frequency, electric drive, performance, power.

УДК 621.313

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

В.С. Федорейко, доктор технічних наук

М.І.Рутило, кандидат технічних наук

І. Б.Луцик, І.С.Іскерський, інженери

***Тернопільський національний педагогічний університет
ім. В.Гнатюка***

Обґрунтовано використання імітаційного моделювання для дослідження швидкісних режимів технологічних процесів. Наведено приклади

ленні частоти струму – прямо пропорційно частоті струму. Потужність вакуум-насоса залежить нелінійно від напруги і частоти струму.

На основі проведених досліджень встановлено, що при зниженні напруги на 20 % продуктивність вакуум-насосів знижується до 3 %, а при зниженні частоти струму на 2 % – до 2 %.

Список літератури

1. Аванесов В.М. Анализ структуры потерь электрической энергии в электроустановках при отклонении напряжения от оптимального значения / В.М. Аванесов, Е.В. Садков // Энергобезопасность в документах и фактах. – 2005. – №4. – С. 19–21.

2. Електропривод / [Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Савченко П.І. та ін.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: Ліра-К, 2009. – 504 с.

3. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / [Жулай Є.Л., Зайцев Б.В., Лавріненко Ю.М та ін.]; за ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.

Проведено исследование влияния отклонения напряжения и частоты тока на угловую скорость и технологические характеристики вакуум-насосов. Установлены зависимости производительности и мощности вакуум-насоса от напряжения и частоты тока.

Вакуум-насос, отклонение напряжения, частота тока, электропривод, производительность, мощность.

Studies of voltage deviation and current frequency to the angular speed and technological characteristics of vacuum pumps have been conducted. The dependences of performance and capacity vacuum pump from the voltage and frequencies were established.

Vacuum pump, voltage deviation, frequency, electric drive, performance, power.

УДК 621.313

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

В.С. Федорейко, доктор технічних наук

М.І.Рутило, кандидат технічних наук

І. Б.Луцик, І.С.Іскерський, інженери

***Тернопільський національний педагогічний університет
ім. В.Гнатюка***

Обґрунтовано використання імітаційного моделювання для дослідження швидкісних режимів технологічних процесів. Наведено приклади

розробки імітаційних моделей систем активного вентилявання та системи зв'язного дозування компонентів твердого біопалива, що виконані засобами Simulink пакета MatLAB і вказано особливості їх реалізації.

Імітаційне моделювання, електропривод, система керування, технологічний процес, активне вентилявання, зв'язне дозування, Simulink.

Зростання цін на енергоносії та обмежені можливості збільшення потужностей енергогенеруючих установок обумовили загострення проблеми раціоналізації енергоспоживання. Тому особливої актуальності набуває енергозбереження як найбільш дешевий і безпечний спосіб збільшення енергогенеруючих потужностей, адже відомо, що витрати на економію 1 кВт потужності в 4 – 5 разів дешевше, ніж вартість 1 кВт нововведеної потужності [1].

Аналіз проблеми управління технологічними процесами свідчить про те, що для реалізації енергоощадних швидкісних режимів роботи необхідно визначити оптимальну потужність електропривода, який зміг би забезпечити необхідну продуктивність процесу залежно від його параметрів [5].

Для дослідження та оцінки ефективності швидкісних режимів технологічних процесів, діапазон яких залежить від впливу випадкових

факторів, доцільним є використання імітаційного моделювання, яке забезпечує формальний опис логіки функціонування досліджуваного об'єкта і взаємодії окремих його складових в часі із врахуванням найістотніших причинно-наслідкових зв'язків.

Мета досліджень – визначення раціональних швидкісних режимів електропривода технологічного обладнання засобами імітаційного моделювання, що дасть змогу підвищити енергоефективність електро-технологічних комплексів.

Матеріали та методика досліджень. Основними шляхами забезпечення раціональних швидкісних режимів роботи асинхронних електроприводів є [1]:

1) зниження втрат енергії при виконанні електроприводом технологічних операцій за заданими тахограмами для тривалих режимів з повільно змінним навантаженням;

2) зміна технологічного процесу на основі переходу до досконаліших способів регулювання електропривода і параметрів цього технологічного процесу.

Реалізовувати ці завдання доцільно на основі комплексного підходу до розв'язку задач удосконалення алгоритмів керування електроприводом, методики вибору потужності двигуна, а також використання спеціальних програмно-технічних засобів, що забезпечують мінімізацію втрат енергії в електроприводі.

Основним інструментом, що забезпечує процес дослідження для вирішення вказаних проблем у комплексі є імітаційне моделювання, яке, на відміну від аналітичного способу, не вимагає однозначності обчислю-

вальної процедури для отримання точного рішення рівнянь. Імітаційний підхід дозволяє відтворити алгоритм функціонування досліджуваного об'єкта в часі при різноманітних поєднаннях значень параметрів системи і зовнішнього середовища. Це є особливо важливим у ході аналізу функціонування технологічних процесів, де відбувається взаємозв'язок біологічних та технічних параметрів.

Результати досліджень. Розробка імітаційних моделей раціональних режимів роботи електропривода потребує ідентифікації стану об'єкта та відповідної адаптації параметрів системи керування з врахуванням вимог щодо інваріантності та робастності електромеханічних систем відносно параметричних і силових збурень [5].

Такі моделі повинні визначатися повнотою, яка оцінюється можливістю різнобічного описання об'єкта, ієрархічністю, тобто здатністю до послідовного, алгоритмічного визначення закономірностей та особливостей його поведінки; комплектністю; високою продуктивністю та надійністю. Крім того, оскільки важливим є оцінка поведінки досліджуваного процесу в тій або іншій ситуації, необхідним є візуальне представлення поточних параметрів з можливістю їх корекції, не очікуючи закінчення поточного модельного експерименту. Реалізація цього можлива, зокрема, засобами інструментарію Simulink, який інтегрований у середовище Matlab.

Оскільки головною задачею для підвищення енергоефективності технологічного процесу є розрахунок раціональних швидкісних режимів електропривода, визначальною підсистемою імітаційної моделі електротехнологічного комплексу повинен бути модуль, який містить блоки частотного перетворювача та асинхронного двигуна (рис. 1).

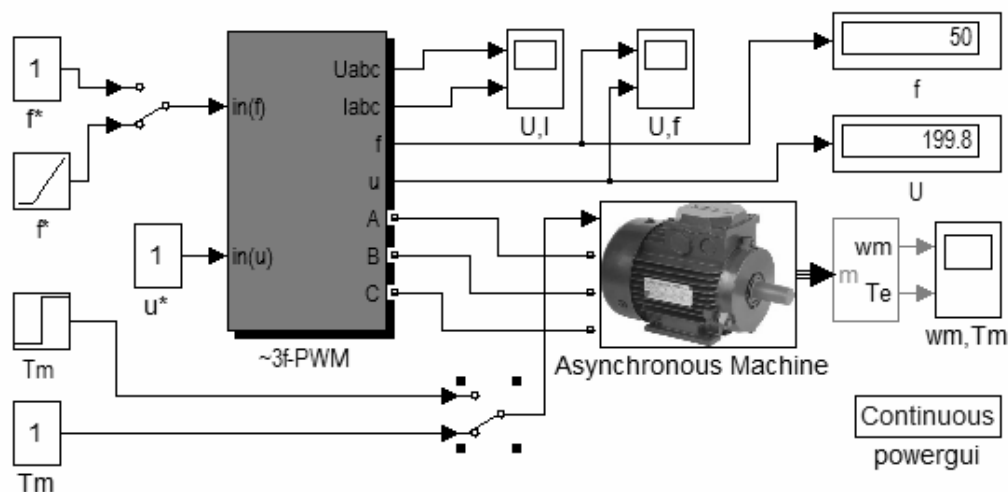


Рис. 1. Імітаційна модель частотно-регульованого електропривода

Проте стандартні блоки, які містяться в бібліотеці Simulink, як правило, не дозволяють реалізувати повністю процеси, що відбуваються у вищезазначених модулях, а потребують адаптації до певного типу двигуна та особливостей технологічного процесу. Крім того, системи регулювання швидкості, створені на основі паспортних даних двигунів і з жорсткою структурою регулятора, на практиці проявляють нестійкість у роботі, пе-

Покращити якість регулювання системи, її енергоефективність, можна шляхом застосування адаптивних способів керування, а також методів нечіткої логіки для аналізу змін параметрів системи [3]. Алгоритм формування керуючого впливу, що здійснюється згідно з адаптивним способом частотного керування асинхронним двигуном реалізовується відповідним модулем *CalcBlock* (рис.2), що входить в імітаційну модель частотного перетворювача.

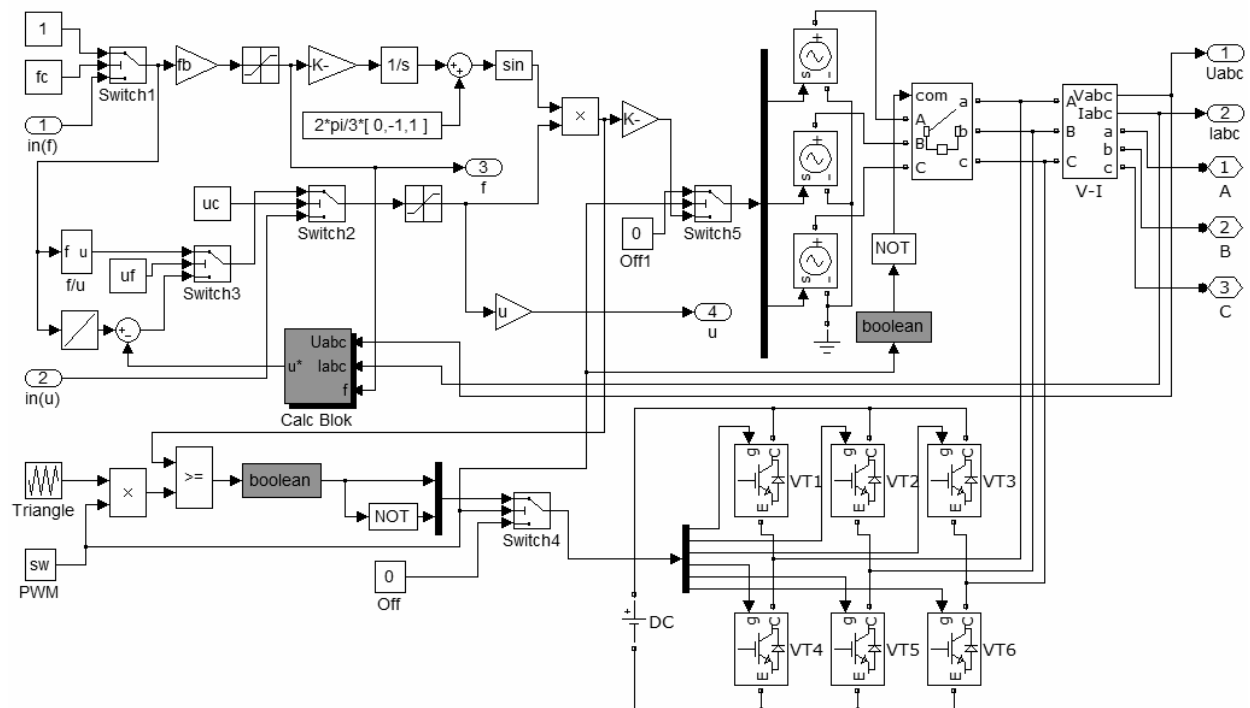


Рис.2 . Імітаційна модель частотного перетворювача

Під'єднання моделі частотно-регульованого електропривода до підсистем, що відтворюють функціональні залежності, які характеризують інші об'єкти, що входять в електротехнологічний комплекс та процеси взаємовпливу їх параметрів дозволяє наблизити розроблену систему до реальних умов функціонування і дає можливість стосовно цього оцінити її характеристики.

Прикладом цього є система визначення швидкісних режимів активного вентилявання зерна. Розроблена імітаційна модель (рис.3) відтворює алгоритм розрахунку швидкісних режимів, згідно з яким, залежно від необхідного режиму вентилявання, визначають диференційовані діапазони продуктивності вентилятора [2].

У моделі проводиться обробка інформації про значення температури, вологості зерна і повітря та показника зараженості зерна з певною дискретністю у часі. Також за допомогою окремих підсистем визначають рівноважну вологість зерна та вибирають режим вентилявання згідно зі значеннями детекторів зараженості та самозігрівання, на основі якого

встановлюється необхідна продуктивність вентилятора із врахуванням втрат напору, що відбувається через опір зернового шару.

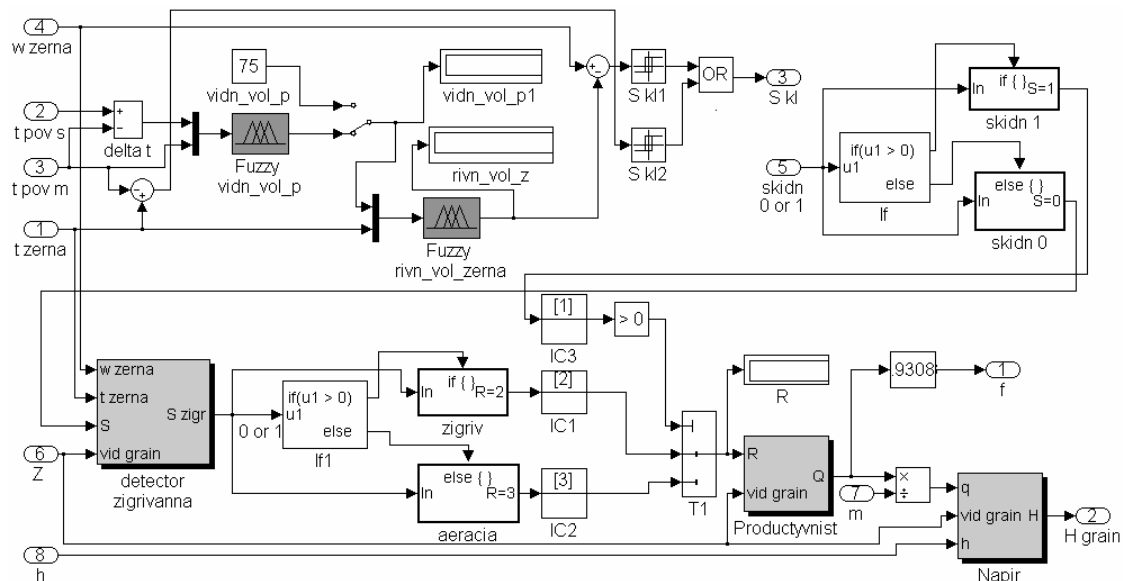


Рис. 3. Імітаційна модель визначення швидкісних режимів вентилявання

Оскільки подача повітря вентилятора функціонально залежить від стохастичних процесів, що перебігають у зерновому насипі та у навколишньому середовищі, то реалізовувати схему керування нею найдоцільніше методами інтелектуального пошуку даних. Формування системи здійснено за каскадним методом із застосуванням контролера та адаптивних нейронечітких систем.

Таким чином, розроблена імітаційна модель визначення швидкісних режимів активного вентилявання дозволяє проаналізувати встановлені залежності продуктивності вентилятора від стохастичних змін, що відбуваються в зерновому насипі, а також оптимізувати алгоритми системи керування для забезпечення енергоощадності технологічного процесу.

На відміну від процесу активного вентилявання, де необхідно враховувати цілу низку факторів, проте зміни визначальних характеристик є доволі інертними, у системах зв'язного дозування лінії брикетування двокомпонентного твердого біопалива основними технологічними параметрами є лише продуктивність дозаторів та вологість компонентів. Але у цьому випадку важливим є узгодженість функціонування дозаторів та шнека, що потребує відслідковування у динаміці зміни швидкісних режимів їх електроприводів (рис.4) [4].

У запропонованій структурі імітаційної моделі інтелектуальної системи керування (див. рис. 4) продуктивність шнека-дозатора задається, виходячи із величини струму статора асинхронного двигуна підпресовувального шнека і, в свою чергу, визначає сумарну продуктивність дозаторів, що дозволяє у широкому діапазоні регулювати склад суміші і тим самим вирішувати питання надлишкової вологості соломи та зменшення зольності кінцевого продукту.

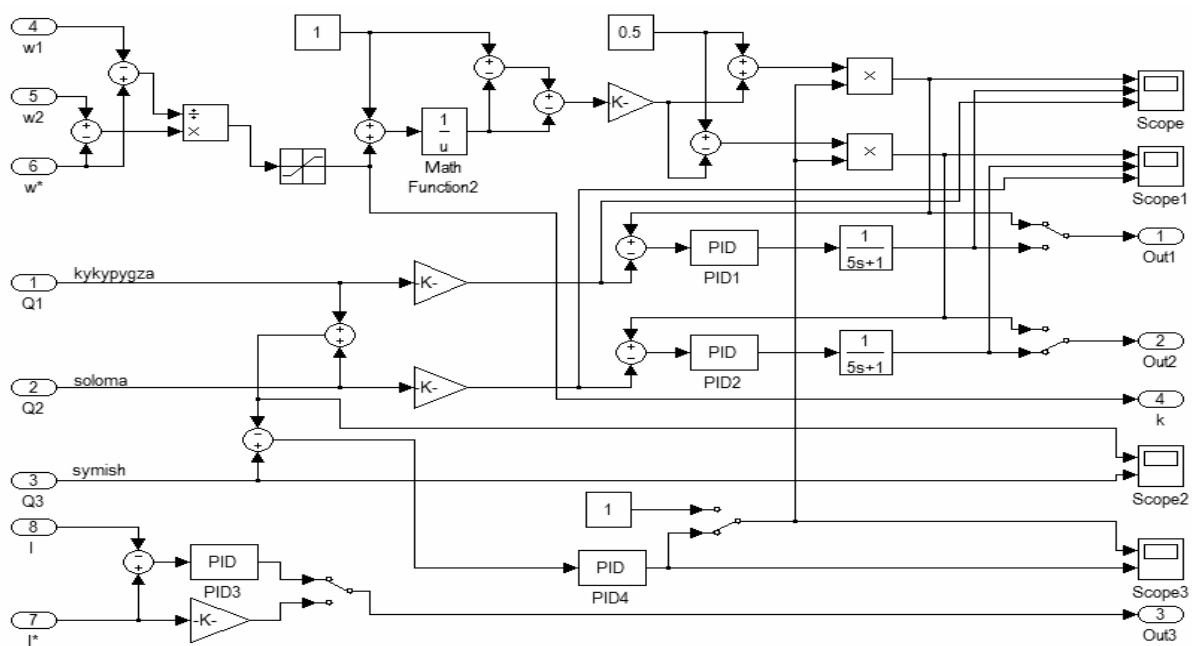


Рис. 4. Імітаційна модель задання швидкісних режимів дозаторів

Висновки

Для забезпечення енергоощадності електротехнологічних комплексів необхідно проводити комплексний аналіз усього технологічного процесу з метою виявлення чинників, які впливають на зростання енерговитрат. Ефективним засобом дослідження у цьому випадку є імітаційне моделювання.

Розроблено модуль частотно-регульованого електропривода, який базується на адаптивному способі керування. Імплементация цієї підсистеми в імітаційній моделі електротехнологічних комплексів із врахуванням специфіки їх функціонування дозволяє динамічно відслідковувати визначальні характеристики з метою визначення раціональних швидкісних режимів електроприводів виконуючих механізмів.

Спроековано імітаційну модель розрахунку швидкісних режимів активного вентилявання зерна, що реалізуються з використанням системи керування, функціонування якої базується на нейроінформаційних технологіях. Апробація визначених режимів виявила, що тривалість вентилявання зерна може бути зменшена на 15–50 % залежно від метеорологічних умов та виду зернової культури, а енерговитрати знижені на 30 %.

Розроблено імітаційну модель інтелектуальної системи керування зв'язним дозуванням компонентів біопалива, середньоквадратична похибка функціонування якого не перевищує 0,2 %. Час встановлення заданої вологості на виході змішувача, враховуючи чисте запізнювання для розробленої системи, не перевищує 10 с, а перерегулювання – 2,5 %.

Список літератури

1. Браславський І.Я. Енергозберігаючий асинхронний електропривод: учб. посібник / Браславський І.Я., Ішматов З.Ш., Поляков В.Н.; під ред. І. Я. Браславського. – М.: ВЦ «Академія», 2004. – 256 с.
2. Луцик І. Б. Вплив швидкісних режимів установок активного вентиля-

вання на біологічні процеси в зерновому насипі / І. Б. Луцик // Науковий вісник НУБіП України. – 2013. – Вип. 184. – С. 246–251.

3. Пат. 68806 Україна, МПК H02P 1/26 (2006.01). Спосіб адаптивного частотного керування асинхронним двигуном / Федорейко В. С., Рутило М. І., Петрикович Ю. Я., Луцик І. Б., Іскерський І. С.; заявник і патентовласник Тернопільський нац. пед. ун-т ім. Володимира Гнатюка; заявл. 06.10.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.

4. Система керування процесом виробництва двокомпонентного твердого біопалива / В. С. Федорейко, І. С. Іскерський, М. І. Рутило, В. З. Чорний // Науковий вісник НУБіП України. – 2012. – Вип. 174, ч. 2. – С. 93–98.

5. Федорейко В. С. Адаптивне частотне керування асинхронним електроприводом вентиляційних установок / В. С. Федорейко, І. Б. Луцик, М. І. Рутило // Науковий вісник НУБіП України. – 2011. – Вип. 166, ч.4. – С. 89 – 94.

Обосновано использование имитационного моделирования для исследования скоростных режимов технологических процессов. Приведены примеры разработки имитационных моделей системы активного вентилирования и системы связанного дозирования компонентов твердого биотоплива, выполненных средствами Simulink пакета MatLAB и указано особенности их реализации.

Имитационное моделирование, электропривод, система управления, технологический процесс, активное вентилирование, связанное дозирование, Simulink.

The expediency of use of simulation modelling to study the speed modes processes is proved. The examples of the created of simulation models the system of active ventilation and the system of two-component dispensing of biofuels, which are implemented by means of Simulink environment MatLAB are illustrated. Indicated the especially of their implementation.

Simulation modeling, electrical drive, control system, technological processes, active ventilation, coherent dosage, Simulink.

УДК 621. 3. 066. 5

ВИКОРИСТАННЯ ЕКОЛОГІЧНО-БЕЗПЕЧНИХ І ЕРОЗІЄСТІЙКИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ КОНТАКТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

І. П. Радько, кандидат технічних наук

Наведено результати досліджень використання в контакт-деталях на основі срібла малотоксичної добавки оксиду олова замість токсичного оксиду кадмію, який належить до першої групи токсичності.

Контакт-деталі, комутаційні апарати, плазма, електрична дуга, енергія, електрична ерозія.

© І.П. Радько, 2013

вання на біологічні процеси в зерновому насипі / І. Б. Луцик // Науковий вісник НУБіП України. – 2013. – Вип. 184. – С. 246–251.

3. Пат. 68806 Україна, МПК H02P 1/26 (2006.01). Спосіб адаптивного частотного керування асинхронним двигуном / Федорейко В. С., Рутило М. І., Петрикович Ю. Я., Луцик І. Б., Іскерський І. С.; заявник і патентовласник Тернопільський нац. пед. ун-т ім. Володимира Гнатюка; заявл. 06.10.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.

4. Система керування процесом виробництва двокомпонентного твердого біопалива / В. С. Федорейко, І. С. Іскерський, М. І. Рутило, В. З. Чорний // Науковий вісник НУБіП України. – 2012. – Вип. 174, ч. 2. – С. 93–98.

5. Федорейко В. С. Адаптивне частотне керування асинхронним електроприводом вентиляційних установок / В. С. Федорейко, І. Б. Луцик, М. І. Рутило // Науковий вісник НУБіП України. – 2011. – Вип. 166, ч.4. – С. 89 – 94.

Обосновано использование имитационного моделирования для исследования скоростных режимов технологических процессов. Приведены примеры разработки имитационных моделей системы активного вентилирования и системы связанного дозирования компонентов твердого биотоплива, выполненных средствами Simulink пакета MatLAB и указано особенности их реализации.

Имитационное моделирование, электропривод, система управления, технологический процесс, активное вентилирование, связанное дозирование, Simulink.

The expediency of use of simulation modelling to study the speed modes processes is proved. The examples of the created of simulation models the system of active ventilation and the system of two-component dispensing of biofuels, which are implemented by means of Simulink environment MatLAB are illustrated. Indicated the especially of their implementation.

Simulation modeling, electrical drive, control system, technological processes, active ventilation, coherent dosage, Simulink.

УДК 621. 3. 066. 5

ВИКОРИСТАННЯ ЕКОЛОГІЧНО-БЕЗПЕЧНИХ І ЕРОЗІЄСТІЙКИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ КОНТАКТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

І. П. Радько, кандидат технічних наук

Наведено результати досліджень використання в контакт-деталях на основі срібла малотоксичної добавки оксиду олова замість токсичного оксиду кадмію, який належить до першої групи токсичності.

Контакт-деталі, комутаційні апарати, плазма, електрична дуга, енергія, електрична ерозія.

© І.П. Радько, 2013

Методи відновлення контакт-деталей електричних апаратів, що застосовувалися раніше не враховували особливостей формування і будови плазмових покриттів. Тому, актуальною є проблема вдосконалення ремонту комутаційних апаратів, що експлуатуються в аграрному виробництві, та забезпечення екологічно-безпечної їх експлуатації.

Мета досліджень – підвищення екологічної ефективності та експлуатаційної надійності комутаційних апаратів, використовуючи при їх ремонті екологічно-безпечні та ерозієстійкі композиційні контактні матеріали.

Матеріали та методика досліджень. Електромеханічні апарати з контактними комутаційними елементами становлять 90 % ринку комутаційних апаратів завдяки вагомим перевагам над апаратами з напівпровідниковими комутаційними елементами (глибина комутації, перевантажувальна здатність, малі втрати енергії, стійкість до коротких замикань).

Одним із розповсюджених видів комутаційних апаратів є контактори та пускачі, особливістю роботи яких є велика частота комутацій – до 1200 комутацій за годину.

У магнітних пускачах типу ПМЕ, ПМА, ПМЛ, ПМ-12 застосовуються металокерамічні контакти марки КМК-А10м, які в своєму складі містять оксид кадмію (CdO), завдяки якому суттєво підвищується зносостійкість контактів.

При цьому слід враховувати, що оксид кадмію, який є токсичним інгредієнтом, під дією електричної дуги, що виникає у міжконтактному проміжку електричного апарата, вже при температурі $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ розкладається на кадмій і кисень, а при температурі $1559\text{ }^{\circ}\text{C}$ сублимує і потрапляє в навколишнє середовище [3].

Відповідно до державних санітарних правил та норм України кадмій та його сполуки належать до 1-го класу токсичнонебезпечних речовин [2].

У цьому ж документі зазначається, що оксид кадмію може негативно впливати на бронхо-легеневу систему, шкіру та підшкірну клітковину, нервову систему, обмін речовин, кровотворну систему.

Згідно з міждержавним стандартом [4], який нормує загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони середньозмінна гранично допустима концентрація кадмію та його сполук встановлена на рівні $0,01\text{ мг/м}^3$ що лише у два рази перевищує граничну допустиму концентрацію таких речовин, як свинець та ртуть, токсичність яких є загальновідомою.

Програма Організації Об'єднаних Націй з охорони навколишнього середовища, яка регулює використання хімічних речовин, зобов'язує уряди країн вжити заходи щодо зменшення ризиків для здоров'я людей та довкілля.

У лютому 2009 року на 25-й сесії Ради директорів цієї Програми та Глобальному форумі з Навколишнього середовища на рівні міністрів [6] був прийнятий стратегічний підхід до міжнародного регулювання хімічних речовин, таких як ртуть, свинець і кадмій.

Таким чином, проблема заміни оксиду кадмію в комутаційних апаратах на матеріали, які не є токсичними, безумовно є актуальною для України.

Численні дослідження [1] науковців у різних країнах показали можливість застосування в електричних контактах замість оксиду кадмію ок-

сидів інших металів, серед яких особливу увагу дослідників привертає оксид олова.

Композиції срібла з кількістю оксиду олова (SnO_2) 8,10,12 % маси в останні роки все ширше застосовують як контактні матеріали для низьковольтних комутаційних апаратів.

Оксид олова – нетоксичний, підвищує твердість композиційного матеріалу порівняно з контактами типу КМК-А10м за рахунок розташування дрібних частинок SnO_2 у середині зерен срібла.

Термодинамічні властивості оксиду олова набагато кращі, ніж оксиду кадмію. Так, температура плавлення SnO_2 1900 °С, при якій SnO_2 не розкладається на олово і кисень. Зона плавлення робочої поверхні дугою невелика, оскільки температура кипіння SnO_2 становить 2273 °С.

Металопереробний завод INMET Інституту кольорових металів у Глівіце (Польща) виготовляє контактний матеріал срібло-оксид олова, де токсичний оксид кадмію замінено екологічно безпечним оксидом олова [7]. Проте робоча поверхня контактів такого матеріалу зазнає значного окислення при довготривалому проходженні струму. Окислення поверхні призводить до перегріву матеріалу та значного підвищення перехідного опору, що знижує надійність та термін служби апаратів.

На кафедрі електричних машин та експлуатації електричного обладнання НУБіП України розроблено нові типи екологічно безпечних матеріалів з підвищеною зносостійкістю, на які отримано патенти України.

Розроблено екологічно безпечний та ерозієстійкий композиційний контактний матеріал з такими інгредієнтами : 82 %мас Ag + 11,5мас SnO_2 + 4 %мас In_2O_3 + 2 %мас Zn + 0,5 %мас WO_3 [5].

При комутації струму та довготривалому його проходженні через замкнені контакти на робочій поверхні утворюється термостійкий шар SnO_2 з високим питомим опором ($\rho=4 \cdot 10^4$ Ом·м), що призводить до перегрівання та зниження їх електроерозійної стійкості. Запобігання утворенню термостабільного шару забезпечує введення оксиду вольфраму (WO_3) в кількості 0,5 %мас. Розплавлені частинки WO_3 ($T_{\text{плавл.}}=1470$ °С) обволікають тверді частинки SnO_2 і утворюють волокнистість розплавленого срібла, де волокнами є частинки SnO_2 , покриті частинками WO_3 .

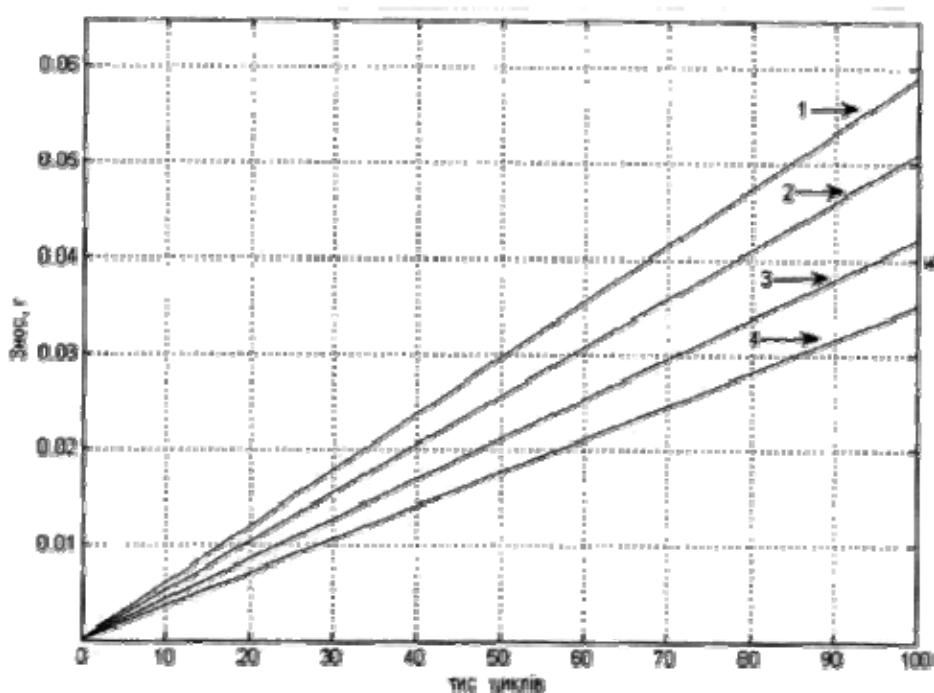
Частинки SnO_2 , які не покриті оксидом вольфраму, виштовхуються наверх розплавленим сріблом, де на робочій поверхні створюється термостабільний шар оксиду олова з високим опором протікання струму.

Введення оксиду індію (In_2O_3) дозволяє рівномірно розподіляти дрібнозернисті оксиди олова в срібній матриці і прискорювати дифузію олова в срібну матрицю при виготовленні контактного матеріалу.

Введення цирконію (Zr) підвищує електроерозійну стійкість контактів за рахунок поглинання кисню із розплавленого срібла при дії електричної дуги, що призводить до зменшення часу горіння дуги та розбризкування рідкого срібла.

На рисунку показано графіки електричної ерозії серійних і дослідних зразків контакт-деталей магнітного пускача ПМЛ-3121 04Б залежно від числа циклів комутацій і кількості інгредієнтів.

Комутація струму становила 40 А, напруга 380 В у категорії застосування АС-3.



Графіки електричної ерозії серійних і дослідних зразків контакт-деталей магнітного пускача ПМЛ-3121 04Б:

- 1 – серійні контакт-деталі КМК-А10мд; 2 – дослідний зразок $\text{Ag}-11,5\% \text{мас SnO}_2$;
 3 – дослідний зразок $\text{Ag}-11,5\% \text{мас SnO}_2-4\% \text{мас In}_2\text{O}_3-0,5\% \text{мас WO}_3$;
 4 – дослідний зразок $\text{Ag}-11,5\% \text{мас SnO}_2-4\% \text{мас In}_2\text{O}_3-2\% \text{мас Zn}-0,5\% \text{мас WO}_3$

Як видно із графіка електрична ерозія контактів зростає лінійно, залежно від кількості циклів комутації.

Знос серійних контактів типу КМК-А10м за $1 \cdot 10^5$ циклів комутації дорівнює 30 мг.

Знос дослідного зразка $\text{Ag}+11,5\% \text{мас}$ становить 25 мг, низька електроерозійна стійкість залежить від високого опору між контакт-деталлями і їх перегрівання.

Знос дослідного зразка $\text{Ag}+11,5\% \text{мас SnO}_2+4\% \text{мас In}_2\text{O}_3+0,5\% \text{мас WO}_3$ становить 18 мг.

Висока електроерозійна стійкість досягається за рахунок введення оксиду вольфраму, що покриває частинки SnO_2 і створює волокнистість розплавленого срібла. Також введення оксиду індію дозволяє рівномірно розподілити дрібнозернисті оксиди олова в срібній матриці.

Знос дослідного зразка $\text{Ag}+11,5\% \text{мас SnO}_2+4\% \text{мас In}_2\text{O}_3+2\% \text{мас Zr}+0,5\% \text{мас WO}_3$ - 35 мг.

Підвищення електроерозійної стійкості досягається за рахунок введення цирконію. Цирконій поглинає кисень із розплавленого срібла при дії електричної дуги, що призводить до зменшення часу горіння дуги та розбризкування рідкого срібла.

Відновлення спрацьованих поверхонь контакт-деталей новими композиційними матеріалами, які підтверджені патентами України №18931, 47346, 49215 та 93778 дозволило підвищити електроерозійну стійкість в 1,6 – 2,0 рази в порівнянні із серійними типу КМК-А10м.

Результати досліджень. Використання в матеріалі контакт-деталей на основі срібла малотоксичної добавки оксиду олова замість токсичного оксиду кадмію, що належить до першої групи токсичності, значно підвищує рівень екологічної чистоти матеріалу, а сумісне введення у композитний матеріал таких малотоксичних інгредієнтів як оксиди олова та індію, вольфраму та металу цирконію значно підвищує електроерозійну стійкість, надійність контактування та суттєво зменшує силу приварювання контактів.

Висновки

Структура руйнування поверхні композиційних матеріалів тісно пов'язана з природою компонентів матеріалів. Оптимальна структура матеріалу розривних контактів повинна відповідати типу матричних структур – електропровідна матриця на основі срібла з ізольованими частинками оксидів і тугоплавких металів.

Відсутність взаємодії інгредієнтів із срібною матрицею дозволяє використовувати властивості кожного з них для підвищення електроерозійної стійкості контактів. Тому електрична дуга переміщується з одного окремо розташованого тугоплавкого включення оксиду олова на інше, внаслідок чого відбувається дисипація енергії дуги і зменшується кількість теплової енергії, яка поглинається матеріалом контактів.

Список літератури

1. Афонин М.П. Классификация материалов для электрических контактов низковольтной коммутационной аппаратуры и области их применения в электротехнике / М.П. Афонин, М.Н. Овчинникова. // Электрические контакты и электроды: тр. Ин-та материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. – К., 2006. – С.153–160.
2. Державні санітарні правила та норми України. № 2.2.7. 029-99. – Дод. 2, п.22. – К.: Міністерство охорони здоров'я, 2004. – 8 с.
3. Мастеров В.А. Серебро, сплавы и биметаллы на его основе: справ. / В.А. Мастеров, Ю.В. Саксонов. – М.: Металлургия, 1979. – 296 с.
4. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны: ГОСТ 12.1.005-88. – [Введен 89-01-01]. – М.: Стандартиформ, 2006. – 48 с.
5. Пат. на корисну модель 18931 Україна МПК В22F 1/00, С22С 1/04 Спечений матеріал для електричних контакт-деталей / Коханівський С.П., Коробенко П.В., Власенко Ю.П., Радько І.П.; заявник і власник Національний аграрний університет. – № u200606938; заявл. 21.06.06; опубл. 15.11.2006; Бюл. № 11/2006.
6. Программа организации Объединенных Наций по окружающей среде: Доклад Совета управляющих Глобального форума по окружающей среде на уровне министров о работе его двадцать пятой сессии (Найроби, 16-20 февраля 2009 года).
7. <http://www.inmet.gliwice.pl>.

Представлены результаты исследований использования в контакт-деталях на основе серебра малотоксичной добавки оксида олова вместо токсичного оксида кадмия, который относится к первой группе токсичности.

Контакт-детали, коммутационные аппараты, плазма, электрическая дуга, энергия, электрическая эрозия.

The presented results of researches of the use are in pin details on the basis of silver, low-toxic addition of oxide of tin instead of toxic oxide of cadmium, that belongs to the first group of toxicity.

Pin –details, commutation apparatus, plasma, voltaic arc, energy, electrical erosion.

УДК 536.2.536.7

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ РУЙНУВАННЯ (ПОДРІБНЕННЯ) ЧАСТОЧОК РІЗНОЇ ФОРМИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО АПАРАТА (РПА)

***В.Г. Горобець, доктор технічних наук
Д.В. Гескін, аспірант****

Обґрунтовано умови, що забезпечують подрібнення частинок матеріалу до відповідних розмірів. Отримано методичку, яка дозволяє оцінити витрати енергії на дезагрегацію дисперсних матеріалів. З'ясовано механізм дії робочих органів РПА на матеріал, що подрібнюється, і на підставі цього визначено умови гарантованого руйнування частинок різної форми.

Подрібнення, роторно – пульсаційний апарат, кавітація.

Подрібнення – один із найбільш давно відомих людині процесів. Однак, незважаючи на це, його теоретичні основи досі зазнають змін і ще до кінця не сформовані, що ускладнює розрахунок енерговитрат на його здійснення. Оскільки зазначений процес є енергоємним, то встановлення залежності між розмірами подрібнюваних і подрібнених частинок, а також витраченої на їх отримання енергії є актуальним завданням.

Мета досліджень – обґрунтування умов, що забезпечують гарантоване подрібнення частинок різної форми при взаємодії з робочими органами роторно-пульсаційного апарата та знаходження залежностей для оцінки енерговитрат при отриманні гомогенних сумішей.

Матеріали та методика досліджень. У різних галузях промисловості і, зокрема, в хімічній технології, існує велика потреба в тонкоподрібне-

* Науковий керівник – доктор технічних наук В.Г. Горобець

© В.Г. Горобець, Д.В. Гескін, 2013

Представлены результаты исследований использования в контакт-деталях на основе серебра малотоксичной добавки оксида олова вместо токсичного оксида кадмия, который относится к первой группе токсичности.

Контакт-детали, коммутационные аппараты, плазма, электрическая дуга, энергия, электрическая эрозия.

The presented results of researches of the use are in pin details on the basis of silver, low-toxic addition of oxide of tin instead of toxic oxide of cadmium, that belongs to the first group of toxicity.

Pin –details, commutation apparatus, plasma, voltaic arc, energy, electrical erosion.

УДК 536.2.536.7

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ РУЙНУВАННЯ (ПОДРІБНЕННЯ) ЧАСТОЧОК РІЗНОЇ ФОРМИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО АПАРАТА (РПА)

***В.Г. Горобець, доктор технічних наук
Д.В. Гескін, аспірант****

Обґрунтовано умови, що забезпечують подрібнення частинок матеріалу до відповідних розмірів. Отримано методичку, яка дозволяє оцінити витрати енергії на дезагрегацію дисперсних матеріалів. З'ясовано механізм дії робочих органів РПА на матеріал, що подрібнюється, і на підставі цього визначено умови гарантованого руйнування частинок різної форми.

Подрібнення, роторно – пульсаційний апарат, кавітація.

Подрібнення – один із найбільш давно відомих людині процесів. Однак, незважаючи на це, його теоретичні основи досі зазнають змін і ще до кінця не сформовані, що ускладнює розрахунок енерговитрат на його здійснення. Оскільки зазначений процес є енергоємним, то встановлення залежності між розмірами подрібнюваних і подрібнених частинок, а також витраченої на їх отримання енергії є актуальним завданням.

Мета досліджень – обґрунтування умов, що забезпечують гарантоване подрібнення частинок різної форми при взаємодії з робочими органами роторно-пульсаційного апарата та знаходження залежностей для оцінки енерговитрат при отриманні гомогенних сумішей.

Матеріали та методика досліджень. У різних галузях промисловості і, зокрема, в хімічній технології, існує велика потреба в тонкоподрібне-

* Науковий керівник – доктор технічних наук В.Г. Горобець

© В.Г. Горобець, Д.В. Гескін, 2013

них матеріалах. При цьому подрібнення може грати як основну, так і допоміжну роль (наприклад, для інтенсифікації масообмінних процесів).

З ряду причин процес подрібнення доцільніше проводити в рідкій фазі. У цьому випадку відсутнє пилоутворення, яке істотно погіршує умови праці, а також під дією рідини, що змочується, в певній мірі знижується міцність подрібнюваного матеріалу, що дозволяє отримувати більш дрібні частинки із меншими витратами енергії. Як показує практика, при такій організації процесу найкращі результати досягаються в подрібнювачах, у яких до малого обсягу середовища, що обробляється, підводиться велика кількість енергії.

До такого обладнання належать апарати роторно–пульсаційного типу (РПА). Однак, незважаючи на численні роботи, присвячені обробці різних середовищ у РПА, процес подрібнення дисперсної твердої фази в такому обладнанні досліджений недостатньо повно. Ці роботи присвячені в основному аналізу гранулометричного складу оброблюваних частинок, у той час як за розрахунків енергії, що витрачається на подрібнення в апаратах такого типу, інформація практично відсутня.

Результати досліджень. Процес подрібнення матеріалів досить точно описується теорією П. Ріттингера, згідно з якою витрата енергії пропорційна площі новоствореної поверхні. З іншого боку відомо, що будь-яка зміна розмірів часток, у тому числі і подрібнення, призводить до зміни вільної (поверхневої) енергії системи $E_{\text{пов}}$ відповідно до рівняння У. Томсона:

$$\Delta E = 2\sigma V \left(\frac{1}{r_k} - \frac{1}{r_n} \right), \quad (1)$$

де σ – поверхневий натяг матеріалу що подрібнюється, на межі поділу з навколишнім середовищем, Дж/м²; V – об'єм подрібнюваного матеріалу, м³; r_k, r_n – кінцевий та початковий радіуси частинки чи агрегату.

У той же час, тільки частина енергії, що підводиться, $E_{\text{зовн}}$ витрачається безпосередньо на подрібнення. Припускаючи, що деяка частина енергії витрачається на збільшення поверхневої енергії подрібнених частинок із урахуванням щільності і маси матеріалу, що подрібнюється, рівняння (1) може бути подано у вигляді:

$$\frac{i\sigma}{3\rho_{TB}} (S_{\text{пит.к}} - S_{\text{пит.поч}}) = \frac{E_{\text{зовн}}\eta}{m_{\text{мс}}} = \varepsilon, \quad (2)$$

де i – ступінь подрібнення; ρ_{TB} – густина матеріалу, що подрібнюється, Кг/м³; $S_{\text{пит.к}}, S_{\text{пит.поч}}$ – відповідно кінцева та початкова питома площа поверхні, м²/м³; η – ККД. подрібнювача; $m_{\text{мс}}$ – маса матеріалу, що подрібнюється, кг.

Отримане рівняння (2) зручно для прикладних розрахунків, з його допомогою можна визначати витрати енергії на подрібнення дисперсного матеріалу. При обробці суспензій в апаратах роторно–пульсаційного типу виникає потреба в оцінці можливості гарантованого подрібнення частинок визначеної форми. Як приклад розглянемо подрібнення частинки у формі паралелепіпеда. На рисунку показана схема руйнування таких частинок у робочих органах РПА.

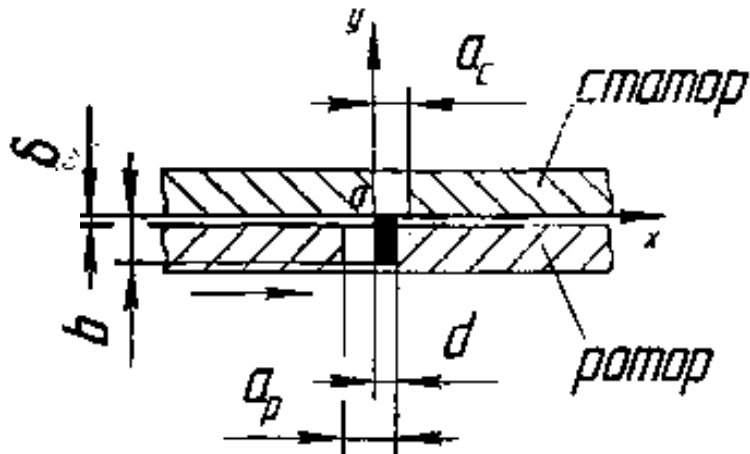


Схема руйнування частинок у формі паралелепіпеда

У зазначеному положенні “проскакування” частинок наймовірніше, оскільки вони знаходяться ближче, ніж інші до каналу статора. Частинки оброблюваного матеріалу можуть опинитися там завдяки транзитній течії в зазорі між ротором та статором, яка завжди має місце в апаратах такого типу.

Частинки, які не встигли зайняти зазначене положення внаслідок великої довжини каналу ротора, можуть опинитися в ньому при відкритті наступного каналу в напрямку обертання статора. З урахуванням мінімального гідравлічного опору, створюваного частинками матеріалу, приймемо, що ці частинки орієнтовані в каналі вздовж осі y . Приймемо також, що швидкість частинки дорівнює швидкості руху рідини (ковзання відсутнє). З рисунка видно, що рух частинки починається в той момент, коли її “лівий край вирівнюється за лівим краєм каналу статора, тому за точку відліку приймається точка O . Отримано аналітичний вираз для умови руйнування такої частинки, яке подано у вигляді:

$$\tau_x = \frac{(a_p + a_c - d - \sqrt{d^2 - \delta^2})}{2\pi n R_p} \quad \tau_y = \frac{(b - \delta)(d + a)cz}{2kn}, \quad (3)$$

де a_p — ширина каналу ротора, м; a_c — ширина каналу статора, м; d — характерний розмір частинок, м; δ — величина радіального зазору між ротором і статором; n — частота обертання ротора, об/хв; τ_x — час руху частинки вздовж осі x , с.; τ_y — час руху частинки вздовж осі y , с.; R_p — радіус ротора, м; b — довжина частинки, що подрібнюється, м; c — висота каналу, м; z — кількість одночасно відкритих каналів, шт.; k — емпіричний коефіцієнт.

Із співвідношення (3) випливає, що збільшення частоти обертання ротора РПА не призводить до зміни співвідношення між τ_x і τ_y , що може свідчити про переважно зсувний характер руйнування частинок.

Оскільки обробка в РПА відбувається в рідкому середовищі, то при певних умовах можливе виникнення кавітації. Цілком очевидно, що подрібнення дисперсних частинок можливе лише за певних співвідношень між їх розмірами і розмірами кавітаційних бульбашок. Діаметр кавітаційної бу-

льбашки в момент її «схлопування» не повинен перевищувати діаметр частинок, що подрібнюються, оскільки в цьому випадку кумулятивний струмінь, що утворився, не зможе бути сфокусований на її поверхні. Існує, мабуть, і нижня межа цього співвідношення, тому що із зменшенням розміру кавітаційної порожнини зменшується енергія, що виділяється бульбашкою. Тому, оцінити ефективність впливу на матеріал, що подрібнюється, можна за допомогою критерію кавітаційного подрібнення:

$$K_{подр} = \frac{d}{d_{\Pi}}; \quad (4)$$

$$\text{де } d_{\Pi} = 9\sqrt[3]{\frac{E_{зовн}}{33.8\sigma p}}, \quad (5)$$

де n – кількість кавітаційних бульбашок, шт.; p – тиск, Па.

Для обчислення мінімальної енергії, необхідної для руйнування частинки, можна скористатися раніше отриманим рівнянням (2). З урахуванням формул (4) і (5) сформульовано умову (6), при виконанні якої буде виникати гарантоване кавітаційне руйнування частинки:

$$1 < K_{подр} < \frac{d}{9\sqrt[3]{\frac{E_{зовн}}{33.8\sigma p}}}, \quad (6)$$

Отриманий раніше вираз (2) дозволяє визначити витрати енергії на дезагрегацію ультрадисперсних частинок. Оскільки безпосереднє вимірювання поверхневого натягу на міжфазній границі «агрегат-навколишнє середовище» неможливе, то зручніше за все пов'язати вказаний параметр з дзета-потенціалом ζ – найважливішим показником, який визначає агрегатну стійкість високодисперсних частинок. Залежність, що зв'язує між собою поверхневий натяг з дзета-потенціалом, можна записати у вигляді:

$$\sigma = \sigma_o - \frac{\pi \varepsilon_A \zeta^2}{r_H}, \quad (7)$$

де σ_o – міжфазний натяг на плоскій грані розподілу, Дж/м²; ε_A – абсолютна діелектрична проникність середовища, Ф/м.

Однак для деяких матеріалів в ультрадисперсному стані неможливо обчислити σ_o , оскільки вони просто не існують у звичайному (макроскопічному) стані, що пов'язано з особливостями їх синтезу. Тому, замість виразу (7) скористаємося рівнянням Г.І. Липпмана, що зв'язує між собою поверхневий натяг і поверхневий заряд частки (агрегату).

$$\frac{d\sigma}{dU} = q_{нов}. \quad (8)$$

Після деяких перетворень формули (8) отримаємо:

$$\sigma = \frac{\mu \nu_q U}{\zeta}, \quad (9)$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості середовища, Па; ν_q – швидкість переміщення частинок, м/с; U – різниця потенціалів, В.

Таким чином, визначивши дзета-потенціал методом електрофорезу і розрахувавши за рівнянням (9) значення міжфазного натягу на межі «агрегат-дисперсійне середовище», можна за допомогою формули (2) визначити енергію, необхідну для його руйнування.

Отримані розрахункові залежності дозволяють оцінити витрати енергії на дезагрегацію ультрадисперсних матеріалів.

Висновки

Наведена методика дозволяє експериментально оцінити енерговитрати в процесі "мокрого" подрібнення в РПА і встановити ступінь впливу на них технологічних параметрів.

Тобто, при виробництві сумішей сільськогосподарського призначення застосування апаратури роторно-пульсаційного типу виявляється досить ефективним для інтенсифікації процесів тонкого диспергування твердої фази.

Список літератури

1. Долинский А.А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий / А.А. Долинский // ИФЖ. – 1996. – Т. 69, №6. – С.45–50.

2. Исследование процесса измельчения частиц в роторно-пульсационном аппарате / О.С. Иванов, М.С. Василишин, В.Ю. Егоро А.Г. Карпов // Технологии и оборудование химической, биологической и пищевой промышленности: материалы всероссийской науч. – практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2008. – С.33 – 36.

3. Исследование процесса измельчения в роторно-пульсационном аппарате / А.Г. Карпов, М.С. Василишин, В.Ю. Егоров, О.С. Иванов // Перспективы создания и применения конденсированных высокэнергетических материалов: доклады 2-й науч.–техн. конф. молодых учёных. – Бийск: ИПХЭТ СО РАН, 2008. – С.6–9.

4. Промтов М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества / М.А. Промтов. – М.:Машиностроение, 2004. – 93 с.

Обоснованы условия, обеспечивающие измельчение частиц материала до соответствующих размеров. Получена методика, которая позволяет оценить затраты энергии на дезагрегацию дисперсных материалов. Выяснено механизм действия рабочих органов РПА на измельчаемый материал, и на основании этого определены условия гарантированного разрушения частиц различной формы.

Измельчение, роторно-пульсационный аппарат, кавитация.

Justification provided to ensure grinding material particles in the appropriate size. Retrieved methodology to assess the energy consumption for disaggregation of dispersed materials. The mechanisms of action of RPA working on crushed material and on the basis of the conditions guaranteed destroyed particles of different shapes;

Grinding, rotary-pulse machine, cavitation.

ПІДВИЩЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ І ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВЕНТИЛЬОВАНИМИ КАНАЛАМИ

Б.Х. Драганов, доктор технічних наук
А.В. Міщенко, кандидат технічних наук

Запропоновано конструкцію стінових панелей сільськогосподарських споруд з більш досконалыми аеродинамічними і тепловими показниками. Наведено дані експериментальних досліджень та методику розрахунку огорожувальних конструкцій з вентильованими каналами.

Огороджувальна конструкція, вентиляція, турбулентні потоки, гідродинамічний розрахунок.

У багатьох регіонах України в процесі експлуатації будівель помітно підвищується ступінь вологості зовнішніх огорожувальних конструкцій, що призводить до збільшення теплових втрат під час опалювального періоду.

В існуючому житловому фонді України частка великопанельних будинків є досить суттєвою. В сучасному будівництві використання панельних огорожувальних конструкцій значно зменшилось, але вони ще займають вагомий нішу. Актуальними є дослідження огорожувальних конструкцій, спрямовані на поліпшення їх теплофізичних властивостей, зокрема на виявлення причин накопичення вологи в товщі огорожувальної конструкції в річному експлуатаційному циклі будівель [5].

Мета досліджень – встановлення взаємозв'язку змін вологості огорожувальної конструкції в зоні фазового переходу залежно від фронту розміщення фазового переходу в товщині однорідного матеріалу.

Матеріали та методика досліджень. Процеси дифузії водяної пари в огорожувальній конструкції можуть бути ускладнені молярним перенесенням вологи повітря. Параметр, який відповідає за здатність вологого повітря утримувати водяну пару – C_e являє собою аналог теплоємності повітря в процесі передачі теплоти (год/кг·Па), і визначається за формулою:

$$C_e = \frac{622P_0}{\left[P_0 - \frac{\varphi_0}{100} E_s \right]}, \quad (1)$$

де P_0 – барометричний тиск, Па; φ_0 – відносна вологість навколишнього повітря, %; E_s – тиск водяної пари при температурі навколишнього повітря, Па.

Питома відносна пароємність залежить від вологості повітря в порах матеріалу огорожувальних конструкцій і визначається диференціюванням ізотерм сорбції [2, 4]:

$$\varepsilon_0 = 1000 \frac{\partial \omega}{\partial \varphi}, \quad (2)$$

де ω – вагова сорбційна вологість матеріалу; φ – відносна вологість повітря в порах матеріалу.

Аналіз показав, що одним із перспективних методів запобігання конденсації водяної пари в товщі зовнішніх огорожувальних конструкцій є влаштування в них вентилярованих каналів. Проте існуючі моделі конструкцій вентилярованих стін мають недолік – при надходженні повітря, що використовується для рекуперації теплоти у вентилярованих конструкціях, відбувається відрив повітряного потоку від стінок каналу. Внаслідок відривних явищ лише частина живого перетину вентиляційного каналу охоплена повітряним потоком. Відрив потоку супроводжується вихровими рухами, які в основному виникають у місцях зміни напрямку каналу. У каналах зовнішніх огорожень подібної конструкції витрата повітря значно менша теоретично можливої для цієї величини площі живого перетину каналу.

Результати досліджень. Технічним рішенням задачі є поліпшення конструкцій вентиляваного каналу в аеродинамічному відношенні. Ми запропонували вентиляований канал, що відрізняється від базового тим, що підвідні та відвідні ділянки розташовують під кутом 120° – 130° до основної ділянки. Крім того, їх з'єднання з основною, вертикальною ділянкою закруглено (рис. 1), що призводить до зменшення відривних явищ і, як наслідок, до помітного зменшення аеродинамічних втрат.

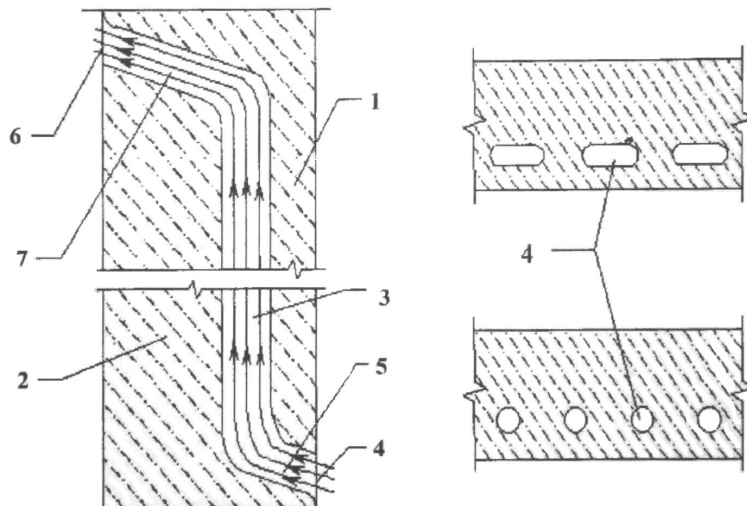


Рис. 1. Одношарова вентилявана панель зовнішнього огородження з природною і штучною (механічною) вентиляцією:

1 – зовнішній захисно-декоративний екран, 2 – внутрішній несучий шар, 3 – вентиляційний канал, 4 – припливні отвори, 5 – похила підвідна ділянка; 6 – випускний отвір, 7 – похила відвідна ділянка

Для оцінки ефективності запропонованої конструкції вентиляваного каналу були проведені експериментальні дослідження стінової панелі в спеціальному кліматичному комплексі «КИЇВЗНДІЕП».

Цей комплекс дозволяє штучно створювати зовнішні та внутрішні теплові умови приміщень. Він складається з трьох відсіків – зовнішнього, внутрішнього та операторського. У зовнішньому відсіку кліматичного комплексу відтворювались параметри зовнішнього повітря протягом опалювального сезону. У внутрішньому відсіку відтворювали температуро-вологісні параметри внутрішнього повітря тваринницького приміщення. В операторському відсіку розташовувались контрольно-вимірювальні прилади.

Зовнішній відсік кліматичної камери створений на базі термобарокамера КТВВ-8000/2, який має потужну холодильну установку, спроможну забезпечити нормовані ДСТУ значення температур зовнішнього повітря протягом опалювального періоду.

Температура повітря у зовнішньому відсіку кліматичної камери підтримувалась системою автоматичного регулювання з точністю $\pm 1,5$ °C, а у внутрішньому з точністю ± 1 °C. Вологість у теплому відсіку камери підтримувалась в автоматичному режимі з точністю ± 3 %.

У теплому відсіку кліматичного комплексу підтримувалися параметри повітря, найхарактерніші для тваринницьких приміщень: температура $+14 \pm 1,0$ °C; відносна вологість $75 \pm 3,0$ %). У холодильному відсіку створювалися кліматичні умови зимового зовнішнього повітря: температура $-19 \pm 1,5$ °C; відносна вологість $79 \pm 3,0$ %).

Експеримент проводили для чотирьох варіантів огорожувальних конструкцій: суцільної стінки (А); з розташуванням каналу ближче до внутрішньої поверхні огорожі (Б); з розташуванням каналу ближче до зовнішньої поверхні огороження (В) і з розташування каналу в центрі огороження (С). Розташування вентиляваних каналів у товщі огорожувальних конструкцій показано на рис. 2.

Досліджувалися такі режими:

- вентиляція прошарків попередньо нагрітим повітрям;
- природна вентиляція зовнішнім повітрям;
- невентильовані канали (огороження з герметичними каналами).

Як контрольний режим для оцінки теплофізичних характеристик огорож приймалися дані, отримані для огорожі без каналів (варіант А).

При проведенні натурних теплофізичних випробувань використовуються прилади та обладнання згідно з ГОСТ 26254-84. Вимірювання температури проводилися за допомогою мідь-константових термопар ($-50 \dots +150$ °C, $\pm 0,2$ °C), які кріпилися до внутрішньої і зовнішньої поверхні досліджуваного огороження (рис. 3).

Отримані при обробці результатів експерименту середні за період спостереження значення температури округляються до $0,1$ °C. Заміри щільності теплового потоку проводилися датчиком перетворювача теплового потоку ПТП-0.11.13.14.00 (до 20000 Вт/м², ± 5 %). Результати вимірювань значень теплових потоків округлювались до $0,1$ Вт/м².

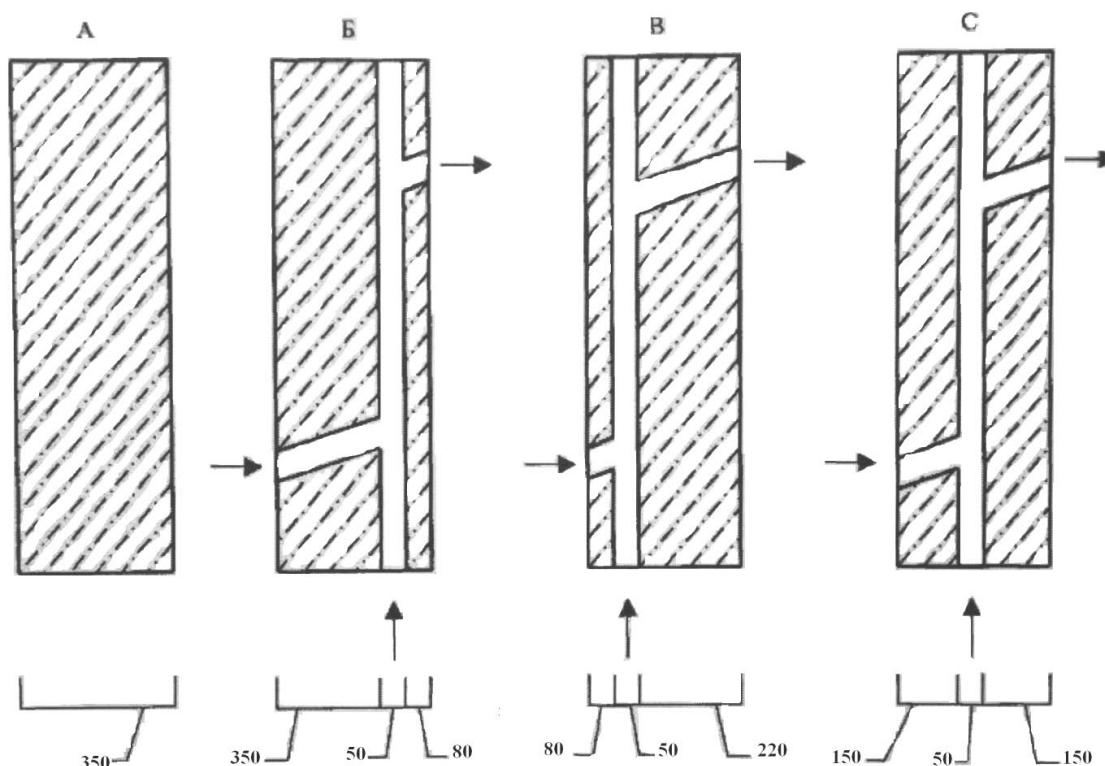


Рис. 2. Конструкції досліджуваних фрагментів огорожувальних конструкцій:
 А – контрольна ділянка; Б – з каналами, наближеними до внутрішньої поверхні огороження; В – з каналами, наближеними до зовнішньої поверхні огороження; С – з каналами в центрі огороження

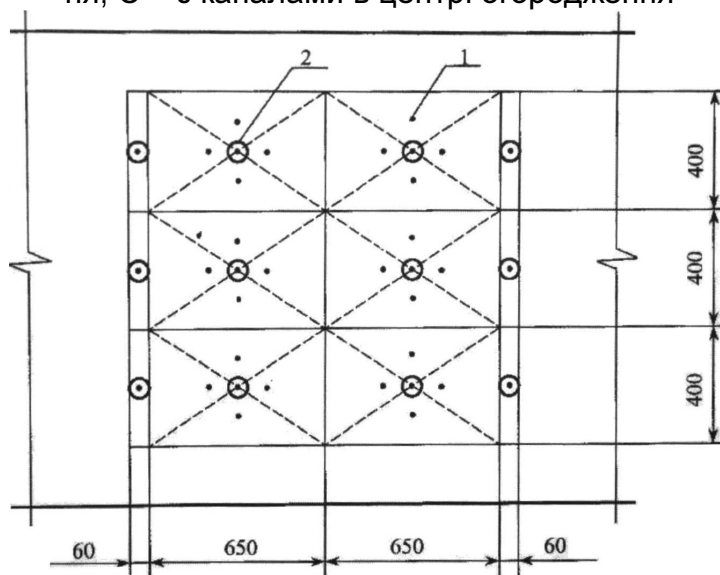


Рис. 3. Схема розташування датчиків:
 1 – датчик температури, 2 – датчик перетворювача теплового потоку

Термопари і тепломіри через багатоточкові перемикачі підключаються до електронного вольтметра В7-21А, за допомогою якого визначалася термо- е.р.с. кожного датчика. Відносну вологість повітря визначали психрометром ВМ-4М.

Для вибору оптимальної схеми розміщення датчиків, що враховують конструктивні особливості досліджуваної огорожі, проводилось попе-

реднє теплове обстеження поверхні панелі за допомогою пірометра. Це дозволило виявити термічно однорідні зони і розташування теплопровідних включень, їх конфігурацію і розміри.

На основі аналізу проведених експериментальних досліджень було встановлено, що відношення опору теплопередачі для стандартної конструкції панелі до експериментальної рівне 0,145–0,398 м²·К/Вт. Отриманий результат переконливо говорить про те, що слід віддавати перевагу вентиляційним каналам з підвищеними аеродинамічними показниками. Експериментальні дані були доповнені теоретичними розрахунками.

Якщо вважати, що вентиляційний канал має циліндричну форму – то рух в'язкого нестисливого середовища можна описати системою рівнянь:

- рівняння нерозривності потоку:

$$\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0; \quad (3)$$

- рівняння руху рідини – рівняння Нав'є-Стокса:

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + w \frac{\partial v}{\partial z} + v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} [v_{eff} (\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r})] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (2rv_{eff} \frac{\partial v}{\partial r}); \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + w \frac{\partial w}{\partial z} + v \frac{\partial w}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (2rv_{eff} \frac{\partial w}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rv_{eff} (\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z})]; \quad (5)$$

- рівняння теплопереносу в потоці рідини:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + v \frac{\partial t}{\partial r} + w \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(\frac{v}{Pr} + \frac{v_t}{Pr_t}) \frac{\partial t}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial z} [(\frac{v}{Pr} + \frac{v_t}{Pr_t}) \frac{\partial t}{\partial z}]; \quad (6)$$

- рівняння теплопровідності в стінці каналу:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a(\frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}). \quad (7)$$

Для опису турбулентного переносу, крім рівнянь Нав'є-Стокса та теплопереносу, до рівнянь 3–7 додаються рівняння кінетичної енергії турбулентності k і швидкостей її дисипації ε , а саме:

- рівняння кінетичної енергії турбулентності:

$$\frac{\partial k}{\partial \tau} + w \frac{\partial k}{\partial z} + v \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r(v + \frac{v_t}{Pr_k}) \frac{\partial k}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} ((v + \frac{v_t}{Pr_k}) \frac{\partial k}{\partial z}) + G_k - \varepsilon - D_k; \quad (8)$$

- рівняння для швидкості дисипації енергії:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r(v + \frac{v_t}{Pr_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} ((v + \frac{v_t}{Pr_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}) + \frac{\varepsilon}{k} C_{1\varepsilon} G_k - \frac{\varepsilon}{k} f_\varepsilon - R_\varepsilon. \quad (9)$$

При турбулентному режимі течії в рівняння теплопереносу (6) вводиться число Прандтля Pr_t , яке для різних моделей турбулентної в'язкості визначається по-різному. Для стандартної k - ε – моделі турбулентне число Прандтля залишається постійною величиною, або визначається емпіричними залежностями. Для RNG k - ε – моделі турбулентне число Прандтля представлено рішенням трансцендентного рівняння [1]:

$$\left| \frac{\text{Pr}_t^{-1} - 1.3929}{\text{Pr}^{-1} - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\text{Pr}_t^{-1} + 2.3929}{\text{Pr}^{-1} + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\nu}{\nu_t}. \quad (10)$$

Для визначення числа Прандтля для кінетичної енергії турбулентності використовується співвідношення:

$$\left| \frac{\text{Pr}_t^{-1} - 1.3929}{0.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\text{Pr}_t^{-1} + 2.3929}{3.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\nu}{\nu_t}. \quad (11)$$

Для RNG $k-\varepsilon$ - моделі значення числа Прандтля для кінетичної енергії та для швидкості її дисипації збігаються, для інших моделей динаміки турбулентності визначається, як правило, емпірично.

Висновки

Запропоновані конструкції панелей з вентиляльованим каналом мають кращі аеродинамічні і теплотехнічні характеристики. Гідродинамічний розрахунок вентиляльованих каналів огорожувальних конструкцій слід виконувати з урахуванням турбулентності потоку та її дисипації.

Список літератури

1. Авраменко А.А. Групповые методы в теплофизике / Авраменко А.А., Басок Б.И., Кузнецов А.В. – К.: Наук. думка, 2003. – 483 с.
2. Грудзинский М.М. Оптимальные вентиляционные системы зданий / Грудзинский М.М., Ливчак В.И., Поз М.Я. – М.: Стройиздат, 1982. – 258 с.
3. Богословский В.Н. Строительная теплофизика / В.Н Богословский. – М.: Высш. шк., 1982. – 415 с;
4. Ушков Ф.В. Теплопередача через ограждения при фильтрации воздуха / Ф.В. Ушков. – М.: Стройиздат, 1969. – 144 с;
5. Черных Л.Ф. Расчет теплопередачи через трехслойную стенку при периодическом изменении температуры наружного воздуха / Черных Л.Ф., Крылова Т.Д., Дрозд Е.А. – К.: «КИЕВЗНИЭП», 1995. – С. 66–79.

Предложена конструкция стеновых панелей сельскохозяйственных сооружений с более совершенными аэродинамическими и тепловыми показателями. Приведены данные экспериментальных исследований и методика расчета ограждающих конструкций с вентилируемыми каналами.

Ограждающая конструкция, вентиляция, турбулентные потоки, гидродинамический расчет.

A design wall panels agricultural buildings with improved aerodynamic and thermal performance. Data are presented experimental studies and methods of calculating envelope with ventilated channels.

Cladding, ventilation, turbulent flow, hydrodynamic calculation.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДКИ КРАПЛИН РОЗЧИНІВ З НИЗЬКИМ ПИТОМИМ ОБ'ЄМНИМ ОПОРОМ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

**Г.Б Іноземцев, доктор технічних наук
С.Д. Ващишин, аспірант**

Розглянуто процес електростатичного нанесення розчинів з низьким питомим об'ємним опором. Встановлено особливості, які необхідно враховувати при нанесенні живильних та протруючих розчинів для обробки рослин.

Електростатичний метод нанесення, електричний заряд, електричне поле, розчини з низьким питомим об'ємним опором, монодисперсність, рух краплин, осадження на зелену масу рослин.

Врожайність сільськогосподарських культур в значній мірі залежить від ряду факторів, основними з яких є захист та підживлення рослин. Технології щодо захисту та підживлення рослин відіграють важливу роль у сільськогосподарському виробництві, оскільки від них залежить кількість й якість вирощуваної продукції. До таких технологій належить: кореневе та позакореневе підживлення рослин, що сприяє створенню сприятливих умов для їх росту і розвитку.

Позакореневе підживлення проводять тоді, коли знижується ефективність поглинання поживних речовин кореневою системою рослин та для врівноваження дисбалансу мінеральних елементів [4]. Позакореневе підживлення та внесення протруючих розчинів проводять шляхом їх нанесення, переважно пневматичним, механічним та гідравлічним методами, яким притаманна висока полідисперсність розпилювання (від 30 до 500 мкм), значні втрати розпилюючих розчинів (до 75 %), нерівномірність осадження (від 45 до 60 %), низький ступінь покриття розчином із зворотної поверхні листя рослин (від 5 до 15 %) тощо [3]. Все це обумовлює перевитрати хімічних розчинів, забруднення навколишнього середовища, затримання і зменшення ефективності засвоєння поживних речовин у рослин.

Ліквідація цих недоліків можлива за рахунок застосування електростатичного методу нанесення розчину, що дозволяє підвищити якість обробки рослин, ефективність осадження та утримання краплин з обох поверхонь листя тощо. [3].

Електростатичний метод нанесення в технологічному процесі обробки рослин розчинами з низьким питомим об'ємним опором нині є недостатньо вивченим і потребує більш чіткого уявлення процесу зарядки краплин, їх динаміку руху та осадження на зелену масу рослин.

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Г.Б. Іноземцев

© Г.Б. Іноземцев, С.Д. Ващишин, 2013

Мета досліджень – отримання нових уявлень процесу зарядки і руху краплин розчинів з низьким питомим об'ємним опором в електричному полі.

Матеріали та методика досліджень. Електростатичний метод нанесення є одним із прогресивних та ефективних методів нанесення, що займає одне з провідних місць в промисловості багатьох країн світу. Цей метод економічний, забезпечує високу якість покриття, можливість автоматизації процесу та високу продуктивність. За рахунок впливу електростатичного поля на краплини розчинів, досягається практично їх повне осадження (втрати $\leq 10\%$, а при сучасних методах нанесення, втрати досягають до 60–65 %).

Процес електростатичного нанесення розчинів, складається з таких основних етапів: зарядка розчину, його розпилення, утворення факела, рух та осадження краплин на поверхню обробки. Зарядження краплин в електричному полі є вирішальним, оскільки впливає на проходження таких процесів: динаміку руху, осадження краплин на поверхню обробки, що визначають дисперсність, рівномірність осадження, густоту покриття, адгезію та ін. [3, 2].

Ефективність зарядки суттєво залежить від електрофізичних властивостей розчинів (діелектричної проникності – ϵ , питомого об'ємного опору – ρ_v , поверхневого натягу розчину та зеленої маси рослин – σ_1, σ_2), що наносяться. Встановлено, що електричний заряд збільшується при зменшенні питомого об'ємного опору та зменшується при його збільшенні; збільшення ($\rho_v > 10^8$ Ом см), обумовлює гальмування або повне припинення процесу зарядки (рис.1.)

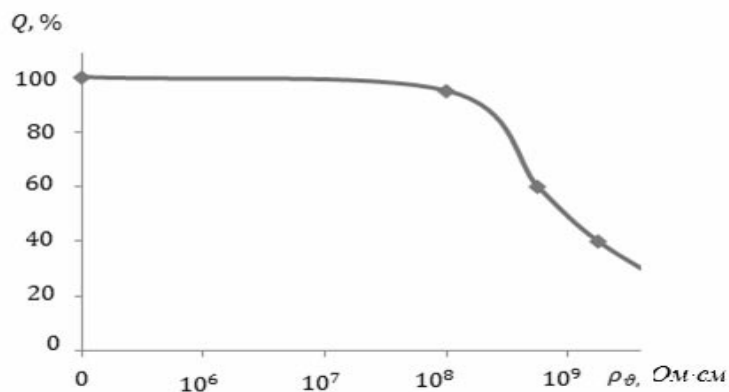


Рис. 1. Залежність електричного заряду розчину від величини його питомого об'ємного опору

Процес зарядки, досліджували: І.П. Верещагін, В.І. Попков, Г.Б. Іноземцев, В.Ф. Дунський, В. Н. Бородін та ін., а їх працях наголос робився на матеріали з високим питомим об'ємним опором ($10^7 \dots 10^{11}$ Ом см). Розчинам з низьким питомим об'ємним опором ($10^2 \dots 10^3$ Ом см) було приділено недостатньої уваги. Оскільки процес зарядки краплин розчинів залежить від значення їх питомого об'ємного опору, то відповідно процеси, які будуть відбуватися при електростатичному нанесенні розчинів з низьким та високим питомим об'ємним опором будуть відрізнятися.

При електростатичному нанесенні розчинів застосовують переважно такі методи зарядки: іонну, контактну та індукційну.

Іонний метод зарядки полягає в тому, що іони, які рухаються в газовому середовищі, наприклад у зовнішній зоні коронного розряду, зіштовхуються з краплинами розчинів та осідають на їх поверхні. Заряд, який отримують краплини при цьому методі зарядки, визначають за формулою:

$$Q_{\max} = \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon - 2}\right) ER^2, \quad (1)$$

де $Q_{\max}$ – електричний заряд краплини, Кл; ε – діелектрична проникність розчину; E – напруженість поля в даній точці, В/м; R – радіус краплини, мкм.

Для отримання високого значення заряду краплина повинна тривалий час знаходитися в полі коронного розряду. При зарядці розчинів з низьким питомим об'ємним опором ця особливість обумовлює значні технологічні та конструктивні складнощі.

Контактна зарядка відбувається в результаті контакту розчину з коронуючим електродом. При контактному методі зарядки розчинів у полі коронного розряду (в 10 – 25 разів ефективнішого в порівнянні з іонним методом [6]), величина заряду краплини Q , Кл, виражається формулою:

$$Q = R^2 \frac{U}{r \ln \frac{2H}{r}} \left[1 - A 10^{-12} \frac{\varepsilon \rho_v}{H^2} (U - U_k) \right] \quad (2)$$

де R , r – радіус краплини та радіус гострої кромки коронуючого електрода, мкм; U , U_k – напруга джерела живлення та початкова напруга, що відповідає утворенню коронного розряду на коронуючому електроді, кВ; H – відстань від коронуючого електрода до рослин, м; ε – діелектрична проникність розчину; ρ_v – питомий об'ємний опір розчину, ом·см; A – розрахункова постійна [3, 5].

Результати досліджень. При електростатичному нанесенні живильних та протруючих розчинів час зарядки та розрядки краплин становить ($t \approx 10^{-1}$ с). Він залежить від величини питомого об'ємного опору, що підвищує вимоги до процесу електростатичного нанесення. Вирішення цього питання, можливо за рахунок застосування високошвидкісного потоку повітря, що прискорює процес руху та осадження заряджених краплин в електричному полі.

Краплини розчинів, отримавши електричний заряд, рухаються до поверхні осадження по певній траєкторії, напрямком і формою якої визначається дією на краплину сил [1]:

$$\sum F = F_{mg} + F_q + F_E + F_c, \quad (3)$$

де F_{mg} – сила земного тяжіння, Н; F_q – сила, обумовлена дією електричного поля, Н; F_E – сила, обумовлена нерівномірним розподіленням напруженості електричного поля, Н; F_c – сила опору середовища, Н.

При нанесенні розчинів з низьким питомим об'ємним опором з врахуванням аеродинамічних сил, що виникають при застосуванні високошвидкісного потоку повітря, формула (3) набуде вигляду:

$$\sum F = F_{mg} + F_q + F_E + F_c + F_\alpha, \quad (4)$$

де F_α – аеродинамічна сила, Н.

Силу дії земного тяжіння визначають за формулою:

$$F_{mg} = mg, \quad (5)$$

де m – маса краплини, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

Силу електричного поля, що діє на заряджену краплину, визначають за формулою:

$$F_q = Eq, \quad (6)$$

де E – напруженість електричного поля, В/м; q – електричний заряд краплини, Кл.

Силу обумовлену нерівномірним розподіленням напруженості електричного поля на заряджену краплину, визначають за формулою [1]:

$$F_E = E_1 q_2 - E_2 q_2. \quad (7)$$

Сила опору середовища при русі зарядженої краплини, визначають за формулою [1]:

$$F_c = k_c 6\pi\mu r(v - v^*), \quad (8)$$

де $k_c, v^* = \frac{(\text{Re}^* v)}{2r}$ – коефіцієнти лінійної апроксимації; u – швидкість руху краплини відносно повітряного середовища, м/с; r – радіус краплини, м; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості середовища, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$.

Аеродинамічну силу повітряного потоку, що діє на заряджену краплину, визначають за формулою:

$$F_\alpha = C_{F\alpha} \frac{\rho V^2}{2} S, \quad (9)$$

де $C_{F\alpha}$ – безрозмірний коефіцієнт аеродинамічної сили; V – швидкість напору повітря, м/с; ρ – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; S – площа краплини, м^2 .

Траєкторія руху та осадження краплин розчинів з низьким питомим об'ємним опором в електричному полі наведена на рис.2.

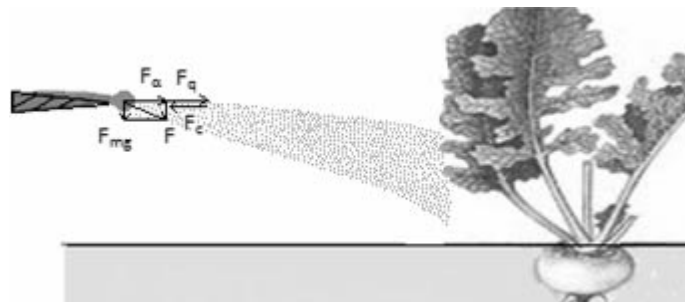


Рис.2. Траєкторія руху та осадження краплин розчинів з низьким питомим об'ємним опором в електричному полі

Завершальним етапом електростатичного нанесення є процес осадження краплин на поверхню рослин, що супроводжується розтіканням та стіканням з них електричного заряду.

Всмоктування діючих речовин у тканини рослини здійснюється тільки в рідинному стані і визначається явищем змочуваності, тобто контактною взаємодією на межі „ тверде тіло (листя) – рідина (робочий розчин)”. При цьому утримування крапель корелює з явищем змочування, яке в процесах захисту та живлення рослин відіграє важливу роль.

Відомо, що найкраща взаємодія, яка і визначає змочуваність, відбувається при такій умові [3]:

$$\sigma_m \geq \sigma_{pp}, \quad (10)$$

де σ_m , σ_{pp} – поверхневий натяг відповідно твердого тіла (рослин) та робочого розчину, Н/м.

Умову (8) необхідно враховувати при розробці технологічних процесів, тому що невиконання її обумовлює негативний результат.

Згідно з роботою [1] сили утримання суттєво залежать від напруженості електричного поля для краплин розміром $d_k \geq 40\text{--}60$ мкм. Напруженість електричного поля в цьому випадку збільшує силу утримання краплин на поверхні зеленої маси рослин.

Надання розчину високого потенціалу обумовлює створення більш розвинутої поверхні крапель і як результат більший контакт з поверхнею рослин, зростання розтікання по поверхні листового покриву, утримання його на поверхні.

Висновки

Отримано нові уявлення процесу зарядки і руху краплин розчинів з низьким питомим об'ємним опором ($\rho_v = 10^2 \dots 10^3$ Ом см) в електричному полі.

Проведений аналіз електростатичного методу нанесення розчинів з низьким питомим об'ємним опором показав, що час зарядки та розрядки краплин становить ($t \approx 10^{-1}$ с) та залежить від величини питомого об'ємного опору, що підвищує вимоги до процесу електростатичного нанесення.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування високошвидкісного потоку повітря, що сприяє прискоренню процесу руху та осадження краплин на поверхню рослин в електричному полі.

Напруженість електричного поля ($E = 3\text{--}3,5$ В/м) обумовлює збільшення сили утримання краплин, тому необхідно, щоб ($V_3 > V_p$, де V_3 , V_p – швидкість зарядки та розрядки краплин на поверхні зеленої маси рослин.)

Сили прилипання суттєво залежать від напруженості електричного поля для краплин розміром ($d_k \geq 40\text{--}60$ мкм).

Список літератури

1. Верещагин И.П. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И.П. Верещагин, В.И. Левитов. – М.: Энергия, 1974. – 479 с.
2. Дунский В.Ф., Монодисперсные аэрозоли / Дунский В.Ф., Никитин Н.В., Соколов М.С. – М.: Наука, 1975. – 188 с.

3. Іноземцев Г.Б. Науково-технічні передумови застосування електричного поля при захисті рослин / Г.Б. Іноземцев // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2006. – №3(7). – С. 12 – 18.

4. Іноземцев Г.Б. Активація та стимуляція росту овочевих культур шляхом нанесення живильних розчинів електростатичним методом / Г.Б. Іноземцев, С.Д. Ващишин // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2012. – №1. – С. 14 – 22.

5. Попков В.И. Сильные электрические поля в технологических процессах / В.И. Попков. – М.: Энергия, 1971. – 231 с.

6. Фізико-технологічні та електрофізичні властивості сільськогосподарських продуктів і матеріалів: навч. посібник / [Іноземцев Г.Б. Червінський Л.С., Берека О.М., Окушко О.В.]. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2010. – 180 с.

Рассмотрен процесс электростатического нанесения растворов с низким удельным объемным сопротивлением. Установлены особенности, которые необходимо учитывать при нанесении питательных и защитных растворов для обработки растений.

Електростатический метод нанесения, электрический заряд, электрическое поле, растворы с низким удельным объемным сопротивлением, монодисперсность, движение капель, осаждение на зеленую массу.

The process of electrostatic coating solutions with a low volume resistivity. Installations the features that should be considered when applying the nutrients and protective solutions for treating plants.

Electrostatic deposition method, electric charge, electric field, solutions with low volume resistivity, monodispersity, the movement of droplets deposited on the green mass.

УДК 621.31: 631.6.03

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА ЗМІНИ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ

О.М. Берека, доктор технічних наук

Д.Ю. Ілюхін, аспірант*

Розглянуто спосіб обробки води в сильному електричному полі, наведено результати досліджень рН та ОВП дистильованої води протягом десяти днів після обробки в сильному електричному полі.

Сильне електричне поле, дистильована вода, електрофізичні властивості, борошно, зволоження.

Сучасний розвиток сільськогосподарського виробництва потребує застосування передових технологій, які здатні забезпечити максимальну

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор, О.М. Берека.

© О.М. Берека, Д.Ю. Ілюхін, 2013

3. Іноземцев Г.Б. Науково-технічні передумови застосування електричного поля при захисті рослин / Г.Б. Іноземцев // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2006. – №3(7). – С. 12 – 18.

4. Іноземцев Г.Б. Активация та стимуляція росту овочевих культур шляхом нанесення живильних розчинів електростатичним методом / Г.Б. Іноземцев, С.Д. Ващишин // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2012. – №1. – С. 14 – 22.

5. Попков В.И. Сильные электрические поля в технологических процессах / В.И. Попков. – М.: Энергия, 1971. – 231 с.

6. Фізико-технологічні та електрофізичні властивості сільськогосподарських продуктів і матеріалів: навч. посібник / [Іноземцев Г.Б. Червінський Л.С., Берека О.М., Окушко О.В.]. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2010. – 180 с.

Рассмотрен процесс электростатического нанесения растворов с низким удельным объемным сопротивлением. Установлены особенности, которые необходимо учитывать при нанесении питательных и защитных растворов для обработки растений.

Електростатический метод нанесения, электрический заряд, электрическое поле, растворы с низким удельным объемным сопротивлением, монодисперсность, движение капель, осаждение на зеленую массу.

The process of electrostatic coating solutions with a low volume resistivity. Installations the features that should be considered when applying the nutrients and protective solutions for treating plants.

Electrostatic deposition method, electric charge, electric field, solutions with low volume resistivity, monodispersity, the movement of droplets deposited on the green mass.

УДК 621.31: 631.6.03

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА ЗМІНИ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ

О.М. Берека, доктор технічних наук

Д.Ю. Ілюхін, аспірант*

Розглянуто спосіб обробки води в сильному електричному полі, наведено результати досліджень рН та ОВП дистильованої води протягом десяти днів після обробки в сильному електричному полі.

Сильне електричне поле, дистильована вода, електрофізичні властивості, борошно, зволоження.

Сучасний розвиток сільськогосподарського виробництва потребує застосування передових технологій, які здатні забезпечити максимальну

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор, О.М. Берека.

© О.М. Берека, Д.Ю. Ілюхін, 2013

економічність, автоматизацію процесів, високу культуру виробництва та її екологічну чистоту.

Як найважливіший складовий компонент вода використовується в с.-г. виробництві та переробній галузі. Тому, дослідження й розробка способів та засобів з електрофізичної обробки води з метою подальшого її використання в галузях с.-г. виробництва для підвищення продуктивності є актуальним питанням.

Пшениця, як й інші зернові культурні злаки, уражається багатьма хворобами, в результаті чого знижується урожайність та погіршується його якість. В процесі переробки зерна мінеральний пил та мікроорганізми переходять до готової продукції, що призводить до його підвищеної бактеріальності. Мука, крупа стають нестійкими при транспортуванні та зберіганні. Причому розвиток мікрофлори проходить настільки інтенсивно, що ці продукти стають непридатними ще при транспортуванні за бактеріальними показниками, що не дозволяє їх використовувати при виробництві продуктів харчування. Однією із самих розповсюджених бактерій для борошномельних і хлібопекарських підприємств є картопляна паличка.

В останні роки зерно перед помелом не миється, а тільки відволожується. Тому, при помолі зерна всі бактерії та гриби потрапляють до борошна. За сприятливих умов бактерії картопляної палички швидко розмножуються. Оптимальними умовами для розвитку спор є температура близько 40 °С, наявність вологи, пониженої кислотності. Її клітини не витримують нагрів до 80 °С, а спори залишаються життєздатними при 120 °С. Тому бактерії при випіканні хліба гинуть, а спори залишаються життєздатними. Для попередження потрапляння спор та бактерій в борошно та хлібопекарські вироби запропоновано внести в комплекс млина камеру для знезаражуючої обробки води під дією сильного електричного поля.

Мета досліджень — встановлення впливу обробки дистильованої води в сильному електричному полі на її рН та ОВП протягом десяти днів після обробки.

Матеріали та методика досліджень. Одним із перспективних напрямів розвитку електротехнологій, є використання взаємодії сильних електричних полів із диспергированими матеріалами, які несуть електричний заряд.

У роботі запропоновано спосіб обробки води в сильних електричних полях [2, 3]. На розроблений спосіб електричної обробки рідин було отримано патент України на винахід №80722 [6]. При цьому виді обробки вода знаходиться під впливом електричного поля високої напруги, та фізичних процесів, які супроводжують ці явища (утворення озону).

Взаємодія між атомами й міцність зв'язку між ними залежить від енергетичних рівнів, на яких знаходяться атоми, що вступають у з'єднання. Крім того, багато хімічних реакцій потребують для свого початку наявності відповідного запасу енергії у реагуючих частинок, так званої енергії активації цієї хімічної реакції. В газі, під впливом електричного поля високої напруги, якраз спостерігається наявність великої кількості частинок із великим запасом енергії: збуджених атомів і молекул, іонів, а та-

кож більш або менш швидких вільних електронів. У газі при електрофізичній обробці утворюються активні водень, азот, кисень і т.д. або атомарні гази H , N і O (тоді як у звичайному стані ми маємо справу з молекулами H_2 , N_2 і O_2), вільні радикали, двоатомні молекули і молекулярні з'єднання одноатомних за своєю природою і зовсім інертних за попередніми уявленнями газів: He_2 , Ne_2 , $HeHg$.

Проблема вивчення процесів у системі, яка складається з плоского металевого й електролітного електродів цікавить дослідників уже давно. Але, ще не знайшли достатнього дослідження властивості отриманої після обробки води, і тим більше не розглядалися можливості використовувати цю воду в сільськогосподарському виробництві.

Для проведення досліджень була розроблена експериментальна лабораторна установка для обробки рідини і рідких продуктів, схема якої наведена на рис. 1.

Установка має регулятор напруги 1, який з'єднаний з первинною обмоткою високовольтного трансформатора 2, вторинні виводи якого приєднані до каскадного помножувача напруги 3, до вивода якого приєднаний верхній пластинчастий електрод 5, який розміщений в камері для обробки рідини 4, виготовленої з діелектричного матеріалу. Живлення установки відбувається від мережі змінного струму 50 Гц.

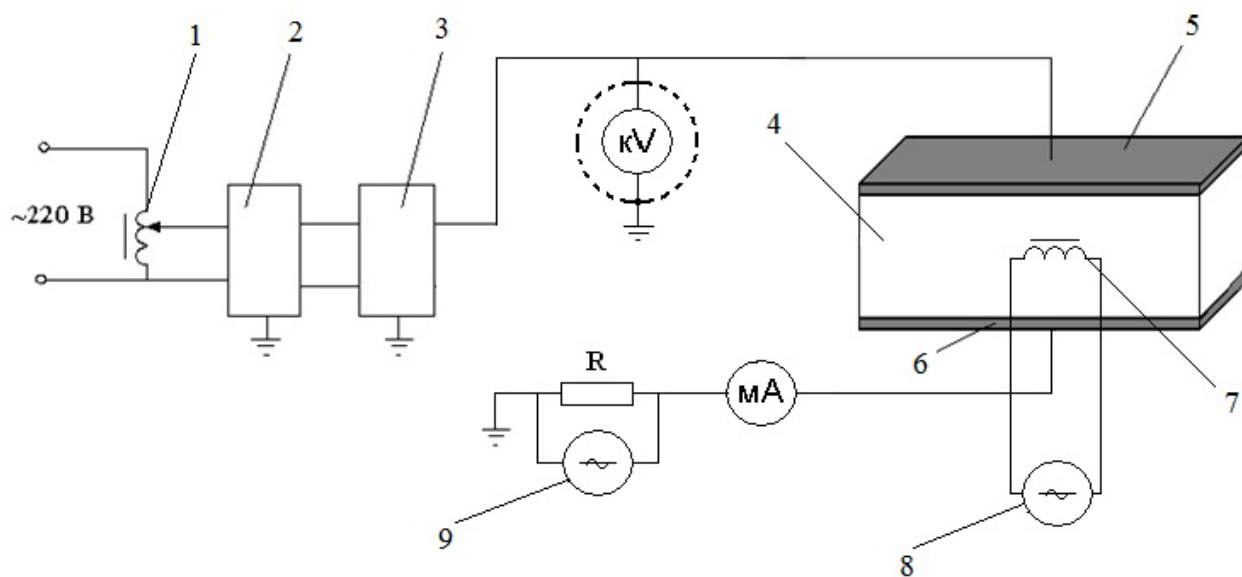


Рис. 1. Експериментальна установка для обробки рідин і рідких продуктів:

- 1 – регулятор напруги; 2 – високовольтний трансформатор; 3 – помножувач;
4 – камера обробки; 5 і 6 – відповідно верхній та нижній пластинчасті електроди
камери обробки; 7 – датчик індуктивності; 8 – осцилограф (2-й канал);
9 – осцилограф (1-й канал)

При проведенні досліджень використовували кіловольтметр С96, для аналізу розрядних процесів, які відбуваються у камері обробки – електронний осцилограф RIGOL DS1102E з полосою пропускання 100 МГц, для визначення рН і ОВП – "Иономер универсальный ЭВ-74", електропровідності – DiST3.

Установка працює так. Вмикається регулятор напруги 1, автоматично вмикається високовольтний трансформатор 2 і каскадний помножувач напруги 3, після чого напруга подається на пластинчастий електрод 5. Рідина, яка обробляється, набирається до відповідного об'єму, а після обробки відводиться. Між верхнім електродом та рідиною повинен бути повітряний шар відповідної товщини. В робочій камері 4 рідина буде постійно знаходитися під силовою дією електростатичного поля високої напруги, крім того, при відповідній напруженості електростатичного поля відбуваються імпульси струму в шарі рідини. Частота імпульсів регулюється підведеною напругою між електродами та товщиною шару рідини й проміжку повітря між рідиною та верхнім електродом. Також частоту імпульсів можна регулювати введенням ємності, яка підключається паралельно проміжку між верхнім і нижнім електродами.

Результати досліджень. На рисунках 2 та 3 наведено експериментально зняті осцилограми розрядних процесів, які відбуваються в камері обробки при напрузі на електродах камери 9 кВ та 12 кВ відповідно. На першому каналі осцилографа показана крива, знята з резистора опором 30 кОм, який ввімкнено в коло нульового проводу, а другому каналі – з індуктивного датчика.

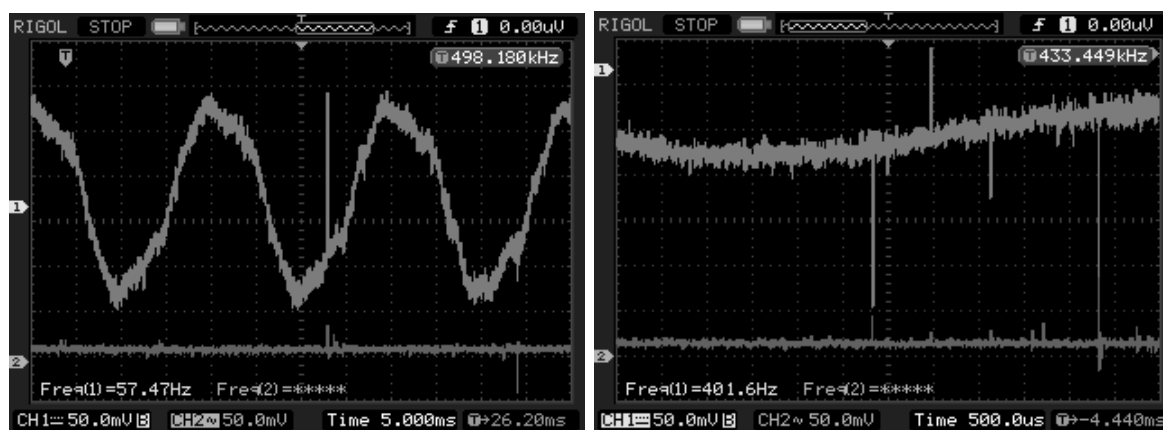


Рис. 2. Осцилограми розрядних процесів при напрузі 9 кВ на електродах камери обробки

При проведенні дослідних робіт у камеру для обробки рідини заливалася дистильована вода. Товщина шару води дорівнювала 5 мм, а шару повітря 15 мм.

Результати дослідження рН та ОВП протягом десяти днів після обробки наведено в табл. 1.

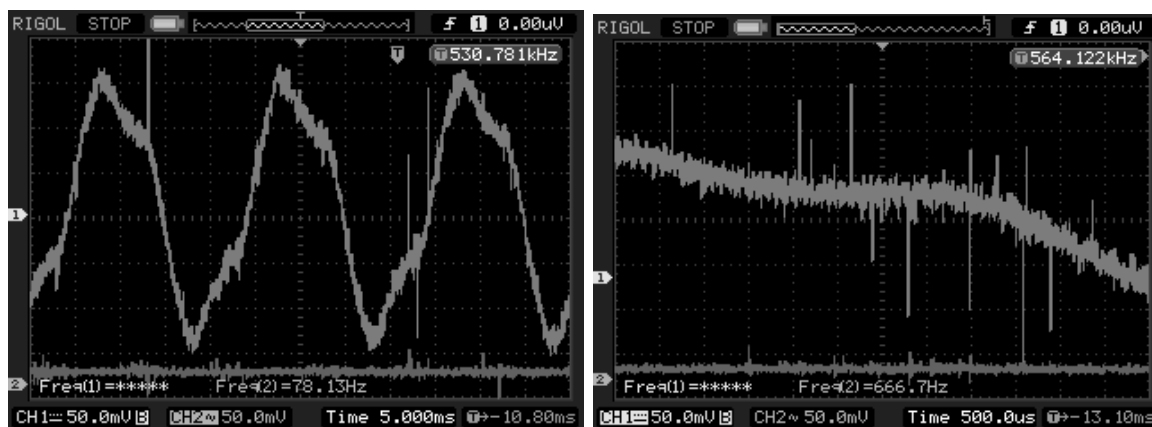


Рис. 3. Осцилограми розрядних процесів при напрузі 12 кВ на електродах камери обробки

1. Режими обробки дистильованої води та їхній вплив на ОВП та рН

Параметр	Контроль-ний зразок	Дослідний зразок				
		1	2	3	4	5
Час обробки, хв	-	0,5	1	2	3,5	5
Напруга, кВ	-	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
1 день рН	6,75	8,1	7,85	7,1	7,25	7,4
ОВП	140	181	167	157	190	116
2 день рН	7,3	7,8	7,85	7,2	7,3	7,39
ОВП	229	160	135	170	150	162
3 день рН	5,95	7,45	6,45	6,6	5,95	6,44
ОВП	220	176	215	200	230	140
6 день рН	7,35	7,92	7,2	7,15	6,3	7,6
ОВП	135	155	180	140	245	135
7 день рН	7,4	8,05	7,8	7,35	7,52	7,75
ОВП	210	140	130	155	145	165
8 день рН	7,2	7,9	7,35	7,05	7,31	7,55
ОВП	158	149	165	162	230	165
9 день рН	7,35	7,97	7,82	7,25	7,37	7,7
ОВП	157	158	155	157	156	163
10 день рН	7,27	8,05	7,85	7,25	7,53	7,65
ОВП	155	130	125	160	115	134

Величина ОВП і рН вимірювалися при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ за допомогою приладу “Иономер универсальный ЭВ – 74”. Для вимірювання використовувалися скляні електроди ЭВП – 1 та ЭСЛ – 43 – 07 із допоміжним електродом ЭВЛ – 1М1. Як об’єкт дослідження використовувалася дистильована вода. Початкове значення ОВП (без обробки) дорівнювало – 165 мВ, рН – 6,45.

Значення рН та ОВП дистильованої води через одну годину після обробки наведено на рис. 4.

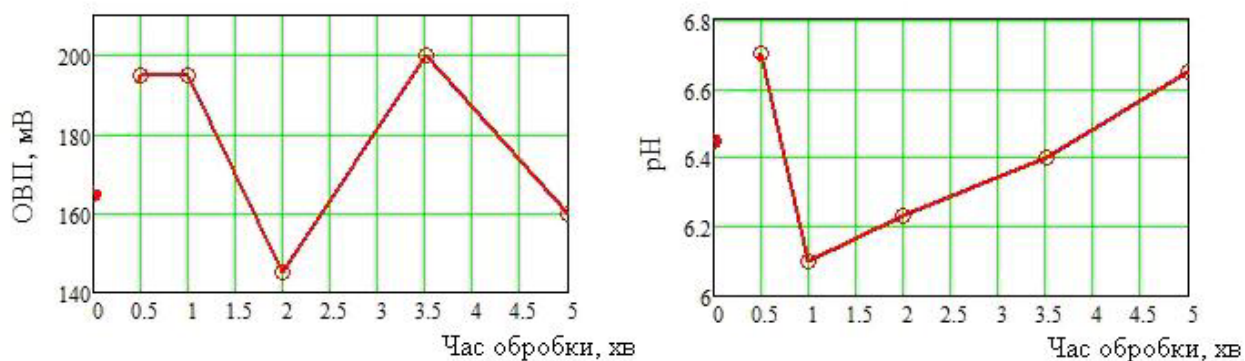


Рис. 4. Вплив часу обробки в електричному полі на ОВП та pH дистильованої води

Режими обробки води та результати дослідження електропровідності дистильованої води протягом 20 днів наведено в табл. 2.

2. Режими обробки дистильованої води та їхній вплив на питому електропровідність

Параметр		Контрольний зразок	Дослідні зразки				
			1	2	3	4	5
Напруга, кВ		-	10	10	10	10	10
Струм, мА		-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Час обробки, хв		-	0,25	0,5	1	3	5
Питома електропровідність, мС/см	2 год після обробки	25	28	28	29	27	38
	1 день після обробки	27	28	30	35	33	41
	3 дні після обробки	25	26	29	37	30	37
	7 днів після обробки	28	29	31	43	32	40
	9 днів після обробки	29	30	32	45	34	41
	12 днів після обробки	31	33	35	49	36	45
	15 днів після обробки	31	32	34	47	36	44
	17 днів після обробки	33	34	36	49	38	46
	20 днів після обробки	39	40	42	57	45	54

Питому електропровідність вимірювали протягом двадцяти днів після обробки. Дослідні зразки й контроль знаходилися в окремих непрозорих ємностях при лабораторній температурі.

З аналізу досліджень видно, що на двадцятий день третій та п'ятий дослідні зразки значно відрізняються від контрольних (на 46 % і 38 %). Практично не відрізняються від контрольних перший і другий зразки, які оброблялися протягом 15 і 30 с.

Висновки

У результаті досліджень встановлено, що сильні електричні поля впливають на електрофізичні властивості дистильованої води залежно від режиму обробки та часу експозиції.

При обробці дистильованої води значно змінюється рН, ОВП і електропровідність. Властивості обробленої води зберігаються протягом 10 – 20 днів.

Список літератури

1. Александров А.Б. Ионизация молекул воды в равномерном магнитном поле / А.Б. Александров, В.А. Харитонов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – М.: Колос, 2004. – №11. – С. 10 – 11.
2. Вплив електростатичного поля високої напруги та іскрового розряду на оптичний коефіцієнт пропускання водопровідної води / О.М. Берека, Л.С. Червінський, Ю.М. Чикін, С.М. Усенко // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – К.: НАУ, 2005. – № 3(12). – С. 62 – 68.
3. Дослідження впливу електростатичного поля високої напруги та іскрового розряду на рН і ОВП води / О.М. Берека, Л.С. Червінський, М.П. Салата, С.М. Усенко // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – К.: НАУ, 2005. – № 4(13). – С. 61 – 66.
4. Дураджи В.Н. Об электрическом импульсном разряде между металлическим и электролитным электродами / В.Н. Дураджи // Электронная обработка материалов. – Кишинев: ИПФ, 2001. – № 3. – С. 22 – 26.
5. Магнитная обработка поливочной воды в овощеводстве / З.И. Грязнова, В.Н. Шмигель, Т.Н. Стернова, Д.В. Селиверстов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – М.: Колос, 1999. – № 7. – С. 9 – 10.
6. Пат. на винахід № 80722 A23C 3/00, A23L 3/32, C02F 1/48. Спосіб електричної обробки рідин і рідких продуктів та пристрій для його здійснення / Берека О.М., Червінський Л.С., Салата М.П., Борщ Г.М. (Україна). – № а200503599; заявл. 18.04.2005; опубл. 25.10.2007. Бюл. №17.
7. Рукшан Л.В. Влияние кислотности воды, используемой при холодном кондиционировании, на технологические свойства зерна / Л.В. Рукшан // Хранение и переработка зерна. – Днепропетровск, 2006. – №11(89). – С. 31 – 32.
8. Хацуков С. М. Исследование свойств электроактивированной воды / С.М. Хацуков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – М.: Колос, 2003. – № 3. – С. 14 – 15.
9. Червінський Л.С. Оптичні технології в тваринництві / Л.С. Червінський. – К.: Наук. думка, 2003. – 229 с.

Рассмотрен способ обработки воды в сильном электрическом поле, приведены результаты исследований рН и ОВП дистиллированной воды в течение десяти дней после обработки в сильном электрическом поле.

Сильное электрическое поле, дистиллированная вода, электрофизические свойства, мука, увлажнение.

Considered the way of treating water in a strong electric field, submitted the results of studies of pH and ORP of distilled water for ten days after the treatment in the strong electric field.

A strong electric field, distilled water, electrophysical properties, flour, moisture.

УДК 621.311.1:63

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРАНСФОРМАТОРІ ТЕСЛИ

***В. В. Василенко, доктор технічних наук,
В. М. Комаров, аспірант****

Розглянуто електромагнітні процеси, що відбуваються в трансформаторі Тесли, та розроблено математичну модель цих процесів. При розробці математичної моделі використані експериментально визначені значення основних параметрів створеної в процесі дослідження фізичної моделі трансформатора Тесли. Використання математичної моделі дозволяє визначити раціональні значення основних параметрів трансформатора Тесли і здійснити проектування резонансних систем передачі електроенергії одним проводом.

Трансформатор Тесли, резонанс, коливальний контур, передача електроенергії.

Однією з найважливіших задач подальшого розвитку електрифікації сільського господарства є забезпечення надійного електропостачання автономних фермерських господарств і малих підприємств, віддалених від централізованих мереж електропередачі. Враховуючи той факт, що передача електроенергії здійснюється по проводах струмами провідності, втрати потужності на активному опорі проводів є неминучими. Ще в кінці XIX століття Н. Тесла розробив високочастотний трансформатор, названий його ім'ям, та на цій основі запропонував спосіб передачі електроенергії одним проводом і навіть без проводів, але ці винаходи за низкою певних причин донині практично не використовувались.

Проте аналіз наукових робіт в області електропостачання показав, що запропонований Н. Теслою спосіб передачі електроенергії одним проводом за допомогою високочастотного трансформатора є перспективним, особливо стосовно вказаної вище задачі [6]. На жаль, аналіз раніше виконаних наукових праць показав, що донині фізична сутність електромагнітних процесів, які відбуваються при передачі електроенергії одним проводом за допомогою трансформатора Тесли, досліджена не достат-

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

© В.В. Василенко, В.М. Комаров, 2013

Considered the way of treating water in a strong electric field, submitted the results of studies of pH and ORP of distilled water for ten days after the treatment in the strong electric field.

A strong electric field, distilled water, electrophysical properties, flour, moisture.

УДК 621.311.1:63

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРАНСФОРМАТОРІ ТЕСЛИ

***В. В. Василенко, доктор технічних наук,
В. М. Комаров, аспірант****

Розглянуто електромагнітні процеси, що відбуваються в трансформаторі Тесли, та розроблено математичну модель цих процесів. При розробці математичної моделі використані експериментально визначені значення основних параметрів створеної в процесі дослідження фізичної моделі трансформатора Тесли. Використання математичної моделі дозволяє визначити раціональні значення основних параметрів трансформатора Тесли і здійснити проектування резонансних систем передачі електроенергії одним проводом.

Трансформатор Тесли, резонанс, коливальний контур, передача електроенергії.

Однією з найважливіших задач подальшого розвитку електрифікації сільського господарства є забезпечення надійного електропостачання автономних фермерських господарств і малих підприємств, віддалених від централізованих мереж електропередачі. Враховуючи той факт, що передача електроенергії здійснюється по проводах струмами провідності, втрати потужності на активному опорі проводів є неминучими. Ще в кінці XIX століття Н. Тесла розробив високочастотний трансформатор, названий його ім'ям, та на цій основі запропонував спосіб передачі електроенергії одним проводом і навіть без проводів, але ці винаходи за низкою певних причин донині практично не використовувались.

Проте аналіз наукових робіт в області електропостачання показав, що запропонований Н. Теслою спосіб передачі електроенергії одним проводом за допомогою високочастотного трансформатора є перспективним, особливо стосовно вказаної вище задачі [6]. На жаль, аналіз раніше виконаних наукових праць показав, що донині фізична сутність електромагнітних процесів, які відбуваються при передачі електроенергії одним проводом за допомогою трансформатора Тесли, досліджена не достат-

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

© В.В. Василенко, В.М. Комаров, 2013

ньо, а принцип передачі електроенергії одним проводом потребує подальшого наукового обґрунтування.

Мета досліджень – розробка математичної моделі електромагнітних процесів, що відбуваються в передавальному та приймальному трансформаторах Тесли, які є основними функціональними елементами резонансної системи передачі електроенергії одним проводом.

Матеріали та методика досліджень. Для проведення розрахункових досліджень розглядається розроблена авторами фізична модель трансформатора Тесли, принципова схема якого показана на рис. 1. та використовуються методи комп'ютерного моделювання із застосуванням програмного пакета Matlab/Simulink.

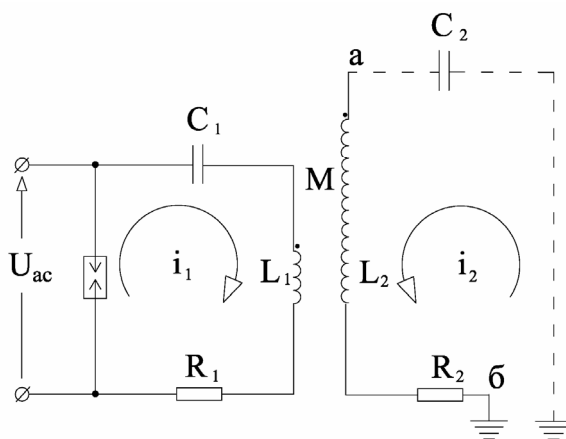


Рис. 1. Принципова схема трансформатора Тесли

Результати досліджень. Як видно з рис. 1, трансформатор Тесли складається з двох резонансних контурів. Складовими елементами первинного контуру є високовольтний конденсатор C_1 , який розряджається через розрядник на первинну обмотку з власною індуктивністю L_1 та опором R_1 . Вторинний контур являє собою розімкнену вторинну обмотку з власною індуктивністю L_2 та опором R_2 , один кінець a якої розімкнений, а інший $б$ заземлений. Цей контур також характеризується еквівалентною ємністю C_2 , яка з'єднує кінець обмотки вторинного контуру і землю (див. рис.1).

Проаналізуємо електромагнітні процеси, що відбуваються в трансформаторі Тесли. Перша фаза роботи трансформатора Тесли – це заряд високовольтної ємності C_1 через індуктивність L_1 котушки первинного контуру та її власний еквівалентний опір R_1 від джерела змінної напруги U_{ac} струмом i_1 . Після досягнення на конденсаторі C_1 напруги до рівня напруги пробію іскрового проміжку, виникає друга фаза роботи трансформатора Тесли, коли іскровий проміжок пробивається і конденсатор C_1 розряджається на первинну обмотку, а у вторинній обмотці індукується струм i_2 . Вторинний контур трансформатора Тесли складається з послідовно з'єднаної індуктивності L_2 вторинної обмотки зі своїм власним еквівалентним опором R_2 та ємності C_2 між кінцем вторинної обмотки та заземленням і утворює вторинний резонансний контур. Слід зазначити, що первинний та вторинний контур трансформатора Тесли зв'язані між со-

бою взаємною індуктивністю M , тому при замкненому іскровому проміжку енергія передається як від первинного контуру до вторинного, так і навпаки. Це має місце до моменту розмикання іскрового проміжку. Після чого процес заряду ємності C_1 та її розряду на трансформатор повторюється.

Енергія, що запасена в ємностях C_1 та C_2 двох резонансних контурів відповідно, визначається співвідношенням:

$$W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2}, \quad W_2 = \frac{C_2 U_2^2}{2}. \quad (1)$$

Звідки, виходячи із рівності цих енергій, знаходимо

$$U_2 = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} U_1. \quad (2)$$

Резонансні частоти первинного та вторинного контуру при мінімальному значенні коефіцієнта зв'язку однакові, звідки отримаємо:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}. \quad (3)$$

Аналізуючи описані співвідношення, отримаємо необхідну умову щодо залежностей параметрів для первинного та вторинного контуру трансформатора Тесли, які забезпечать максимальну передачу енергії від первинного контуру до вторинного:

$$L_1 C_1 = L_2 C_2. \quad (4)$$

Згідно з другим законом Кірхгофа для первинного і вторинного контуру маємо такі рівняння балансу напруги:

$$R_1 i_1 + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = 0; \quad (5)$$

$$R_2 i_2 + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0. \quad (6)$$

Для отримання значення напруги вторинного контуру U_2 на ємності C_2 , необхідно розв'язати вказану систему рівнянь. Це не складно зробити в ідеальному випадку при $R_1=R_2=0$. При цьому припущенні будемо мати такий вираз для розрахунку напруги на виводах вторинної обмотки трансформатора:

$$U_2(t) = \frac{2kU_1}{\sqrt{(1-T)^2 + 4k^2 T}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \sin\left(\frac{w_2 + w_1}{2} t\right) \sin\left(\frac{w_2 - w_1}{2} t\right), \quad (7)$$

де $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ – коефіцієнт зв'язку між первинною та вторинною обмот-

ками трансформатора.

$$\omega_1 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) - \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2 T}}{2(1-k^2)}};$$

$\omega_2 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) - \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2 T}}{2(1-k^2)}}$ – кутові резонансні частоти первинного та вторинного контуру з урахуванням взаємної індуктивності;

$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}, \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ – кутові резонансні частоти первинного та вторинного контуру;

$$T = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1}, \text{ - коефіцієнт настроювання.}$$

З рівняння (6) для напруги вторинного контуру можна зробити висновки, що вторинна напруга з високою частотою коливань $\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}$ підлягає амплітудній модуляції низькочастотним коливанням первинного контуру $\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}$.

Розробка імітаційної Simulink моделі експериментальної фізичної моделі трансформатора Тесли. При розрахунках використовувались такі значення параметрів трансформатора Тесли: $R_1=15,4 \cdot 10^{-3}$ Ом, $L_1=6,9 \cdot 10^{-6}$ Гн, $C_1=5,26 \cdot 10^{-9}$ Ф, $R_2=18,5$ Ом, $L_2=4,88 \cdot 10^{-3}$ Гн, $C_2=7,45 \cdot 10^{-12}$ Ф, $k=0,308$.

Розроблена імітаційна модель для аналізу електромагнітних процесів у трансформаторі Тесли в програмному середовищі Matlab/Simulink, показаному на рис.2, включає в себе елементні блоки R, L, C, M, блоки вимірювання електричних величин, а також віртуальні осцилографи для візуалізації результатів розрахунку.

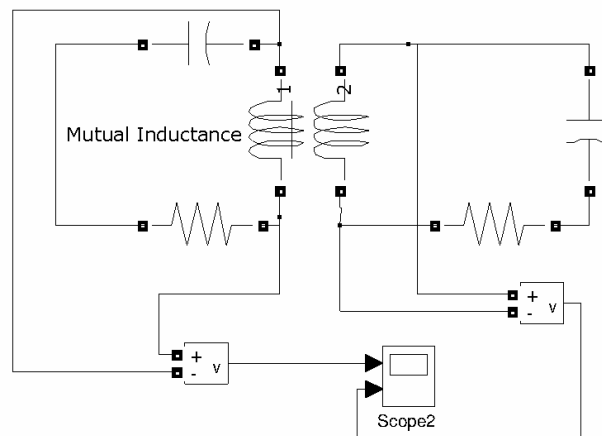


Рис. 2. Імітаційна модель трансформатора Тесли, розроблена у програмному середовищі Simulink

Результати розрахунку напруги в первинному та вторинному контурі при розряді ємності L_1 наведено на рис.3. Тут показано напругу на первинній обмотці з індуктивністю L_1 (верхня частина графіка), і напругу на вторинній обмотці з індуктивністю L_2 (нижня частина графіка). Як можна побачити, завдяки дисипативним процесам у контурах, напруга в них спадає із часом приблизно за 3 мс.

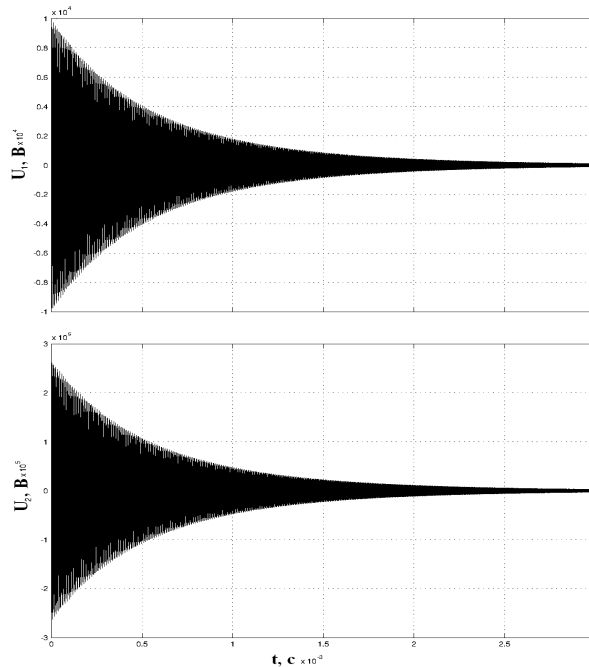


Рис. 3. Напруги первинної та вторинної обмоток трансформатора Тесли

Для деталізації форми напруги наведено графіки залежностей напруги в обмотках трансформатора Тесли у більшому масштабі за період часу $4 \cdot 10^{-5}$ с (рис. 4). Видно, що характер змінення напруги у часі збігається із виразом (6) і має дві характерні частоти.

Дослідження впливу коефіцієнта зв'язку k між первинним та вторинним контуром трансформатора Тесли показало, що він впливає на резонансну частоту первинної та вторинної обмотки, а також чисельно визначає швидкість передачі енергії від однієї обмотки до іншої і навпаки. Чим нижчий коефіцієнт зв'язку k , тим довше триває передача енергії від первинного контуру до вторинного і навпаки – зі збільшенням k збільшується час між вузлами напруги і струму. При розробці дослідних зразків з метою захисту розрядника від перегріву і подальшого виходу його з ладу коефіцієнт зв'язку приймають меншим 0,1. Два резонансних контури завжди будуть мати деяку частотну відмінність при робочому режимі з взаємною індуктивністю, оскільки на високих частотах з'являється міжвиткова ємність. Залежність впливу взаємної індуктивності і відповідно коефіцієнта зв'язку k на резонансні частоти первинного та вторинного контуру опишемо такими співвідношеннями:

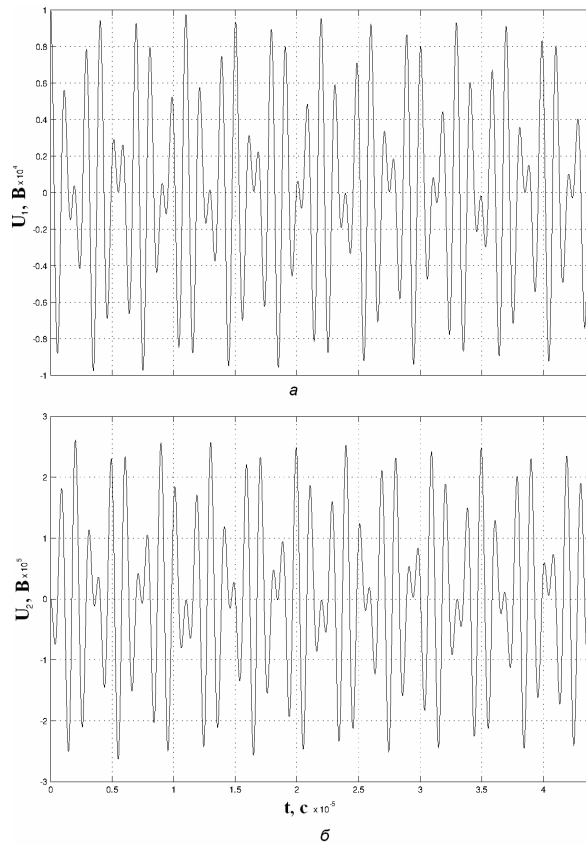


Рис. 4. Форма напруги в первинній(а) та вторинній(б) обмотці трансформатора Тесли

$$f_1 = \frac{f_r}{\sqrt{1+k}}, \quad f_2 = \frac{f_r}{\sqrt{1-k}}, \quad (7)$$

де f_1, f_2 – відповідно робочі частоти первинного та вторинного контуру з врахуванням впливу взаємної індуктивності, f_r – резонансна частота контурів без врахування взаємної індуктивності.

Графоаналітичні залежності повного опору від частоти при різних значеннях коефіцієнта зв'язку k наведено на рис. 5

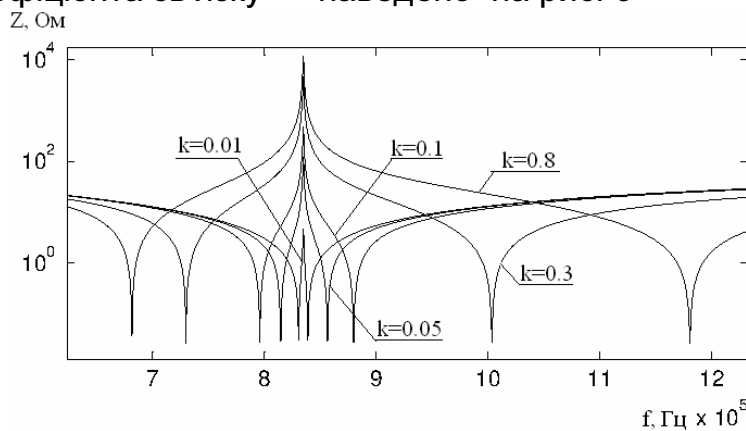


Рис. 5. Частотна характеристика трансформатора Тесли при різних значеннях коефіцієнта зв'язку k

Математична модель дає можливість визначення найраціональніших значень параметрів трансформатора Тесли, при яких досягається максимальні величини напруги в його вторинній обмотці.

Висновки

Розроблена математична модель електромагнітних процесів, що відбуваються в трансформаторі Тесли визначає значення параметрів трансформаторів Тесли за критерієм максимального значення напруги розімкненого контуру його вторинної обмотки. Ця модель може бути використана при проектуванні та вдосконаленні однопровідних систем передачі електроенергії резонансним методом. При цьому в математичній моделі використано експериментально визначені значення параметрів створеної фізичної моделі трансформатора Тесли, при яких забезпечуються мінімальні втрати електроенергії в обмотках передавального і приймального трансформаторів Тесли.

Список літератури

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1986. – 212 с.
2. Калашников С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. – М.: Наука, 1985. – 576 с.
3. Круг К. А. Основы электротехники / К. А. Круг – М.-Л.: Гос. энерг. изд-во., 1946. – 947 с.
4. Стребков Д.С. Резонансные методы передачи электрической энергии / Д.С. Стребков, А.И. Некрасов. – М.: ГНУ ВНЭСХ, 2006. – 304 с.
5. Tesla N. Apparatus for transmission of electrical energy US Patent № 649621 / 15.05.1900. – 17 с.
6. M. Denicolai, Report TKK-SJT-52, High Voltage Institute, Helsinki University of Technology, Helsinki, 2001.

Рассмотрены электромагнитные процессы, происходящие в трансформаторе Теслы, и разработана математическая модель этих процессов. При разработке математической модели использованы экспериментально определенные значения основных параметров созданного в процессе исследования физической модели трансформатора Теслы. Использование математической модели позволяет определить рациональные значения основных параметров трансформатора Теслы и осуществить проектирование резонансных систем передачи электроэнергии одним проводом.

Трансформатор Теслы, резонанс, колебательный контур, передача электроэнергии.

In this article shown electromagnetic processes occurring in Tesla Coil and developed math model of that processes. In time of development the mathematical model were used experimentally determined values of key parameters established in the research Tesla Coil model. Using this math model allows determinate optimal values of the basic parameters for Tesla Coil and to make the design and improvement of a resonance single-wire power electric transmissions systems.

Tesla coil, resonance, oscillation circuit, electric power transmission.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З КОМПЕНСОВАНИМ АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ ТА АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ СУМІРНОЇ ПОТУЖНОСТІ

***В. В. Козирський, доктор технічних наук,
Р. М. Чуєнко, кандидат технічних наук,
С. С. Макаревич, асистент***

Проведено експериментальні дослідження автономної системи електроживлення (АСЕЖ) з компенсованим асинхронним генератором та асинхронним електродвигуном сумірної потужності.

Автономна система електроживлення, компенсований автономний асинхронний генератор, асинхронний двигун, експериментальна установка.

Мета досліджень – за допомогою створеної лабораторної установки провести вивчення якісної картини дії фізичних процесів компенсованих асинхронних машин, отримання фактичних кількісних показників на реальній фізичній моделі, перевірка раніше отриманих результатів обчислювальних експериментів та підтвердження позитивних особливостей перед базовими машинами.

Матеріали та методика досліджень. У проблемній науково-випробувальній лабораторії кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання у співпраці із кафедрою електропостачання ім. проф. В. М. Синькова НУБіП України створено випробувальну лабораторну установку для експериментального дослідження компенсованих асинхронних машин АСЕЖ.

В АСЕЖ як приводний двигуна (ПД) для компенсованого асинхронного генератора застосовано двигун постійного струму незалежного збудження типу П41 з можливістю широкого і плавного регулювання швидкості. (рис. 1). У досліді компенсований автономний асинхронний генератор (КААГ) будь-якої модифікації за способом компенсації реактивної потужності і забезпеченню нею самого генератора створений на основі базового асинхронного електродвигуна з короткозамкнутим ротором 4А71В2 номінальною потужністю 1,1 кВт. При цьому, фаза обмотки статора генератора складається із двох однакових за числом витків паралельних напівобмоток, просторово зміщених у пазах сердечника одна відносно одної на кут $\Theta = -30^\circ$ з електричною ємністю C_Δ у розсічці однієї з них. Шунтування ємністю C_k додаткової напівобмотки КААГ дозволяє здійснювати форсування ємнісного збудження під час пуску робочого двигуна сумірної по-

тужності [4]. Як електромеханічне навантаження використано серійний асинхронний двигун 4A71A2 номінальною потужністю 0,75 кВт. Навантаженням робочого двигуна є навантажувальний генератор НГ з балансірною машиною для контролю і реєстрації моменту навантаження двигуна в усталеному режимі.

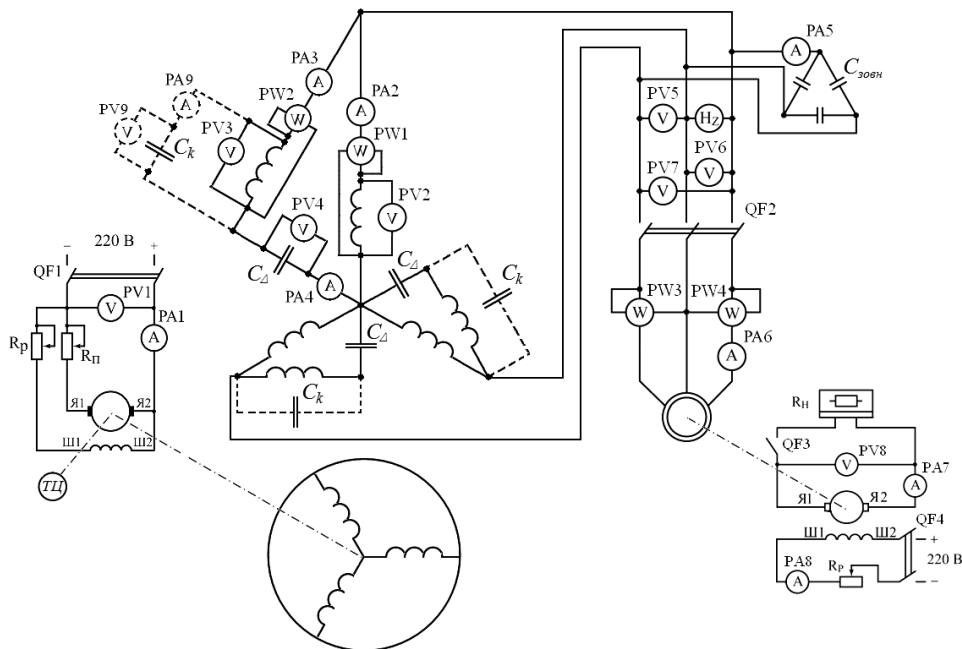


Рис. 1. Електрична схема лабораторної дослідної установки

Для порівняльної оцінки КААГ з базовою асинхронною машиною достатньо провести часткові випробування, що характеризують її основні властивості та особливості.

Випробувальний стенд лабораторної установки (див. рис. 1) містить різне за призначенням електрообладнання (таблиця, рис. 2) [3, 4].

Приводним двигуном (ПД) для досліджуваної у режимі генератора машини є двигун постійного струму типу П 41 номінальною потужністю 3,2 кВт і частотою обертання $n_H = 1500$ об/хв. Двигун з'єднаний з валом досліджуваного генератора через клинопасову передачу з передаточним числом рівним 2.

Асинхронний генератор виконаний на базі асинхронного двигуна типу 4A71B2 потужністю 1,1 кВт.

Вал асинхронного двигуна жорстко з'єднаний з валом навантажувального генератора (НГ) постійного струму типу П21 номінальною потужністю 1,5 кВт (частота обертання $n_H = 3000$ об/хв) за допомогою муфти. Навантажувальний генератор є елементом балансірної машини, станина статора якого виконана на двох стоякових підшипниках вала і може повертатися. Кут повороту станини здійснюється за рахунок навантаження (реостатом R_H) і обмежений стальними пружинами з боків. Стрілка на станині вказує на кут повороту залежно від величини гальмового моменту

НГ. Момент M на валу досліджуваного двигуна дорівнює сумі гальмового моменту M_z генератора і моменту ΔM на подолання втрат у ньому. Незалежне збудження обмотки статора генератора балансірної машини забезпечується від мережі постійного струму.

Перелік та технічні дані електрообладнання, що використовувалося при проведенні досліджень

№ з/п	Назва обладнання та приладів	Тип	Номінальна потужність, кВт
1	2	3	4
1	Компенсований автономний асинхронний генератор на базі серійного асинхронного електродвигуна	4A71B2	1,1
2	Електродвигун асинхронний	4A71A2	0,75
3	Приводний двигун постійного струму з балансірною машиною	П41У4	3,2
4	Генератор постійного струму	П21	1,5
5	Тахометр цифровий	ТЦ – 3М 0..8000 об/хв	–
6	Осцилограф	Metrix-3252	–
7	Модуль гальванічної розв'язки	SDI – AIU – 4U	–
8	Батареї електричних конденсаторів	КБГ-МН 400...600 В	–

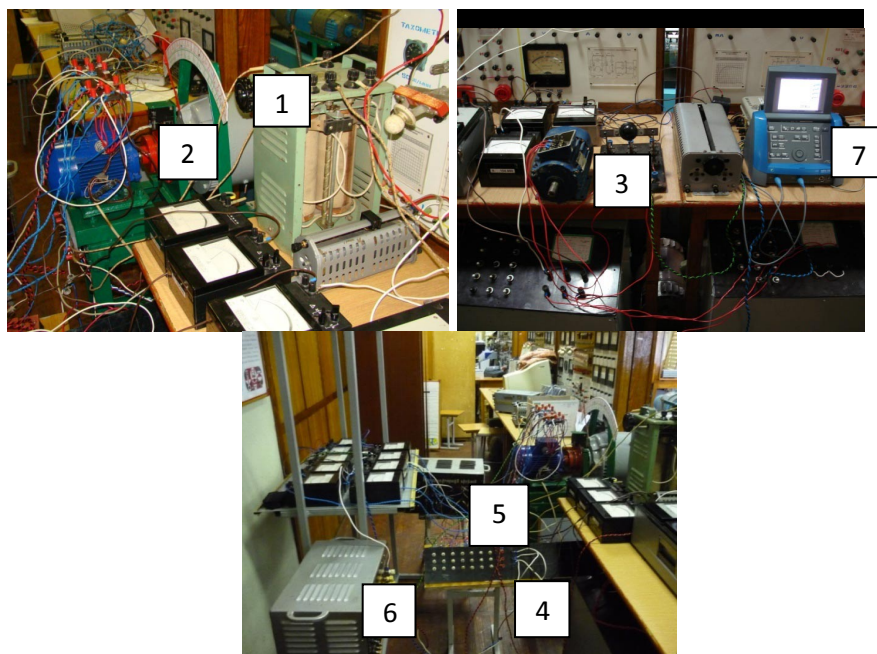


Рис. 2. Загальний вигляд експериментальної установки АСЕЖ з компенсованим асинхронним генератором та серійним асинхронним двигуном:
 1 – приводний двигун; 2 – асинхронний генератор; 3 – асинхронний двигун;
 4 – 6 – батареї електричних конденсаторів; 7 – осцилограф

Асинхронний двигун застосований як активно-індуктивне навантаження генератора.

Батареї електричних конденсаторів КБГ-МН на робочу напругу 400 і 600 В ємністю до 250 мкФ на фазу дозволяють регулювання ємності через 2 мкФ, магазин теплових елементів і реостатів.

Вимірювальні засоби представлені електровимірювальними комплектами К505, К506, набором амперметрів (Э 538, 539), вольтметрів (Э 545), ватметрів, трансформаторів струму (И54 М), цифровим тахометром (ТЦ – 3М до 8000 об/хв).

Для запису форми кривих напруги і струму статора генератора та двигуна використано осцилограф Metrix – 3252 з відповідним програмним забезпеченням та модулем гальванічної розв'язки SDI – AIU – 4U.

Дослідження електричних машин передбачають зняття характеристик холостого ходу, короткого замикання, робочих, пускових, теплових та вібро-акустичних [2].

Результати досліджень. Зазначимо деякі основні особливості характеристик компенсованих асинхронних машин (КАМ) у складі АСЕЖ.

Характеристика холостого ходу (х. х) асинхронних машин як залежність струму I_0 обмотки статора від напруги U знімається за відсутності навантаження – механічного на валу двигуна або електричного на виході генератора при постійній швидкості обертання ротора. При холостому ході у режимі двигуна швидкість обертання ротора знижується за рахунок механічних втрат, тобто стає меншою за швидкість обертання магнітного поля статора. Струм ротора, втрати потужності в обмотках ротора і сталі осердя наближаються до 0. Струм холостого ходу I_0 в обмотці статора визначає реактивну складову намагнічуючого струму I_μ та активну I_{0a} , що покриває втрати потужності. При малій напрузі ($0,1 \cdot U_n$ у режимі х. х) складно зберегти швидкість обертання ротора постійною. При цьому характеристика холостого ходу $U = f(I_0)$ відрізняється від типової кривої намагнічування $E = \varphi(I_\mu)$ асинхронної машини.

У досліді ідеального х. х приводний двигун розганяє ротор досліджуваної АМ зі швидкістю, що дорівнює швидкості обертання магнітного поля [1]. При цьому ЕРС обмотки ротора і струм дорівнюють нулю, відповідно втрати потужності в обмотці і сталі осердя ротора будуть відсутніми. Механічні і додаткові втрати потужності покриває привідний двигун. Тому струм обмотки статора I_0 у цьому випадку є мінімальним і наближеним до струму намагнічування I_μ , що створює основне магнітне поле, $I_0 \approx I_\mu$. Тільки невелика втрата напруги в обмотці статора $\Delta \dot{U}_0 = I_0(R_{10} + jX_{10})$ і втрати потужності $I_0^2(R_{10} + jX_{10})$ відрізняють напругу $\dot{U} = -\dot{E} + \dot{I}_0(R_{10} + jX_{10})$ від основної ЕРС і створюють кут зсуву фаз між $\dot{U}$ та $\dot{I}_0$ близький до 90° . За необхідності при заданих $U = \dot{U}$, R_{10} , X_{10} , вимірюваному струмі I_0 і втратах потужності $P_0 = I_0 \cdot U \cdot \cos \varphi_0$ можна уточню-

вати величину основної ЕРС E . При ідеальному х. х асинхронної машини $E = U$ характеристика х. х $U = f(I_0)$ наближена до характеристики кривої намагнічування $E = \varphi(I_\mu)$, оскільки струм холостого ходу практично дорівнює намагнічуючому, $I_0 \approx I_\mu$. Така крива намагнічення справедлива як для базової АМ, так і для всіх її модифікацій незалежно від схеми обмотки статора.

Наявність двох паралельних обмоток статора з ємністю в одній із них призводить до появи коливального контуру $L - C$ у КАМ. Відбувається обмін енергією між індуктивністю L та ємністю C навіть при х. х. [1]. Для КАМ справедлива крива намагнічування, що використовується при розрахунку характеристик, застосовуючи дані з дослідів ідеального х. х. базової АМ. Аналогічно для КАМ може бути прийнята і характеристика короткого замикання базової АМ. Тому в КАМ доцільно знімати експериментальні робочі характеристики методом безпосереднього навантаження.

Для роботи у режимі автономного асинхронного генератора (для забезпечення робочої частоти $f_1 \approx 50$ Гц і при роботі на загальну мережу з частотою 50 Гц) частота обертання вала генератора повинна бути $n \geq 3000$ об/хв. [4]. Частота струмів f_1 у статорі і f_2 у роторі зв'язані між собою співвідношенням $f_1 = \frac{f_2}{1 - S}$, де $S = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} < 0$ – ковзання генератора, $\omega = \omega_2 = \frac{\pi n}{30}$ (c^{-1}) – швидкість обертання ротора, $\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$ – швидкість обертання магнітного поля статора.

Приводний двигун забезпечує роботу генератора: у режимі безпосереднього навантаження – на загальну мережу, а в автономному режимі – на власне навантаження.

При роботі генератора на електричну мережу безпосередньо чи за схемою робоча напруга і частота задані (фіксовані) мережею. Активне навантаження регулюють моментом і швидкістю обертання приводного двигуна. Значення механічної швидкості ротора, частоти, ЕРС і струму задаються приводним двигуном більшими, ніж швидкість обертання електромагнітного поля статора та його частоти, $\omega_2 > \omega_1$, $f_2 > f_1$, $S < 0$.

Для цього заздалегідь виконано переключення ємності C_Δ в обмотках статора. При цьому, в АСЕЖ асинхронний генератор призначений для забезпечення електроенергією статичних (у вигляді електричних опорів) і динамічних (наприклад, електродвигунів) споживачів.

При включенні компенсованого асинхронного генератора для роботи на загальну мережу враховано зміну знака кута Θ між основною і додатковою обмотками статора (рис. 3).

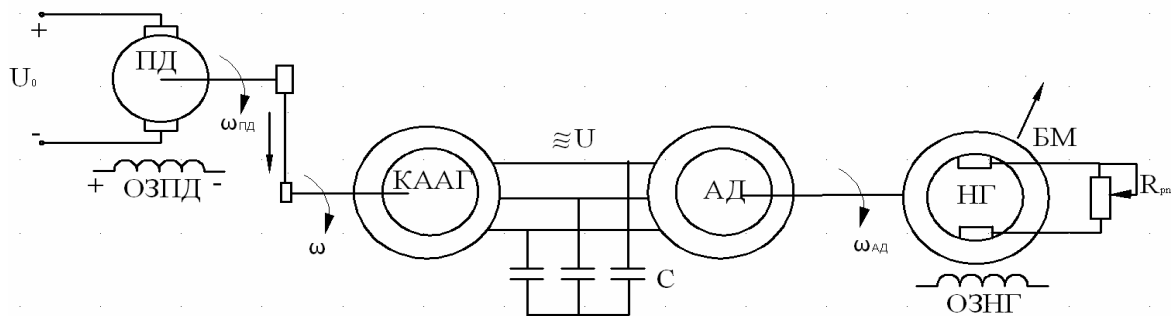


Рис. 3. Схема включення електричних машин у досліджуваному електро-механічному комплексі з асинхронними машинами різної модифікації.

Умовні позначення: ПД – приводний двигун, ОЗПД – обмотка збудження приводного двигуна, КААГ – компенсований автономний асинхронний генератор, АД – асинхронний двигун, НГ та БМ – відповідно навантажувальний генератор та балансирна машина, ОЗНГ – обмотка збудження навантажувального генератора, С – батарея конденсаторів, R_{pn} – регулювальний реостат

Для контролю швидкості приводного двигуна використовується цифровий тахометр. Контроль і реєстрація процесів, що протікають під час роботи АСЕЖ, здійснюється за допомогою осцилографа (зняття кривих напруг і струмів генератора, побудова зовнішніх характеристик).

Висновки

Розроблений спеціалізований стенд для експериментальних досліджень дозволив проводити випробування компенсованого асинхронного генератора та асинхронного двигуна автономного електромеханічного комплексу із заданими величинами зовнішньої та внутрішньої ємнісної компенсації. Як приводний був використаний двигун постійного струму незалежного збудження. Навантаженням асинхронного двигуна є навантажувальний генератор із балансирною машиною.

Список літератури

1. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И Вольдек. – Л.: Энергия, 1976. – 782 с.
2. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г.К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 407 с.
3. Компенсовані асинхронні машини: монографія / [В. І. Мішин, В. В. Каплун, Р. М. Чуєнко та ін.]. – К.: КНУТД, 2012. – 220 с.
4. Макаревич С. С. Автономні системи електроживлення з компенсованими асинхронними машинами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / С. С. Макаревич. – К., 2013. – 25 с.

Проведены экспериментальные исследования автономной системы электроснабжения (АСЭС) с компенсированным асинхронным генератором и асинхронным электродвигателем соизмеримой мощности.

Автономная система электроснабжения, компенсированный автономный асинхронный генератор, асинхронный двигатель, экспериментальная установка.

The experimental researches autonomous power supply system with compensated asynchronous generator and an induction motor of comparable capacity have done.

An autonomous power system, compensated autonomous asynchronous generator, induction motor, the experimental equipment.

УДК 536.24

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГІДРОДИНАМІКИ І ТЕПЛООБМІНУ В ОХОЛОДЖУВАЧАХ ПОВІТРЯ ПТАХІВНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ

**В.Г. Горобець, доктор технічних наук
В.І. Троханяк, аспірант***

Проведено математичне моделювання процесів масо- і теплопереносу в рекуперативних теплообмінниках для охолодження зовнішнього повітря, що надходить у пташники. Виконано інженерний розрахунок теплообмінника та проведено чисельне моделювання гідродинамічних та теплових процесів, використовуючи програмний продукт САПР ANSYS Fluent 14.0. Отримано розподіли швидкостей, тисків та температур у теплообміннику-рекуператорі.

Теплообмінник-рекуператор, математичне моделювання тепло- і масопереносу, інженерний розрахунок.

Тепловий режим пташників є одним із вирішальних факторів, які визначають продуктивність цієї галузі тваринництва. Утримання птиці в холодних, вологих приміщеннях з незадовільною вентиляцією призводить до зменшення приросту її ваги на 20–30 %, зниження несучості на 30–35 % 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 всередині приміщення, так і через його зовнішнє огороження. Він формується під впливом системи опалення та вентиляції залежно від метеорологічних параметрів зовнішнього повітря і теплотехнічних характеристик будівельних конструкцій.

* Науковий керівник – доктор технічних наук, В.Г. Горобець

© В.Г. Горобець, В.І.Троханяк, 2013

Автономная система электроснабжения, компенсированный автономный асинхронный генератор, асинхронный двигатель, экспериментальная установка.

The experimental researches autonomous power supply system with compensated asynchronous generator and an induction motor of comparable capacity have done.

An autonomous power system, compensated autonomous asynchronous generator, induction motor, the experimental equipment.

УДК 536.24

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГІДРОДИНАМІКИ І ТЕПЛООБМІНУ В ОХОЛОДЖУВАЧАХ ПОВІТРЯ ПТАХІВНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ

**В.Г. Горобець, доктор технічних наук
В.І. Троханяк, аспірант***

Проведено математичне моделювання процесів масо- і теплопереносу в рекуперативних теплообмінниках для охолодження зовнішнього повітря, що надходить у пташники. Виконано інженерний розрахунок теплообмінника та проведено чисельне моделювання гідродинамічних та теплових процесів, використовуючи програмний продукт САПР ANSYS Fluent 14.0. Отримано розподіли швидкостей, тисків та температур у теплообміннику-рекуператорі.

Теплообмінник-рекуператор, математичне моделювання тепло- і масопереносу, інженерний розрахунок.

Тепловий режим пташників є одним із вирішальних факторів, які визначають продуктивність цієї галузі тваринництва. Утримання птиці в холодних, вологих приміщеннях з незадовільною вентиляцією призводить до зменшення приросту її ваги на 20–30 %, зниження несучості на 30–35 % 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 всередині приміщення, так і через його зовнішнє огороження. Він формується під впливом системи опалення та вентиляції залежно від метеорологічних параметрів зовнішнього повітря і теплотехнічних характеристик будівельних конструкцій.

* Науковий керівник – доктор технічних наук, В.Г. Горобець

© В.Г. Горобець, В.І.Троханяк, 2013

Суть роботи полягає у проведенні теоретичних досліджень, пов'язаних з регуляцією теплообмінних процесів у пташниках, що відбуваються як всередині приміщення, так і через його зовнішні огороження залежно від метеорологічних параметрів зовнішнього повітря і теплотехнічних характеристик. Отримані дані розрахунків дають можливість провести правильний вибір будівельних конструкцій для систем опалення та вентиляції пташників,

Мета досліджень – створення математичної моделі переносу і проведення інженерного розрахунку та розрахунку локальних гідродинамічних і теплових характеристик теплообмінника регенеративного типу для охолодження повітря в пташниках за допомогою пакета САПР ANSYS Fluent 14.0, розробка нової конструкції теплообмінника-регенератора.

Матеріали та методика досліджень. Відомо, що мінімальна вентиляція працює в зимовий період і розраховується для видалення шкідливих речовин (аміак, вуглекислий газ, пил та волога) і забезпечення необхідної подачі повітря, насиченого киснем.

Перехідна вентиляція працює у весняно-осінній період. На зміну розповсюдження повітря по всьому пташнику, яке використовується при мінімальній вентиляції, поступово вмикається режим розповсюдження повітря по довжині пташника. Система вентиляції враховує температуру, вік птиці і обмежує швидкість повітряних потоків.

Тунельна вентиляція працює в літній період року (при температурі більше 26 °C). На цьому етапі важливо забезпечити видалення надлишкового тепла, яке створює птиця.

У комплекті з тунельною вентиляцією часто використовують охолоджувальні системи. У цьому випадку охолоджувальною системою буде рекуперативний теплообмінник.

При виборі напрямку руху теплоносія перевагу надають протитечії і перехресному потоку, для яких питоме теплове навантаження найвище [1]. Крім того, при протитечії холодний теплоносій може бути нагрітий до більш високої температури, ніж при прямоточній схемі апарата. Схема компоновки теплообмінника наведено на рис. 1.

Вибір матеріалу труб залежить від агресивності теплоносія. Для неагресивних середовищ при малих тисках і температурах застосовують сталі безшовні труби із сталі марок 10, 20, для агресивних – безшовні труби із легированих сталей, міді, алюмінію. Діаметр труб залежить від вибраного матеріалу та умов експлуатації. У наведеному випадку вибрано сталі безшовні труби із зовнішнім діаметром трубки 8 мм та товщиною стінки 1 мм.

Температура вхідного повітря в теплообмінник 40 °C, орієнтовна вихідна температура 19,5 °C. Масова витрата повітря на вході 43350 кг/год. Висота проходу для повітря в теплообмінника 1,001 м, ширина 1,006 м. Ширина міжтрубної відстані 0,005 м.

При розрахунку теплообмінника використано два підходи – виконано інженерний розрахунок теплообмінника та проведено чисельне моделювання процесів тепло- і масообміну, використовуючи пакет прикладних програм САПР ANSYS Fluent 14.0.

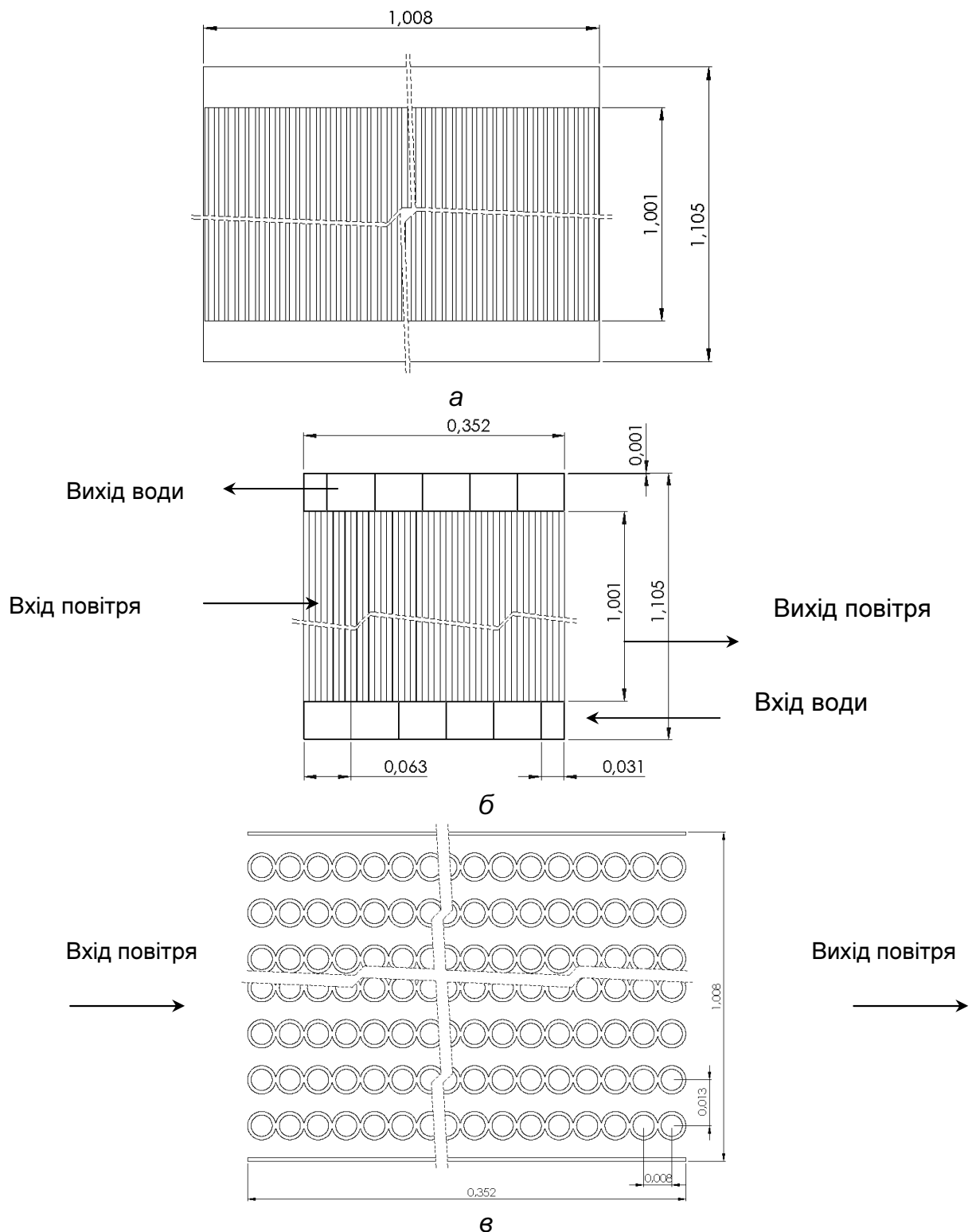


Рис. 1. Загальний вигляд кожухотрубного теплообмінника;
а – вигляд спереду; б – вигляд збоку; в – вигляд зверху

Інженерний розрахунок теплообмінника. Нижче наведено інженерний розрахунок теплообмінника системи вентиляції пташника, який виконується в такій послідовності.

Вибираємо кількість рядів труб, шт: $n_p = \frac{l - S}{S + d_{тр.зв}}$.

Знаходимо об'ємну витрату повітря, м³/с: $G = \frac{G_m}{\rho \cdot 3600}$.

Кількість теплоти, переданої від повітря до води, кВт:

$$Q = \frac{G_m}{3600} \cdot C_p (T_1' - T_1'').$$

Швидкість руху повітря на початку каналу, м/с: $W = \frac{G}{F_{пер} \cdot (n_p + 1)}$.

Еквівалентний діаметр трубного пучка, м: $d_{екв} = \frac{4 \cdot F_{пер}}{P_{пер}}$.

Коефіцієнт теплообміну для повітря, Вт/м²·°C: $\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{екв}}$.

Значення середньологарифмічної температури, °C: $\Delta T_{лог} = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}} \right)}$.

Кількість рядів труб, шт: $m = \frac{F_{пуч}}{F_{пер}}$.

Загальна довжина теплообмінника, м: $L_{тр} = m \cdot d_{тр.зв}$.

Результати розрахунку наведено в таблиці.

Порівняльна таблиця теплообмінників

Основний параметр теплообмінника	Традиційний теплообмінник	Запропонований теплообмінник
Кількість переданої теплоти від повітря до води, кВт	248,09	248,09
Температура води на виході з теплообмінника, °C	14	13,5
Швидкість руху повітря на початку каналу, м/с	17,85	27,2
Коефіцієнт теплообміну для повітря, Вт/м ² ·°C	88,46	229,28
Значення середньологарифмічної температури, °C	16,41	16,41
Еквівалентний діаметр теплообмінника, м	0,00673	0,00995
Довжина теплообмінника, м	2,35	0,352

Моделювання процесів масо- і теплопереносу теплообмінника для охолодження вентильованого повітря за допомогою САПР ANSYS Fluent 14.0. Розглядається стаціонарний, турбулентний потік нестисливого в'язкого газу. При цьому необхідно виконати умови прилипання частинок повітря до твердої стінки або відсутність ковзання газу по поверхні. Таким чином, виконуються граничні умови рівності нулю швидкості газу на поверхні нерухомих стінок.

Процес тепло- і масопереносу в теплообміннику можна описати за допомогою рівнянь [2]:

- рівняння руху в проекції на вісь Ox :

$$\frac{\partial v_x v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y v_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right);$$

- рівняння руху в проекції на вісь Oy :

$$\frac{\partial v_x v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_y v_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right);$$

- рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0.$$

де $\bar{v} = (v_x, v_y)$ – швидкість руху повітря, м/с; p – тиск, Па; ρ – густина повітря, кг/м³; μ – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с.

Граничні умови:

- із умов непротікання випливає:

$$x = 0; v_x = 0; x = L_x; v_x = 0;$$

$$y = 0; v_y = 0; y = L_y; v_y = 0;$$

- із умов прилипання випливає:

$$x = 0; v_x = 0; x = L_x; v_x = 0;$$

$$y = 0; v_y = 0; y = L_y; v_y = U.$$

де L_x і L_y – відповідно довжина і ширина каналу, м; U – швидкість руху повітря, м/с.

Нині існує велика кількість моделей турбулентності. Однак жодна з відомих моделей не є універсальною для всіх існуючих класів течій. Вибір оптимальної моделі турбулентності залежить від типу течії, необхідної точності рішення, доступних обчислювальних ресурсів тощо. З різноманіття загальноновизнаних моделей турбулентності можна виділити клас найбільш вживаних – RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) моделі, до яких належить сімейство k-ε моделей. У розглянутому випадку вибрано стандартну k-ε модель (KES) [3-5].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k(U_j - U_{g.j.})) &= P_k + P_b - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon(U_j - U_{g.j.})) &= \frac{C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon + C_{\epsilon 3} P_b}{T_t} - \\ &- C_{\epsilon 4} \rho \epsilon S_{kk} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + S_\epsilon \end{aligned}$$

Велика кількість інженерних гідродинамічних та теплових задач вирішується шляхом використання комерційних програмних пакетів. Розрахункова сітка створюється безпосередньо в пакеті або імпортується з іншого редактора. Нині у програмних пакетах використовуються два види

сітки: тетраїдальна і декартова. За допомогою тетраїдальної сітки можна створювати осередки, близькі за формою до границь розрахункової області і до зон з великими градієнтами швидкостей і температур, що дозволяє добре моделювати приграничні шари. У той же час, створення тетраїдальної сітки є дуже трудомістким. За допомогою декартової сітки можна створювати тільки прямокутні осередки, що може призвести до погіршення розв'язків рівнянь приграничного шару, проте декартова сітка є більш простою при її створенні.

Існує ряд способів, що дозволяють вирішувати рівняння переносу в області приграничних шарів за наявності високих градієнтів параметрів потоку. Прикладами таких способів є технологія АЛПС і технологія підсіточного дозволу геометрії, реалізовані в програмному комплексі ANSYS. Технологія АЛПС (адаптивна локально подрібнена сітка) дозволяє дробити вибрані осередки в усіх напрямках в задане число раз (адаптувати до заданого рівня). При цьому для осередків, що знаходяться поруч, сітка подрібнюється так, щоб розмір двох сусідніх осередків не відрізнявся більш, ніж в 2 рази. Подрібнення осередків можна задати як в тілі, так і на поверхні. Технологія підсіточного дозволу геометрії тіла дозволяє автоматично точно відтворювати форму поверхні. Вигляд такої сітки для кількох труб і елемента поверхні наведено на рис. 2.

Результати розв'язків показано на рисунках 3–6. На рис. 3 представлено розподіл температур в елементі теплообмінника для двох сусідніх рядів труб.

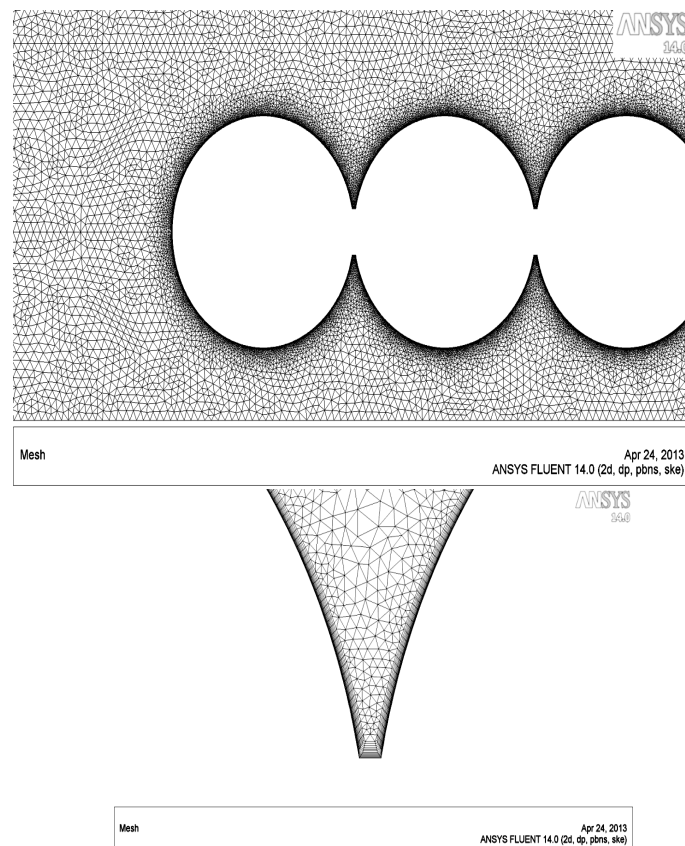


Рис. 2. 2D сітка (вигляд зверху)

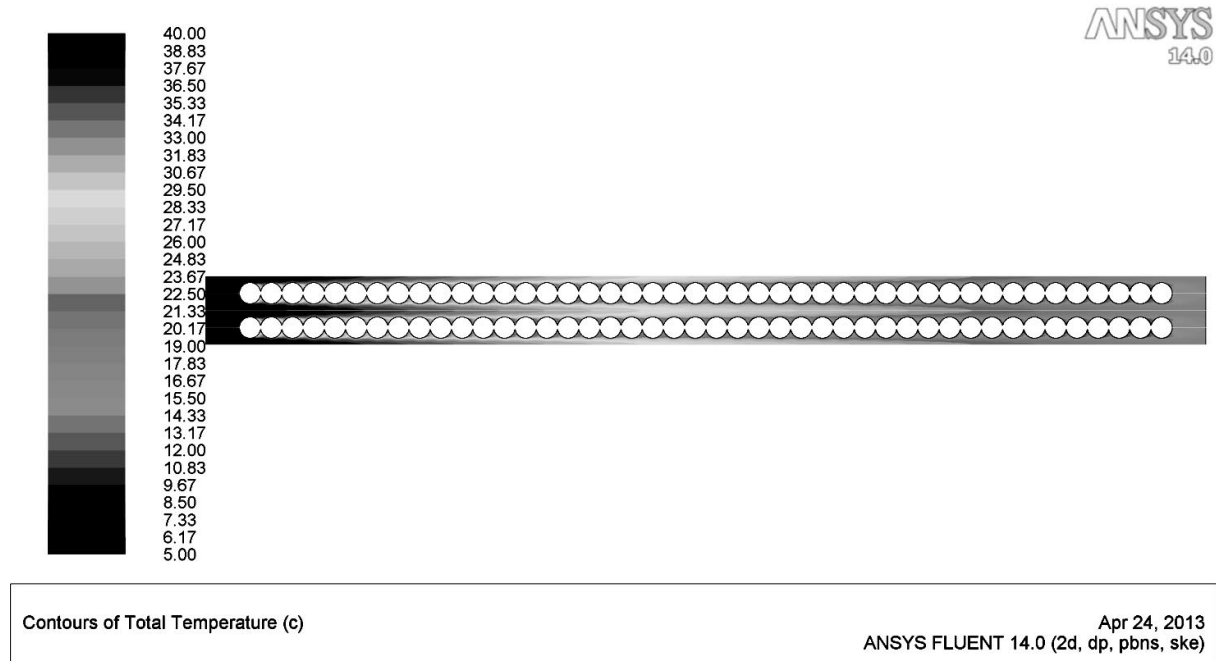


Рис. 3. Зміна загальної температури в каналі, °C

На рис. 4 показано розподіл усереднених значень температури повітря по центру каналу.

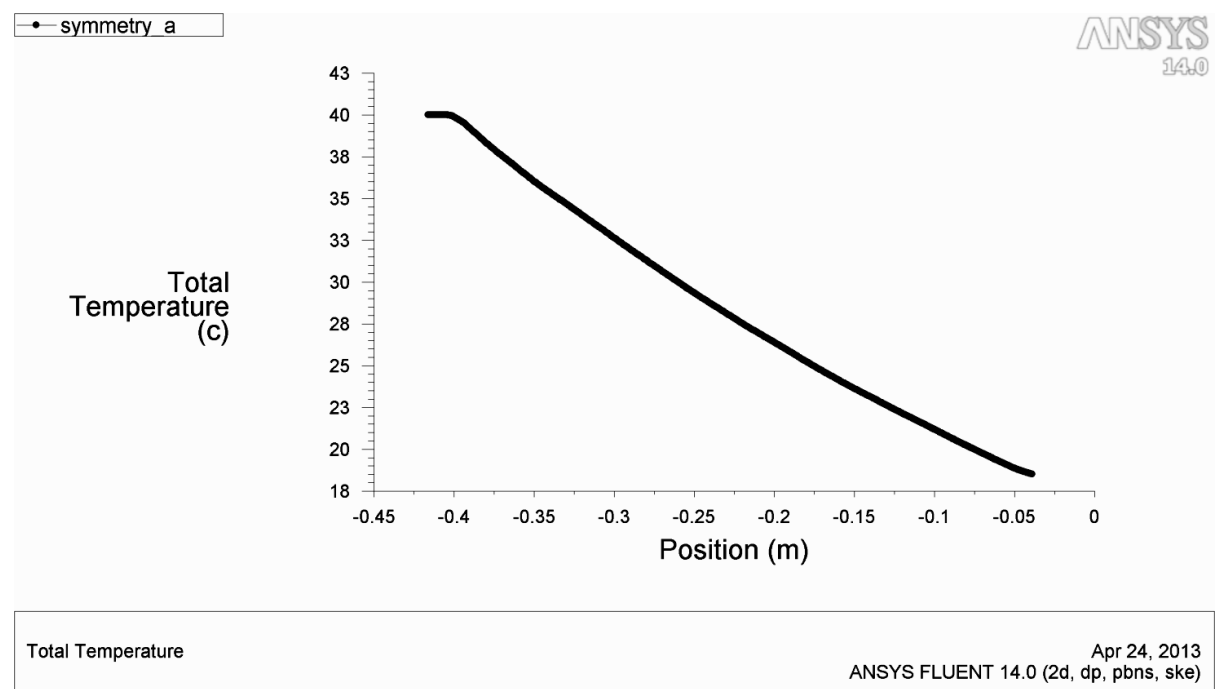


Рис. 4. Загальна температура всередині каналу, °C

Розподіл поля швидкостей в каналі теплообмінника наведено на рис. 5.

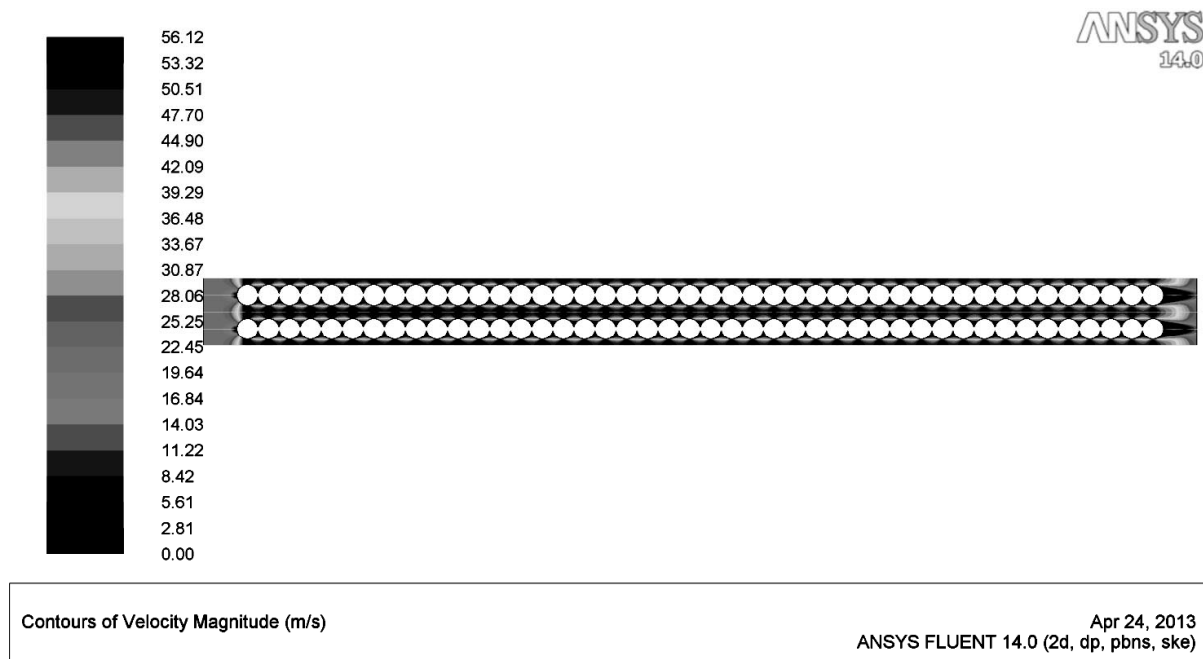


Рис. 5. Швидкість повітря в каналі, м/с

Детальні розподіли вектора швидкостей для елемента каналу показано на рис. 6.

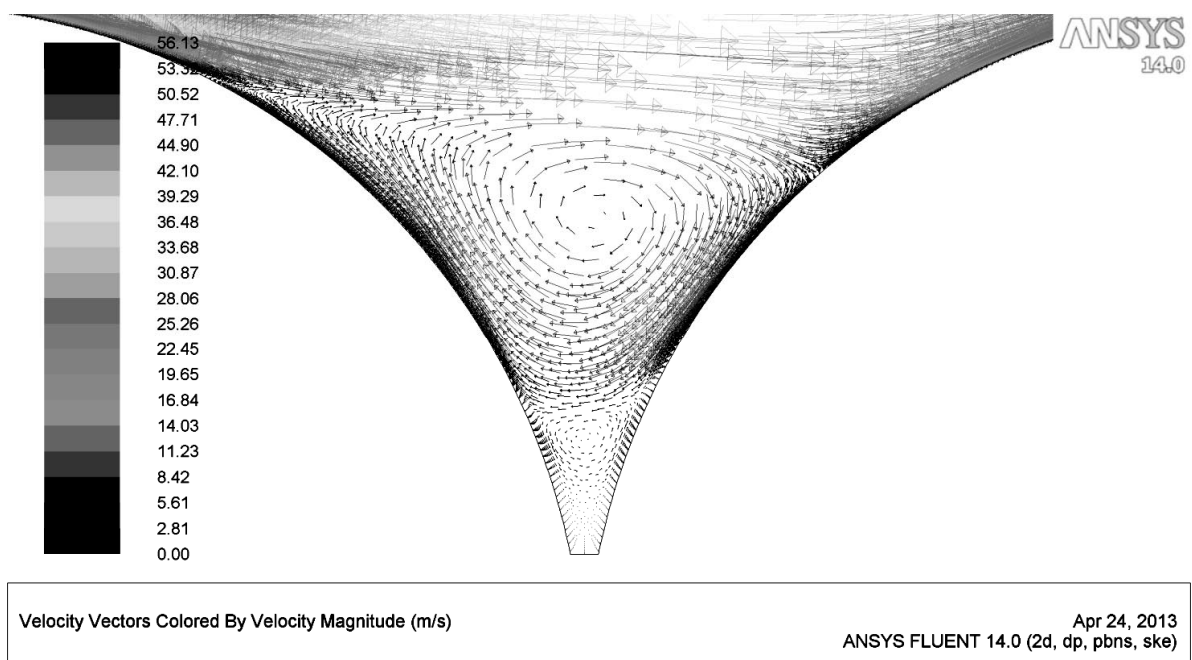


Рис. 6. Вектор швидкості, м/с

Результати досліджень. Таким чином, моделювання процесів масо- і теплопереносу з використанням пакета прикладних програм дає можливість визначити всі локальні гідродинамічні та теплові характеристики течії в каналах теплообмінника. Це, в свою чергу, дає змогу вибрати оптимальну геометрію теплообмінника.

При проведенні інженерних розрахунків отримано дані, які повністю підтверджуються розрахунками з використанням пакета САПР ANSYS

Fluent 14.0. Згідно з проведеними розрахунками швидкість повітря на вході в канал становить 27,3 м/с, температура повітря на вході 40 °С, на виході 19,5 °С. Коефіцієнт теплообміну на поверхні – 229,3 Вт/м²·°С. Значення середньологарифмічної температури 16,4 °С. Загальна довжина теплообмінника 0,352 м.

Крім вищенаведених розрахунків, був проведений розрахунок з традиційною геометрією циліндричного кожухотрубного теплообмінника з шаховим розташуванням труб, результати яких для порівняння наведено в таблиці. Використовуючи отримані результати, проведено їх порівняльний аналіз. Як витікає з проведених розрахунків кількість переданої теплоти від повітря до води, температура води на виході з теплообмінника, значення середньологарифмічної температури та еквівалентний діаметр суттєво не відрізняються. При цьому коефіцієнт теплообміну для повітря для нової конструкції теплообмінника збільшився у 2,5 раза, а довжина теплообмінника зменшилась у 6,5 раза.

Висновки

1. Проведено інженерний розрахунок кожухотрубного теплообмінника нової конструкції для охолодження повітря вентиляційної системи пташника. Знайдено, що його масогабаритні показники суттєво кращі, порівняно з відомими конструкціями.
2. Проведено чисельне моделювання процесів гідродинаміки та теплопереносу в теплообміннику нової конструкції за допомогою САПР ANSYS Fluent 14.0. Отримано локальні розподіли поля швидкостей, векторів швидкості та температур.
3. У результаті проведених інженерних та чисельних розрахунків запропоновано нову, ефективну конструкцію теплообмінника для охолодження повітря в пташнику для літнього періоду року.

Список літератури

1. Виноградов С.Н. Выбор и расчет теплообменников / Виноградов С.Н., Таранцев К.В., Виноградов О.С. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2001. – 100 с.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г.Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
3. Bardina J.E. Turbulence Modeling Validation, Testing and Development / Bardina J.E., Huang P.G., Coakley T.J, // California, NASA reports. – April, 1997, 88 с.
4. Hanjalic, K. Advanced Turbulence Closure Models: A View on the Current Status and Future Prospects, Int. J. Heat & Fluid Flow, 1994, vol. 15, pp. 178–203.
5. Speziale C.G. Modeling of Turbulent Transport Equations, in T. Gatski, M. Hussaini and J. Lumley, eds. Simulation and Modeling of Turbulent Flows. – Oxford University Press, 1996.

Проведено математическое моделирование процессов массо- и теплопереноса в рекуперативных теплообменниках для охлаждения наружного воздуха, поступающего в птичники. Выполнен инженерный расчет теплообменника и численное моделирование гидродинамических и тепловых процессов, используя программный продукт САПР ANSYS Fluent 14.0. Получены рас-

пределения скоростей, давлений и температур в теплообменнике-рекуператоре.

Теплообменник-рекуператор, математическое моделирование тепло- и массопереноса, инженерный расчет.

The mathematical modeling of mass and heat transfer in a recuperative heat exchanger to cool the outside air entering the poultry houses is performed. There are performed the engineering calculations and numerical modeling of hydrodynamic and thermal processes using CAD software ANSYS Fluent 14.0 for heat exchanger. The distribution of velocity, pressure and temperature in the heat exchanger, heat exchanger are found.

Heat exchanger, mathematical modeling of heat and mass transfer, engineering calculation.

УДК 62-533.65

АДАПТИВНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ «ТЕМПЕРАТУРА ПОВІТРЯ - ВРОЖАЙНІСТЬ ТОМАТІВ»

В.В Козирський, доктор технічних наук

І.М.Болбот, кандидат технічних наук

Ю.О. Батанов, аспірант*

Проаналізовано вплив температури повітря на врожайність томатів. Запропоновано адаптивну математичну модель, що дозволяє прогнозувати врожайність різних сортів томатів, враховуючи температуру повітря в теплиці.

Адаптивна математична модель, врожайність, мікроклімат, тепличне господарство, температура повітря.

Управління біотехнічними об'єктами в наш час вимагає від існуючих автоматичних систем керування в тепличних господарствах використання нових алгоритмів роботи, які б дозволили враховувати особливості біологічної складової. Використання адаптивної математичної моделі, визначення рівня врожайності дозволить враховувати реальну врожайність овочів. Тим самим математична модель процесу виробництва буде більш чітко наближена до своїх реальних значень.

Будуючи математичну модель рівня врожайності томатів виникають деякі труднощі. Так, неможливо побудувати математичну модель для різних сортів томатів, тому що рівень врожайності у них при різних температурах неоднаковий, виникає потреба в побудові адаптивної математичної моделі. Потрібно розглянути адаптивний алгоритм уточнення параметрів

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

© В.В. Козирський, І.М. Болбот, Ю.О. Батанов, 2013

пределения скоростей, давлений и температур в теплообменнике-рекуператоре.

Теплообменник-рекуператор, математическое моделирование тепло- и массопереноса, инженерный расчет.

The mathematical modeling of mass and heat transfer in a recuperative heat exchanger to cool the outside air entering the poultry houses is performed. There are performed the engineering calculations and numerical modeling of hydrodynamic and thermal processes using CAD software ANSYS Fluent 14.0 for heat exchanger. The distribution of velocity, pressure and temperature in the heat exchanger, heat exchanger are found.

Heat exchanger, mathematical modeling of heat and mass transfer, engineering calculation.

УДК 62-533.65

АДАПТИВНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ «ТЕМПЕРАТУРА ПОВІТРЯ - ВРОЖАЙНІСТЬ ТОМАТІВ»

В.В Козирський, доктор технічних наук

І.М.Болбот, кандидат технічних наук

Ю.О. Батанов, аспірант*

Проаналізовано вплив температури повітря на врожайність томатів. Запропоновано адаптивну математичну модель, що дозволяє прогнозувати врожайність різних сортів томатів, враховуючи температуру повітря в теплиці.

Адаптивна математична модель, врожайність, мікроклімат, тепличне господарство, температура повітря.

Управління біотехнічними об'єктами в наш час вимагає від існуючих автоматичних систем керування в тепличних господарствах використання нових алгоритмів роботи, які б дозволили враховувати особливості біологічної складової. Використання адаптивної математичної моделі, визначення рівня врожайності дозволить враховувати реальну врожайність овочів. Тим самим математична модель процесу виробництва буде більш чітко наближена до своїх реальних значень.

Будуючи математичну модель рівня врожайності томатів виникають деякі труднощі. Так, неможливо побудувати математичну модель для різних сортів томатів, тому що рівень врожайності у них при різних температурах неоднаковий, виникає потреба в побудові адаптивної математичної моделі. Потрібно розглянути адаптивний алгоритм уточнення параметрів

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

© В.В. Козирський, І.М. Болбот, Ю.О. Батанов, 2013

моделі на кожному кроці одержання інформації про об'єкт для нелінійної функції відносно невідомих параметрів моделі [3, 4].

Мета досліджень – визначення впливу температурного режиму на врожайність томатів та побудова адаптивної математичної моделі так, щоб її параметри постійно корегувалися, враховуючи вплив інших факторів мікроклімату на врожайність рослини.

Матеріали та методика досліджень. Проаналізовано джерела щодо впливу факторів навколишнього середовища на ріст та врожайність томатів. Методика дослідження ґрунтується на вивченні тепломасообмінних процесів, що протікають в об'єкті закритого ґрунту і впливають на показники росту і розвитку рослини.

З усього розмаїття факторів, що впливають на врожайність, найістотнішими є тепломасообмінні процеси. Аналіз літературних джерел [1, 6] свідчить про те, що всю кількість чинників, що впливають на рослину можна звести до світла, тепла, води, поживних речовин і вуглекислоти. Всі ці чинники рослина вбирає з навколишнього середовища, переробляє, частково засвоює і потім формується урожай. Цілком природно, щоб весь цей потік енергії і маси, що надходить до рослини, засвоювався рослиною в оптимальних кількостях. На рослини однаково негативно впливають і дуже малі, і дуже великі порції води, поживних елементів, тепла тощо. Враховуємо, що кожен з цих чинників є досить складним і багатокомпонентним, а одночасне їх поєднання призводить до дуже складної системи, що зумовлює формування врожаю в цілому [2, 5].

Світло – це один із основних факторів, що лімітують ріст і розвиток рослин. Томат дуже вимогливий до освітленості. Мінімальна освітленість, при якій ще можливий вегетативний ріст рослини 2 – 3 тис. лк. При освітленості нижче цього розпад асимілянтів на дихання перевищить їх прихід від фотосинтезу. При достатній наявності сонячних променів прискорюється розвиток рослин: вони раніше цвітуть і плодоносять. При похмурій, навіть теплій погоді, цвітіння затримується і плодоношення настає пізніше. При сонячному опроміненні 8 МДж (2,22 кВт·ч) на добу та звичайному вмісті в повітрі CO₂ (0,03 %), врожайність томатів коливається в межах 40 – 150 г з одного куща за добу і залежить від температури повітря [7], яка для фотосинтезу томату повинна знаходитися в межах 20 – 25 °С. (таблиця).

Вплив температури повітря в теплиці на врожайність томатів

Температура повітря, °С. (x_i)	16	19	22	25	28
Врожайність томатів, г. (y_i)	114	134	146	151	147

Результати досліджень. Розглянемо статистичні дані залежності врожайності томатів (y) від температури повітря (x) [3] (див. таблицю). Попередній розгляд таблиці наводить на думку, що модель цієї залежності є сумою двох експонент. Для зручності коефіцієнти a_1 , a_2 , a_3 , a_4 замінимо на a , b , c , d :

$$y = a \cdot e^{-b \cdot x} + c \cdot e^{-d \cdot x}, \quad (1)$$

де a, b, c, d – шукані параметри моделі.

Знайшовши значення величин $a_1, \dots, a_4$ визначаємо інтенсивність росту овочів залежно від температури.

На основі статистичних даних таблиці необхідно знайти невідомі параметри a, b, c, d . Функція (1) є нелінійною по b і d . Нехай нам відомі початкові значення a_0, b_0, c_0, d_0 . Припустимо, що $a = a_0 + z_1$; $b = b_0 + z_2$; $c = c_0 + z_3$; $d = d_0 + z_4$. Підставимо ці значення в умовні рівняння, розкладемо функції y_k в ряди за степенями z_1, z_2, z_3, z_4 і обмежимося в розкладі першими степенями поправок:

$$y_k(a_0, b_0, c_0, d_0) - y_k + \left(\frac{\partial y_k}{\partial a}\right)_0 z_1 + \left(\frac{\partial y_k}{\partial b}\right)_0 z_2 + \left(\frac{\partial y_k}{\partial c}\right)_0 z_3 + \left(\frac{\partial y_k}{\partial d}\right)_0 z_4 = 0 \quad (2)$$

або

$$\left(\frac{\partial y_k}{\partial a}\right)_0 = e^{-b_0 x_k};$$

$$\left(\frac{\partial y_k}{\partial b}\right)_0 = a_0 e^{-b_0 x_k} (-x_k);$$

$$\left(\frac{\partial y_k}{\partial c}\right)_0 = e^{-d_0 x_k};$$

$$\left(\frac{\partial y_k}{\partial d}\right)_0 = c_0 e^{-d_0 x_k} \cdot (-x_k).$$

Систему рівнянь (2) можемо записати у вигляді:

$$A \cdot z = b, \quad (3)$$

де $b_k = y_k - y_k(a_0, b_0, c_0, d_0)$

$$A = \begin{pmatrix} e^{-b_0 x_1} & -x_1 a_0 e^{-b_0 x_1} & e^{-d_0 x_1} & -x_1 c_0 e^{-d_0 x_1} \\ e^{-b_0 x_2} & -x_2 a_0 e^{-b_0 x_2} & e^{-d_0 x_2} & -x_2 c_0 e^{-d_0 x_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{-b_0 x_4} & -x_4 a_0 e^{-b_0 x_4} & e^{-d_0 x_4} & -x_4 c_0 e^{-d_0 x_4} \end{pmatrix}$$

Як відомо, розв'язок системи умовних рівнянь (3) має вигляд:

$$z = (A' \cdot A)^{-1} A' b; \quad (4)$$

Розв'язавши систему (4), знайдемо $a = a_0 + z_1$; $b = b_0 + z_2$; $c = c_0 + z_3$; $d = d_0 + z_4$.

Позначивши a, b, c, d через a_0, b_0, c_0, d_0 , робимо другу ітерацію, тобто знову знаходимо вектор b , а також матрицю A і розв'язуємо систему (4).

У нашому випадку, враховуючи дані таблиці, маємо:

$$b_1 = 134 - a_0 e^{-b_0 19} - c_0 e^{-d_0 19};$$

$$\begin{aligned}
b_2 &= 146 - a_0 e^{-b_0 22} - c_0 e^{-d_0 22}; \\
b_3 &= 151 - a_0 e^{-b_0 25} - c_0 e^{-d_0 25}; \\
b_4 &= 147 - a_0 e^{-b_0 28} - c_0 e^{-d_0 28};
\end{aligned}
\tag{5}$$

Матриця A матиме вигляд:

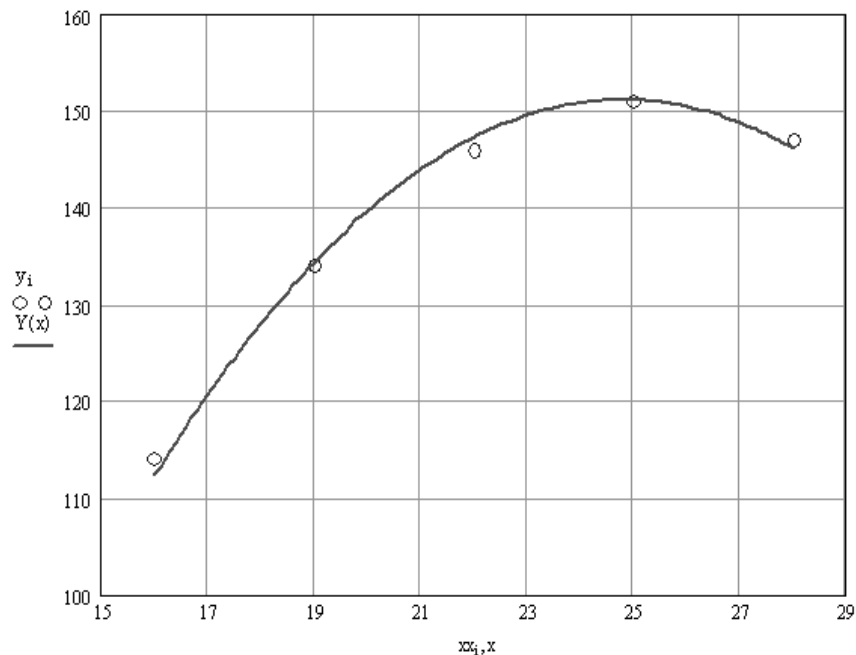
$$A = \begin{pmatrix} e^{-b_0 19} & -19a_0 e^{-b_0 19} & e^{-d_0 19} & -195c_0 e^{-d_0 19} \\ e^{-b_0 22} & -22a_0 e^{-b_0 22} & e^{-d_0 22} & -22c_0 e^{-d_0 22} \\ e^{-b_0 25} & -25a_0 e^{-b_0 25} & e^{-d_0 25} & -25c_0 e^{-d_0 25} \\ e^{-b_0 28} & -28a_0 e^{-b_0 28} & e^{-d_0 28} & -28c_0 e^{-d_0 28} \end{pmatrix}
\tag{6}$$

Розв'язавши систему умовних рівнянь (4) і враховуючи (5), (6), отримаємо $z_1; z_2; z_3; z_4$, тобто $a = a_0 + z_1; b = b_0 + z_2; c = c_0 + z_3; d = d_0 + z_4$. Припускаючи, що $a = a_0 + z_1; b = b_0 + z_2; c = c_0 + z_3; d = d_0 + z_4$ і повторивши розв'язання системи умовних рівнянь (4), отримаємо нове наближення невідомих a, b, c, d .

Процес наближення продовжується доти, поки вектор b не буде в межах заданої точності 5 % від y :

$$|y| \leq y_i \cdot 0,05. \tag{7}$$

Кінцевим результатом є одержання коефіцієнтів моделі a, b, c, d . Отримавши ці коефіцієнти, підставимо їх у рівняння (1) і одержимо необхідну математичну залежність врожайності рослини від температури в теплиці (рисунок).



Залежність врожайності томатів від температури повітря в теплиці:
 ooo – дослідні значення; ----- – результати апроксимації за виразом (1)

Адаптивна математична модель дозволяє спрогнозувати врожайність рослини томата, враховуючи рівень температури повітря в теплиці. При цьому коефіцієнти моделі постійно корегуються при кожній зміні параметрів моделі. Як вже зазначалось раніше, при зміні інтенсивності сонячного опромінення буде змінюватися і врожайність, тому слід розглядати врожайність томатів, враховуючи й інтенсивність сонячного опромінення.

Висновки

Запропонована адаптивна математична модель дозволяє спрогнозувати врожайність різних сортів томатів, враховуючи рівень температури повітря в теплиці. Коефіцієнти моделі корегуються при кожній зміні параметрів моделі, адаптивний алгоритм уточнює параметри моделі на кожному кроці одержання інформації про об'єкт.

Встановлено, що для зазначених умов при збільшенні температури повітря до 25 °C відбувається зростання врожаю, після чого будь-яке зростання температурного режиму вже не дає ніякого збільшення врожаю як в кількісному, так і в якісному виразах, більше того, відбувається його згасання.

Список літератури

1. Брызгалов В.А. Овощеводство защищенного грунта / В.А. Брызгалов, В. А. Советкина, Н. И. Савинова. – М.: Колос, 1999. – 352 с.
2. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж. – СПб.: 2006. – 290 с.
3. Разработка и анализ методов получения математических моделей механизмов регуляции сердечно-сосудистой системы / Г. Я. Минчук, И. П. Дрозд, И. А. Янович и др. // Чернобыль – 96. V Междунар. науч. – техн. конф.: тезисы докл. – Зеленый Мыс, 1996. – 86 с.
4. Советов Б. Я. Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М.: Высш. шк. 1998. – 260 с.
5. Торнли Дж.Г.М. Математические модели в физиологии растений / Дж.Г.М. Торнли; пер. с англ. Д.М. Гродзинского. – К.: Наук. думка, 1982. – 312 с.
6. Теплицы и тепличные хозяйства: справочник / Г.Г. Шишко, Потапов В.А., Сулима Л. Т., Чебанов Л. С. – К.: Урожай, 1993. – 424 с.
7. The Effect of Temperature and Mean Cumulative Daily Light Intensity on Fruiting Behavior of Greenhouse-grown Tomato: [Електрон. ресурс]. / Sezgin Uzun // The University of Ondokuz Mayıs, Faculty of Agriculture, Department of Horticulture. 2007. – 132(4). – р. 459–466. – Режим доступа: до журн.: <http://journal.ashspublications.org/content/132/4/459.full.pdf>

Проанализировано влияние температуры воздуха на урожайность томатов. Предложена адаптивная математическая модель, которая позволяет спрогнозировать урожайность разных сортов томатов, учитывая температуру воздуха в теплице.

Адаптивная математическая модель, урожайность, микроклимат, тепличное хозяйство, температура воздуха.

The analysis of the influence of temperature on the yield of tomatoes. The proposed adaptive mathematical model to predict the yield of different varieties of tomatoes given the level of air temperature in the greenhouse.

Adaptive mathematical model, yields, microclimate, greenhouses, temperature air.

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ ТА ЧАСТОТИ СТРУМУ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛОЧНИХ НАСОСІВ

В.В. Савченко, кандидат технічних наук

Проведено дослідження впливу відхилення напруги та частоти струму на кутову швидкість і технологічні характеристики молочних насосів. Встановлено залежності продуктивності, напору і потужності молочних насосів від напруги і частоти струму.

Молочний насос, електропривод, відхилення напруги, частота струму, продуктивність, напір, потужність молочного насоса.

Відхилення від нормованих значень напруги і частоти струму викликає порушення нормального ходу технологічних процесів, простої сільськогосподарських підприємств та випуск неякісної продукції, збільшення захворюваності та загибелі рослин і тварин, скорочення строку служби електрообладнання, зростання втрат електроенергії тощо [1].

Нині фактичне відхилення напруги в електромережах України значно перевищує допустиме значення. Математичне очікування відхилення напруги знаходиться в межах 16 %, а діапазон зміни напруги складає 15–28 % від номінального [4].

Внаслідок відхилення напруги або частоти струму змінюється кутова швидкість двигуна, яка, в свою чергу, обумовлює зміну технологічних характеристик робочих машин.

Мета досліджень – встановлення впливу відхилення напруги та частоти струму на технологічні характеристики молочних насосів.

Матеріали і методика досліджень. Аналіз зміни кутової швидкості електроприводів молочних насосів при відхиленні напруги і частоти струму проводився з використанням положень теорії електропривода, які стосуються електромеханічних властивостей асинхронних електродвигунів, приводних характеристик робочих машин і механізмів та застосуванням математичного моделювання.

При експериментальних дослідженнях напругу на двигуні змінювали за допомогою автотрансформатора, частоту струму – перетворювача частоти фірми «Mitsubishi» і при цьому визначали кутову швидкість, продуктивність, напір і потужність молочного насоса.

Результати досліджень. При відхиленні напруги механічна характеристика електродвигуна на робочій ділянці описується рівнянням [2]:

$$M_{\partial} = \beta_{\partial} U_{*}^2 (\omega_0 - \omega), \quad (1)$$

де M_{∂} – момент двигуна, Н·м; β_{∂} – жорсткість механічної характеристики електродвигуна, Н·м·с; ω_0 – синхронна кутова швидкість, с⁻¹; ω – задана кутова швидкість, с⁻¹; $U_{*}=U/U_H$ – напруга у відносних одиницях.

Механічна характеристика відцентрових молочних насосів має вигляд [3]:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (2)$$

де M_c – момент статичних опорів робочої машини, Н·м, при заданій кутовій швидкості; M_0 – початковий момент, Н·м; $M_{сн}$ – момент статичних опорів, Н·м, при номінальній кутовій швидкості; ω і ω_n – задане і номінальне значення кутової швидкості, с⁻¹.

В усталеному режимі роботи

$$\beta_o U_*^2 (\omega_0 - \omega) = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (3)$$

або

$$\beta_o U_*^2 (\omega_0 - \omega_n \omega_*) = M_0 + (M_{сн} - M_0) \omega_*^2, \quad (4)$$

де $\omega_* = \omega / \omega_n$ – кутова швидкість у відносних одиницях.

Після перетворень отримаємо:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0) \omega_*^2}{\beta_o (\omega_0 - \omega_n \omega_*)}}. \quad (5)$$

Як впливає із виразу (5), кутова швидкість молочного насоса при відхиленні напруги змінюється за складним алгоритмом.

Для відцентрових насосів [3] продуктивність

$$Q_* = \omega_*, \quad (6)$$

напір

$$H_* = \omega_*^2, \quad (7)$$

потужність

$$P_* = \omega_*^3. \quad (8)$$

Тоді закони зміни вказаних величин для молочного насоса при відхиленні напруги запишуться у вигляді:

для продуктивності молочного насоса:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0) Q_*^2}{\beta_o (\omega_0 - \omega_n Q_*)}}, \quad (9)$$

напору:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0) H_*}{\beta_o (\omega_0 - \omega_n \sqrt{H_*})}}, \quad (10)$$

потужності:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0) P_*^{2/3}}{\beta_o (\omega_0 - \omega_n \sqrt[3]{P_*})}}. \quad (11)$$

Проведені експериментальні дослідження зміни продуктивності, напору і потужності молочних насосів 36 МЦ6-12 та НМУ-6 при відхиленні

напруги підтвердили адекватність аналітичних формул (9)–(11). Результати досліджень наведено на рис. 1.

Як впливає із наведених залежностей, при відхиленні напруги продуктивність, напір та потужність молочних насосів змінюються за складними алгоритмами.

При зміні частоти струму механічна характеристика двигуна на робочій ділянці описується рівнянням:

$$M_{\partial} = \beta_{\partial} \left(\frac{2\pi f}{p} - \omega \right), \quad (12)$$

де f – частота струму, Гц; p – число пар полюсів.

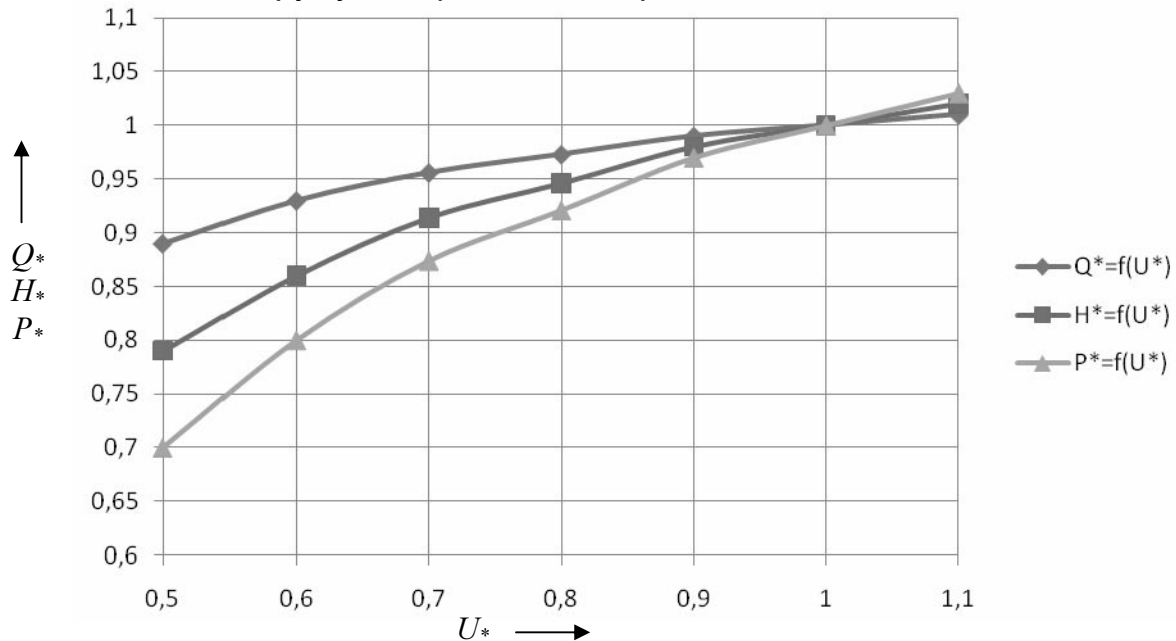


Рис.1. Залежності продуктивності (Q), напору (H) і потужності (P) молочного насоса від напруги u відносних одиницях

В усталеному режимі роботи

$$\beta_{\partial} \left(\frac{2\pi f}{p} - \omega \right) = M_0 + (M_{\text{сн}} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (13)$$

або

$$\beta_{\partial} \left(\frac{2\pi f}{p} - \omega_n \omega_* \right) = M_0 + (M_{\text{сн}} - M_0) \omega_*^2. \quad (14)$$

Синхронна кутова швидкість при номінальній частоті струму f_n визначається за виразом:

$$\omega_{0n} = \frac{2\pi f_n}{p}. \quad (15)$$

Тоді рівняння (14) можна записати у вигляді:

$$\beta_{\partial} (\omega_{0n} f_* - \omega_n \omega_*) = M_0 + (M_{\text{сн}} - M_0) \omega_*^2, \quad (16)$$

звідки отримаємо

$$f_* = \frac{M_0 + (M_{сн} - M_0)\omega_*^2 + \beta_o \omega_n \omega_*}{\beta_o \omega_{0n}}. \quad (17)$$

Якщо знехтувати початковим моментом $M_0=0$ і враховуючи те, що для двигунів з жорсткою механічною характеристикою $\omega_n \approx \omega_{0n}$, можна записати:

$$f_* = \omega_*. \quad (18)$$

Тоді для продуктивності, тиску, потужності молочних насосів при зміні частоти струму справедливі такі співвідношення:

$$Q_* = f_*; \quad (19)$$

$$H_* = f_*^2; \quad (20)$$

$$P_* = f_*^3. \quad (21)$$

Результати експериментальних досліджень зміни продуктивності, напору і потужності молочних насосів 36 МЦ6-12 та НМУ-6 при зміні частоти струму наведено на рис. 2.

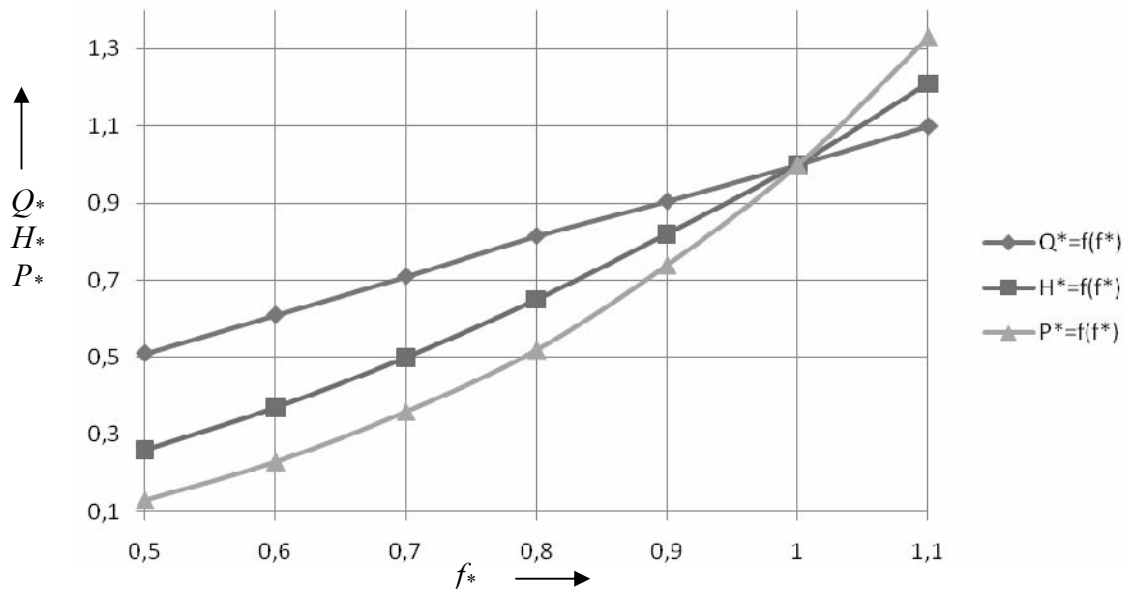


Рис. 2. Залежності продуктивності (Q), напору (H) і потужності (P) молочних насосів від частоти струму у відносних одиницях

Проведені дослідження показали, що при зміні частоти струму продуктивність відцентрових молочних насосів лінійно залежить від частоти струму, напір – від квадрата частоти струму, потужність – від куба частоти струму.

Висновки

При відхиленні напруги продуктивність, тиск і потужність молочних насосів змінюються за складними алгоритмами. При зниженні напруги на 20 % їх продуктивність знижується до 3 %, напір – до 5 %, потужність – до 8 %.

При зміні частоти струму продуктивність молочних насосів змінюється прямо пропорційно зміні частоти струму, напір – квадрату частоти струму, потужність – кубу частоти струму. При зниженні частоти струму на 2 % їх продуктивність зменшується на 2 %, напір – на 4 %, потужність – на 6 %.

Список літератури

1. Вплив якості електроенергії на функціонування споживачів у сільському господарстві / Д.Г. Войтюк, В.П. Лисенко, І.І. Мартиненко [та ін.] // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – №1(6). – С. 3–12.
2. Електропривод / [Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Савченко П.І. та ін.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: Ліра-К, 2009. – 504 с.
3. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / [Жулай Є.Л., Зайцев Б.В., Лавріненко Ю.М та ін.]; за ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.
4. Перова М.Б. Качество сельского электроснабжения: комплексный подход / Перова М.Б. – Вологда: Вологодский гос. техн. ун–т, 1999. – 72 с.

Проведены исследования влияния отклонения напряжения и частоты тока на угловую скорость и технологические характеристики молочных насосов. Установлены зависимости производительности, напора и мощности молочных насосов от напряжения и частоты тока.

Молочный насос, электропривод, отклонение напряжения, частота тока, производительность, напор, мощность молочного насоса.

The researches of influence of a voltage deviation and current frequency for angular speed and technical characteristics on pumps of milk are carried out. Dependences of productivity, pressure and capacity of pumps from the voltage and current frequency are established.

Pump of milk, electric drive, voltage deviation, current frequency, productivity, pressure, capacity of the milk pump.

УДК 631.589

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОВИТРАТ У ТЕПЛИЦІ

А.О. Дудник, аспірантка*

В.П. Лисенко, В.О. Мірошник, кандидати технічних наук

Наведено результати моделювання температурного режиму в теплиці на основі рівнянь тепло-масообміну з використанням середовища MATLAB. Визначено коефіцієнти багатопараметричної моделі для теплиці зимового типу, побудованої за сучасними голландськими типовими проектами.

Математична модель, теплиця, мікроклімат, температура, вологість.

Відомо, що підтримання оптимальної температури в теплиці, особливо в зимовий період, є найбільш енергозатратним фактором під час виробництва овочів. Крім того, температурний режим значно впливає на

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

© А.О.Дудник, В.П. Лисенко, В.О.Мірошник, 2013

Список літератури

1. Вплив якості електроенергії на функціонування споживачів у сільському господарстві / Д.Г. Войтюк, В.П. Лисенко, І.І. Мартиненко [та ін.] // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – №1(6). – С. 3–12.
2. Електропривод / [Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Савченко П.І. та ін.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: Ліра-К, 2009. – 504 с.
3. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / [Жулай Є.Л., Зайцев Б.В., Лавріненко Ю.М та ін.]; за ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.
4. Перова М.Б. Качество сельского электроснабжения: комплексный подход / Перова М.Б. – Вологда: Вологодский гос. техн. ун–т, 1999. – 72 с.

Проведены исследования влияния отклонения напряжения и частоты тока на угловую скорость и технологические характеристики молочных насосов. Установлены зависимости производительности, напора и мощности молочных насосов от напряжения и частоты тока.

Молочный насос, электропривод, отклонение напряжения, частота тока, производительность, напор, мощность молочного насоса.

The researches of influence of a voltage deviation and current frequency for angular speed and technical characteristics on pumps of milk are carried out. Dependences of productivity, pressure and capacity of pumps from the voltage and current frequency are established.

Pump of milk, electric drive, voltage deviation, current frequency, productivity, pressure, capacity of the milk pump.

УДК 631.589

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОВИТРАТ У ТЕПЛИЦІ

А.О. Дудник, аспірантка*

В.П. Лисенко, В.О. Мірошник, кандидати технічних наук

Наведено результати моделювання температурного режиму в теплиці на основі рівнянь тепло-масообміну з використанням середовища MATLAB. Визначено коефіцієнти багатопараметричної моделі для теплиці зимового типу, побудованої за сучасними голландськими типовими проектами.

Математична модель, теплиця, мікроклімат, температура, вологість.

Відомо, що підтримання оптимальної температури в теплиці, особливо в зимовий період, є найбільш енергозатратним фактором під час виробництва овочів. Крім того, температурний режим значно впливає на

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

© А.О.Дудник, В.П. Лисенко, В.О.Мірошник, 2013

фотосинтез у рослинах і пов'язаний з інтенсивністю сонячної радіації, яка залежить від тривалості світлового дня та зовнішніх погодних умов. Частина сонячної радіації є фотосинтетично активною (ФАР), тобто бере участь у процесі фотосинтезу, а решта, перетворившись в тепло, збільшує температуру в теплиці, при цьому збурюючи впливає на мікроклімат біотехнічного об'єкта. Таким чином, важливим завданням є синтез математичної моделі біотехнічного об'єкта, яка враховуватиме основні параметри мікроклімату та дозволить аналізувати такі її складові, які мають найбільшу вагу при використанні енергетичних ресурсів.

Мета досліджень – побудова імітаційної математичної моделі енерговитрат у теплиці зимового типу на основі рівнянь тепло-масообміну, що дозволить визначити кількість енергетичних ресурсів, необхідних для підтримання оптимальних параметрів мікроклімату при вирощуванні томатів.

Матеріали і методика досліджень. Під час проведення досліджень розглядалась теплиця зимового типу, встановлена у ПАТ «Комбінат «Тепличний» площею 3,6 га.

З метою полегшення управління мікрокліматом теплиця поділена на технологічні зони. З точки зору моделювання одну зону можна вважати об'єктом із зосередженими параметрами.

Конструктивні і теплофізичні характеристики зони теплиці:

1. Розміри секції – $4,5 \times 8 \text{ м} = 36 \text{ м}^2$.
2. Кількість секцій – 180 шт.
3. Площа теплиці – 6480 м^2 ($90 \times 72 \text{ м}$)
4. Висота колон у центрі – 4,5 м, по краях – 4 м.
5. Площа застклої поверхні $F_{ск} = 6480 \cdot 1,008 + 2 \cdot 4 \cdot 72 = 7108 \text{ м}^2$.
6. Товщина скла – 4 мм = 0,004 м.
7. Об'єм приміщення – $6480 \times 4,25 = 27540 \text{ м}^3$.
8. Довжина трубо-рельсових труб обігріву $10 \cdot 4,5 \cdot 180 = 8100 \text{ м}$.
9. Довжина труб опалення бокових стін $4 \cdot 2 \cdot 72 = 576 \text{ м}$.
10. Довжина розподільних ліній – 142 м, середній діаметр 0,127 м.
11. Поверхня труб обігріву $3,14 \cdot 0,051 \cdot (8100 + 576) = 1389 \text{ м}^2$.
12. Поверхня розподільних ліній $3,14 \cdot 0,127 \cdot 142 = 57 \text{ м}^2$.
13. Товщина стінки труби 2,25 мм = 0,00225 м.
14. Внутрішній об'єм труб обігріву – $3,14 \cdot 0,0465^2 / 4 \cdot 8676 = 14,73 \text{ м}^3$.
15. Внутрішній об'єм розподільних ліній – $3,14 \cdot 0,12^2 / 4 \cdot 142 = 1,61 \text{ м}^3$.
16. Температура гарячої води обігріву 95°C .
17. Температура повітря в теплиці 19°C .
18. Коефіцієнт огородження теплиці $1,097 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Для синтезу математичної моделі опалення теплиці використаємо одну зону теплиці (рис. 1), що складається із 180 секцій і яку будемо вважати об'єктом із зосередженими параметрами. Температура повітря в зоні теплиці t_p однакова для всього об'єму теплиці, а температура води в опалювальних трубах t_v має середньоарифметичне значення між вхідною температурою гарячої води t_g і температурою води на виході з теплиці t_y .

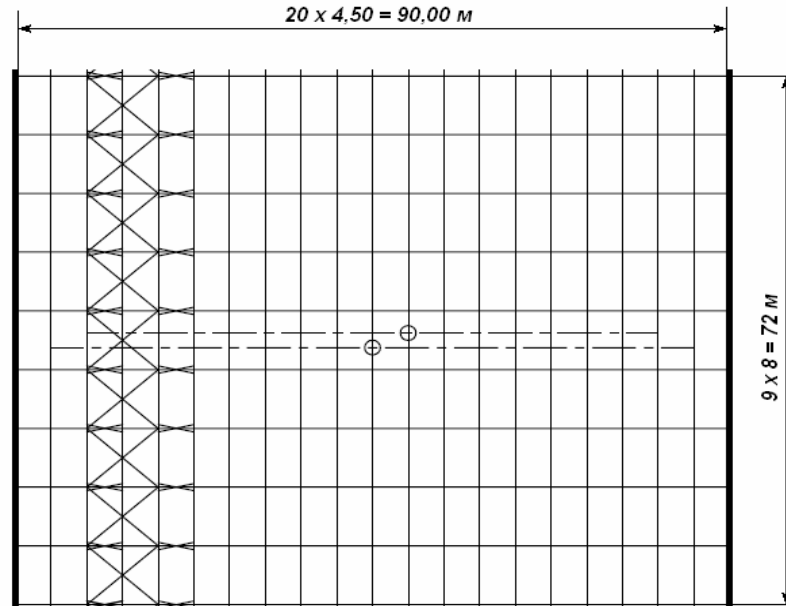


Рис.1. Схема зони теплиці

Складемо статичну модель технологічного об'єкта по каналу температури. Для цього представимо об'єкт у вигляді двох ланок, які акумулюють енергію – це ланка води, що підігрівається, і ланка повітря теплиці, яке нагрівається (рис. 2).

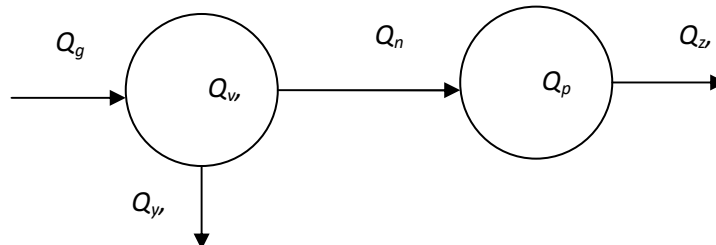


Рис. 2. Схема потоків тепла у теплиці

У статичному режимі кількість тепла, що знаходиться у воді Q_v і тепла, що знаходиться у повітрі теплиці Q_p лишається незмінним і тому можемо записати два рівняння теплових балансів, для води:

$$Q_g - Q_y - Q_n = 0 \quad (1)$$

і для повітря теплиці: $Q_n - Q_z = 0$,

де Q_g – кількість тепла, що надійшло з водою, Дж; Q_y – тепло, виведене з водою, Дж; Q_n – тепло, що перейшло до повітря, Дж; Q_z – тепло, втрачене в навколишній простір, Дж. Значення кількості тепла, що надійшло в систему опалення теплиці за секунду і вийшло з нею, залежить від теплоємності води C_v , продуктивності насоса G_n , густини води ρ_v і відповідної температури води, а значення кількості тепла, що знаходиться

в системі опалення також залежить від об'єму води в системі V_v . Відповідно до цього:

$$\begin{aligned} Q_g &= C_v G_n \rho_v t_g; \\ Q_y &= C_v G_n \rho_v t_y; \\ Q_v &= C_v V_v \rho_v t_v. \end{aligned} \quad (2)$$

Кількість тепла, що знаходиться в теплиці, залежить від теплоємності повітря C_p , густини повітря ρ_v , відповідної температури повітря t_p і об'єму теплиці V_p :

$$Q_p = C_p V_p \rho_p t_p. \quad (3)$$

Тепло, яке передається від води через стінку труби до повітря і від повітря через скло теплиці до навколишнього повітря визначається за законом Фур'є:

$$Q_n = k_1 F_t (t_v - t_p), \quad (4)$$

де k_1 – коефіцієнт теплопередачі через стінку труби системи; F_t – площа труби системи опалення теплиці, m^2 . Коефіцієнти теплопередачі визначаються за формулою:

$$k_1 = Nu_p \frac{\lambda_p}{D_{mp}}. \quad (5)$$

Значення характеристик повітря знаходимо залежно від температури повітря в діапазоні зміни температури від -50 до 60 $^{\circ}C$ на основі отриманих методом НК рівнянь.

Густина повітря, kg/m^3 :

$$\rho_p = 1,2934 - 4,8735 \cdot 10^{-3} \cdot t_p + 1,7287 \cdot 10^{-5} \cdot t_p^2. \quad (6)$$

Кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, m^2/s :

$$\nu_p = (13,3154 + 0,08647 \cdot t_p + 1,1144 \cdot 10^{-4} \cdot t_p^2) \cdot 10^{-6}. \quad (7)$$

Коефіцієнт теплопровідності повітря, $Вт/(м \cdot ^{\circ}C)$:

$$\lambda_p = (2,4373 + 7,8736 \cdot 10^{-3} \cdot t_p - 1,3487 \cdot 10^{-6} \cdot t_p^2) \cdot 10^{-2}. \quad (8)$$

Критерій Прандтля для повітря:

$$Pr_p = 0,70876 - 3,3487 \cdot 10^{-4} \cdot t_p - 2,1179 \cdot 10^{-6} \cdot t_p^2. \quad (9)$$

Коефіцієнт об'ємного розширення повітря, $1/^{\circ}K$:

$$\beta_p = \frac{1}{t_p + 273}. \quad (10)$$

Для знаходження критерію Нуссельта для тепловіддачі від горизонтальної труби до повітря використаємо формулу з [1]:

$$Nu_p = C (Gr_p Pr_p)^n, \quad (11)$$

де для комплексу $1000 < Gr_p Pr_p < 1 \cdot 10^9$ значення $C = 0,5$ а $n = 0,25$.

Значення комплексу $Gr_p Pr_p$ визначаємо за виразом:

$$Gr_p Pr_p = 9,81 \beta_p \frac{(t_v - t_p) D_{mp}^3}{\nu_p^2} Pr_p. \quad (12)$$

Тепло, яке втрачається крізь скло теплиці, отримуємо з використанням виразу:

$$Q_z = k_z F_c (t_p - t_z) \eta_o, \quad (13)$$

де k_z – коефіцієнт теплопередачі крізь скло поверхні теплиці; F_c – площа заскленої поверхні теплиці, m^2 ; η_o – коефіцієнт огороження теплиці, який дорівнює відношенню F_o/F . Коефіцієнт теплопередачі визначається за виразом:

$$k_z = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (14)$$

де α_1, α_2 – відповідно коефіцієнти тепловіддачі від повітря теплиці до скла стінки теплиці та від скла до зовнішнього повітря; λ_c – коефіцієнт теплопровідності скла стінки; δ_c – товщина скла, мм.

Коефіцієнт тепловіддачі від повітря теплиці до скла стінки теплиці приймаємо постійним $\alpha_1 = 6.4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$.

Коефіцієнт тепловіддачі від скла до зовнішнього повітря визначається на основі [2]:

$$\alpha_2 = Nu_z \frac{\lambda_z}{L_0}, \quad (15)$$

де L_0 – лінійний розмір секції теплиці, який дорівнює половині ширини секції 2,25 м, а значення критерію Нуссельта для зовнішнього повітря отримуємо з урахуванням швидкості зовнішнього повітря (кліматичні умови):

$$Nu_z = 0,67 Re_z^{1/2} \cdot Pr_p^{1/3}, \quad (16)$$

де критерій Рейнольдса знаходимо з рівняння:

$$Re_z = \frac{V_z L_0}{\nu_z}, \quad (17)$$

а V_z – швидкість повітря (вітру) на вулиці, м/с.

Теплофізичні характеристики води знаходимо з отриманих за методом НК рівнянь залежно від температури води.

Густина води, kg/m^3 :

$$\rho_v = 1000,6 - 0,0719 \cdot t_v - 3,5501 \cdot 10^{-3} \cdot t_v^2. \quad (18)$$

Теплоємність води, $Дж/кг \cdot ^\circ C$:

$$\lambda_p = (4,2074 - 1,4878 \cdot 10^{-3} \cdot t_v + 1,64695 \cdot 10^{-5} \cdot t_v^2) \cdot 1000. \quad (19)$$

Від статичної моделі перейдемо до динамічної. Враховуючи рівняння статички і наведені вище рівняння отримаємо систему диференціальних рівнянь зміни кількості тепла в часі у воді і повітрі теплиці. З урахуванням параметрів, які ми вважаємо незмінними, а саме: об'ємів середовищ, густини і теплоємності повітря та води похідні будуть визначатися за температурою (середньою) води t_v і температурою повітря t_p теплиці:

$$C_v V_v \rho_v \frac{dt_v}{d\tau} = C_g G_g \rho_g t_g - C_y G_y \rho_y t_y - \alpha_p F_t (t_v - t_p); \quad (20)$$

$$C_p V_p \rho_p \frac{dt_p}{d\tau} = \alpha_p F_t (t_v - t_p) - k_z F_c (t_p - t_z).$$

Вважаючи, що $t_v = (t_g + t_y)/2$, з наведеного рівняння знайдемо значення температури охолодженої води і підставимо в рівняння (20). Після спрощення приведемо рівняння (20) до вигляду Коші:

$$\begin{aligned} \frac{dt_v}{d\tau} &= \frac{C_g G_g \rho_g t_g - C_y G_y \rho_y (2t_v - t_g) - \alpha_p F_t (t_v - t_p)}{C_v V_v \rho_v}; \\ \frac{dt_p}{d\tau} &= \frac{\alpha_p F_t (t_v - t_p) - k_z F_c (t_p - t_z)}{C_p V_p \rho_p}. \end{aligned} \quad (21)$$

Результати досліджень. Для розрахунків значення втрат тепла в навколишнє середовище на основі [2] отримана залежність втрат тепла від швидкості вітру (м/с) і температури зовнішнього повітря (середньоквадратична похибка $\delta_q = 3,84$), яка є альтернативним рівнянням для розрахунків втрат тепла через огорожу теплиці:

$$l_z / \eta_o = 41,42143 + 20,1357V_z - 4,2552t_z - 0,5952V_z t_z - 1,6623V_z^2 + 0,08893t_z^2. \quad (22)$$

Визначаємо витрату теплоносія. При різниці температури теплоносія $= 95 - 70 = 25$ °С і тепловтратах шатра теплиці $Q_{ш} = 504,62$ Вт/м² за графіком (рис. 4) знаходимо витрату теплоносія $G_T = 17,2$ кг/год·м² або за формулою:

$$G_T = \frac{Q_{ш}}{C_v \Delta t} = \frac{504,62 \cdot 3600}{4,215 \cdot 10^3 \cdot 25} = 17,2 \text{ кг/год} \cdot \text{м}^2.$$

Визначаємо параметри системи опалення всієї секції площею $F_T = 6480$ м².

$$Q_{ш}^C = Q_{ш} \cdot 6480 = 504,62 \cdot 6480 = 3270 \text{ кВт}.$$

Витрата теплоносія в системі опалення:

$$G_T^C = G_T \cdot 6480 = 17,2 \cdot 6480 = 111,5 \cdot 10^3 \text{ кг/год}.$$

Перевіряємо режим руху теплоносія в системі опалення. Витрата теплоносія в системі опалення:

$$G_T^C = 111,5 \cdot 10^3 / \rho_g = 111,5 \cdot 10^3 / 970,5 = 114,9 \text{ м}^3/\text{год},$$

де $\rho_g = 970,5$ кг/м³ — густина теплоносія при $t_{cp} = 82,5$ °С.

При теплопостачанні від власної котельні для систем опалення шатра теплоносієм є вода температурою 95 – 70 °С. Для систем обігріву ґрунту теплиць прийнята вода температурою у прямому трубопроводі 40 °С.

У середовищі MATLAB синтезована імітаційна математична модель динаміки зміни середньої температури гарячої води і температури повітря в теплиці (рис. 3).

Дослідження цієї імітаційної моделі показали, що для досягнення заданої температури повітря в теплиці 19 °С температура гарячої води становитиме 95 °С. Температура води на виході із системи – 88 °С, при середній температурі води 91,5 °С. Реально система стабілізується по температурі води за період 500 с, а по температурі повітря в теплиці 1250 с. На розгінних кривих видно час запізнення об'єкта 100 с (рис. 4).

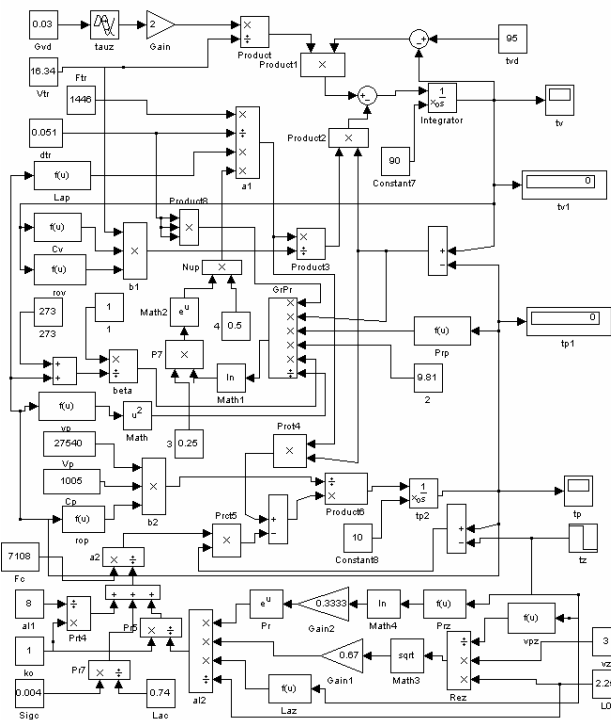


Рис. 3. Блок-схема моделі енерговитрат у теплиці з використанням пакета Simulink

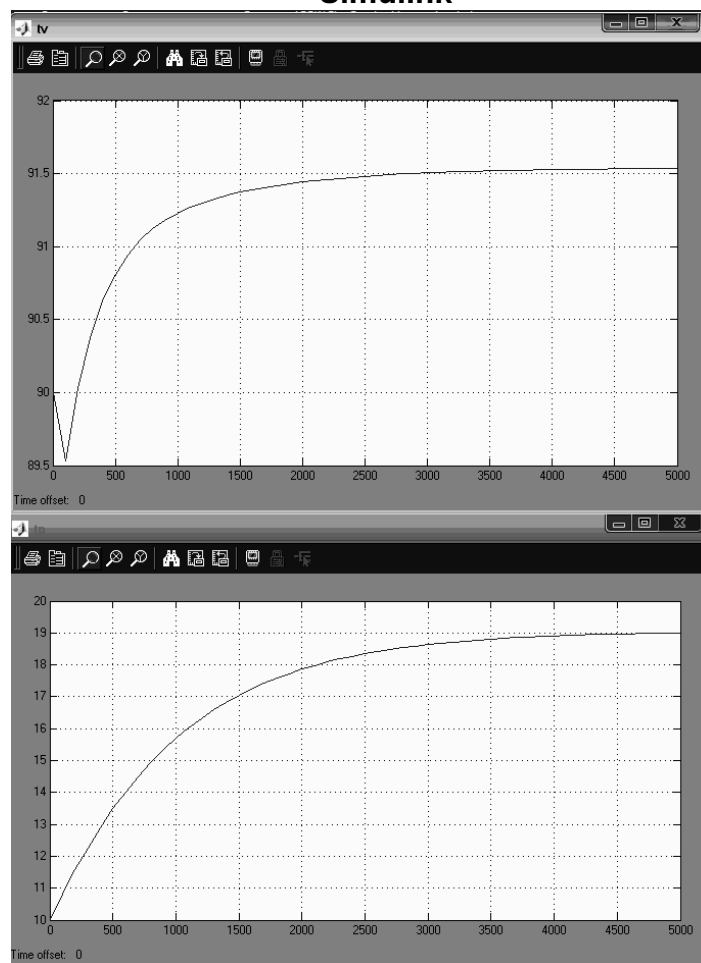


Рис. 4. Динаміка зміни середньої температури гарячої води (верхній графік) і температури повітря (нижній графік) у теплиці

У результаті розрахунку теплового балансу при температурі повітря в теплиці 18 °С, зовнішній температурі -15 °С, середній температурі води в опалювальній системі 82,5 °С, отримано графік кількості теплоти у теплиці протягом дня (рис. 5).

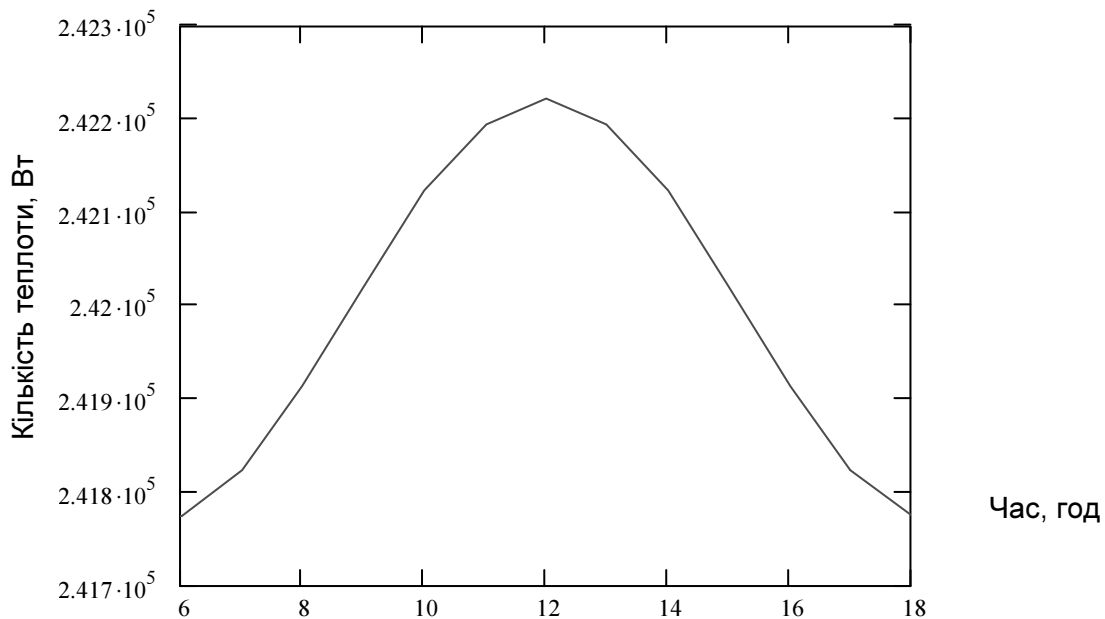


Рис. 5. Зміна кількості тепла у теплиці протягом дня

Використовуючи режимну карту котла, встановленого у цеху № 9 ПАТ «Комбінат «Тепличний», можна визначити витрати природного газу (рис.6) на опалення теплиці (вважаємо, що в зимовий період котел працює на повну потужність).

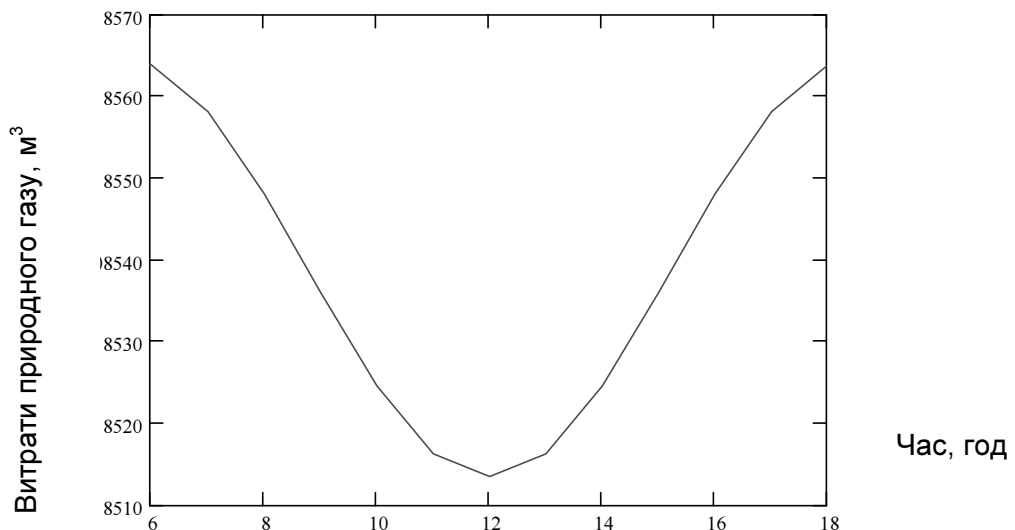


Рис. 6. Витрати природного газу на опалення теплиці в зимовий період

Таким чином, кількість необхідного природного газу для підтримання заданої температури в теплиці протягом дня зменшується ближче до денних годин і збільшується вночі. Це пояснюється впливом сонячної радіації на тепловий баланс теплиці.

Удосконалення моделі теплообміну в теплиці можливе з урахуванням тепла від сонячного випромінювання для нагрівання повітря, а також втрат тепла з вентиляційним повітрям. Також модель міститиме рівняння процесу фотосинтезу рослин залежно від температурного режиму теплиці, освітлення і подачі вуглекислого газу CO_2 , який пов'язаний з режимом вентиляції.

Завершальним етапом побудови моделі є оптимізація роботи тепличного комплексу за допомогою рішення багатокритеріальної задачі. Прикладом такого рішення є приведення багатьох локальних критеріїв до однієї цільової функції за допомогою методу з використанням узагальненої функції бажаності, запропонованої Е.Харрінгтоном, яка може описуватись рівнянням узгоджених добутоків:

$$F(x) = \prod_{k=1}^s f_k(x)^{\lambda_k} \rightarrow \max, \quad (23)$$

де локальними критеріями f_k можуть бути приріст маси рослин за допомогою фотосинтезу, витрати енергії на нагрів повітря в теплиці і вентиляцію, витрати CO_2 на підживлення рослин, а λ_k – ваговий

коефіцієнт; при $\lambda_k \geq 0$, $\sum_{k=1}^s \lambda_k = 1$.

Висновки

Отримано імітаційну математичну модель енерговитрат у теплиці за рахунок теплообміну, визначено коефіцієнти теплопередачі та значення температури гарячої води, необхідної для підтримання заданої температури повітря в теплиці. Зазначені розрахунки проводились для сучасної теплиці зимового типу, яка побудована за голландською технологією та встановлена у ПАТ «Кобінат «Тепличний» Броварського району Київської області.

Список літератури

1. Ивахненко А.Г. Помехоустойчивость моделирования. / А. Г. Ивахненко, В.С. Степашко – К.: Наук. думка, 1985. – 216 с.
2. Исаченко В.П. Теплопередача: учеб. для вузов. – [3-е изд.] / Исаченко В.П., Осипова В. А., Сукомел А. С.. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
3. Куртнер Д.А. Климатические факторы и тепловой режим в открытом и защищенном грунте. /Д.А. Куртнер, И. Б. Усков. – Л.: Гидрометеоздат, 1982. – 231 с.
4. Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption / X. Blasco [et al] // Computers and Electronics in Agriculture. – January 2007. – Volume 55, Issue 1. – p. 49–70.
5. Madala, H. R., Ivakhnenko, A.G. Inductive learning algorithms for complex systems modeling. – New York: Boca Raton, CRC Press, 1994. – 384 с.

Приведены результаты моделирования температурного режима в теплице на основе уравнений тепло-массообмена с использованием среды MATLAB. Определены коэффициенты многопараметрической модели для

теплицы зимнего типа, построенной по современным голландским типовым проектам.

Математическая модель, теплица, микроклимат, температура, влажность.

The temperature modelling results in greenhouse, which are based on heat and mass transfer equations using MATLAB are synthesized. Coefficients of multi-parameter mathematical models for Netherlands greenhouses are determined.

Mathematical model, greenhouse, climate, temperature, humidity.

УДК 665.33.001.73

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ІНДУКТОРІВ НЕКРУГОВОГО ПЕРЕРІЗУ

І.П. Кондратенко, доктор технічних наук

В.П. Лисенко, кандидат технічних наук

Д.С. Комарчук, аспірант*

Розглянуто методи еквівалентування циліндричних об'єктів, що мають некругову форму, круговими циліндрами. Визначено корегуючі коефіцієнти, які дозволяють зменшити похибку розрахунків енергетичних параметрів індукторів для нагріву металевих елементів некругового перерізу.

Індуктор, еквівалентний діаметр, індукційний нагрів, експеримент, активний опір індуктора.

Індукційний нагрів – це ефективний засіб забезпечення температурних режимів технологічного обладнання. Часто використання саме індуктора як джерела теплової енергії замість традиційних ніхромових нагрівачів чи ТЕНів дозволяє суттєво підвищити енергоефективність теплової обробки, надійність нагрівального обладнання, а також спростити способи підтримки заданої температури в об'єкті нагріву через безінерційність індукційного нагріву.

У пресах для переробки олійного матеріалу 75 % загальної кількості енергії витрачається на підтримання необхідної температури корпусу та сировини. Для нагріву технологічного обладнання використовують резистивні нагрівачі з ніхромового дроту. Нерівномірність температурного поля та короткий строк служби нагрівачів такого типу спонукає до пошуку альтернативних джерел теплової енергії, котрі можуть застосовуватись в олійно-жировій галузі. Екологічність та малий час виходу на задані температурні режими в порівнянні з резистивними нагрівачами спонукає до впровадження індукційних способів нагріву у переробці олійних матеріалів.

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

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

теплицы зимнего типа, построенной по современным голландским типовым проектам.

Математическая модель, теплица, микроклимат, температура, влажность.

The temperature modelling results in greenhouse, which are based on heat and mass transfer equations using MATLAB are synthesized. Coefficients of multi-parameter mathematical models for Netherlands greenhouses are determined.

Mathematical model, greenhouse, climate, temperature, humidity.

УДК 665.33.001.73

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ІНДУКТОРІВ НЕКРУГОВОГО ПЕРЕРІЗУ

І.П. Кондратенко, доктор технічних наук

В.П. Лисенко, кандидат технічних наук

Д.С. Комарчук, аспірант*

Розглянуто методи еквівалентування циліндричних об'єктів, що мають некругову форму, круговими циліндрами. Визначено корегуючі коефіцієнти, які дозволяють зменшити похибку розрахунків енергетичних параметрів індукторів для нагріву металевих елементів некругового перерізу.

Індуктор, еквівалентний діаметр, індукційний нагрів, експеримент, активний опір індуктора.

Індукційний нагрів – це ефективний засіб забезпечення температурних режимів технологічного обладнання. Часто використання саме індуктора як джерела теплової енергії замість традиційних ніхромових нагрівачів чи ТЕНів дозволяє суттєво підвищити енергоефективність теплової обробки, надійність нагрівального обладнання, а також спростити способи підтримки заданої температури в об'єкті нагріву через безінерційність індукційного нагріву.

У пресах для переробки олійного матеріалу 75 % загальної кількості енергії витрачається на підтримання необхідної температури корпусу та сировини. Для нагріву технологічного обладнання використовують резистивні нагрівачі з ніхромового дроту. Нерівномірність температурного поля та короткий строк служби нагрівачів такого типу спонукає до пошуку альтернативних джерел теплової енергії, котрі можуть застосовуватись в олійно-жировій галузі. Екологічність та малий час виходу на задані температурні режими в порівнянні з резистивними нагрівачами спонукає до впровадження індукційних способів нагріву у переробці олійних матеріалів.

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

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

Нагрівачі на корпусі екструдера (рис. 1) розташовуються в трьох зонах. Потужність кожного із них становить 3 кВт, а сам індуктор встановлюється в штатне місце нагрівачів на корпусі. Корпус екструдера, де виконується нагрівання, має овальну форму, довжина ділянки 0,32 м, периметр корпуса 0,444 м.

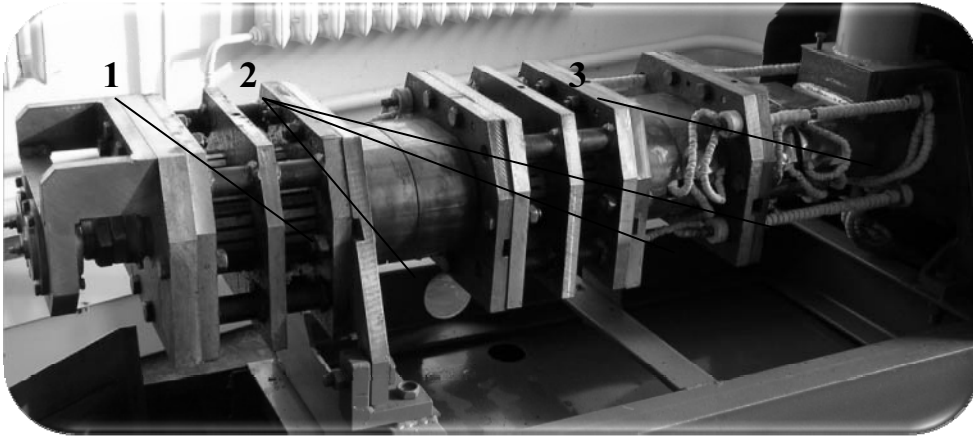


Рис. 1. Зовнішній вигляд корпуса екструдера ЕК 75/1200:

1 – корпус екструдера; 2 – зони нагріву корпуса; 3 – вхідна горловина преса

Розрахунок енергетичних характеристик індукційного нагрівача виконують для його овальної форми. Для застосування простих методів розрахунку вводять поняття еквівалентного діаметра виробу, який нагрівається. У літературі відсутня однозначна інформація щодо визначення еквівалентного діаметра. Так, у [5] еквівалентний діаметр завантаження з прямокутним перерізом визначається як:

$$D_{ек} = \frac{2(a+b) - 4\Delta_k}{\pi}, \quad (1)$$

де a , b – сторони прямокутника, м; Δ_k – глибина проникнення струму на частоті джерела живлення, м, $\Delta_k = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$; μ – магнітна проникність сталі; σ – питома електропровідність сталі, См/м; ω – кутова швидкість, рад/с.

У формулі (1) береться до уваги, що вихрові струми на високій частоті живлення ($f > 1000$ Гц) замикаються на поверхні виробу.

У роботі [4] автор визначає еквівалентний діаметр за умови рівності площ поперечних перерізів еквівалентного циліндричного завантаження та характерного розміру квадрата.

Так, для квадрата зі стороною a еквівалентний діаметр буде розраховано як:

$$D_{ек} = \frac{2a}{\sqrt{\pi}}. \quad (2)$$

Для квадратного перерізу 100x100 мм та частоти 50 Гц порівняння результатів розрахунків за виразами (1) та (2) еквівалентного діаметра дає розбіжність на 1,5 %.

З одного боку, величина еквівалентного діаметра за виразом (1) залежить від режиму роботи індукційного нагрівача, яким визначається значення магнітної проникності, що в свою чергу визначає глибину активного шару. З другого боку вираз (2) такою залежністю нехтує.

Мета досліджень – визначення еквівалентного діаметра некругового циліндра з урахуванням режимів роботи індукційного нагрівача.

Матеріали та методика досліджень. Поставлену задачу будемо вирішувати, використовуючи чисельний експеримент, який виконаємо із використанням програмного продукту COMSOL Multiphysics.

Результати досліджень. COMSOL Multiphysics – це програмне середовище, яке забезпечує всі етапи моделювання: визначення геометричних параметрів, опис фізичних характеристик та візуалізація. Означене дозволяє моделювати процеси, які можуть бути подані у вигляді системи диференціальних рівнянь у часткових похідних. У нашому випадку для моделювання використаємо модуль *AC/DC Module* в розділі *Quasi-Static, Magnetic* в підрозділі *In-Plane Induction Current, Magnetic Field* з урахуванням гармонічного аналізу – *Time-harmonic analysis*.

На рис. 2 наведено переріз корпусу екструдера з кінцево-елементною сіткою в об'єкті моделювання. Розподіл електромагнітного поля визначається за результатами розв'язку такого диференційного рівняння[2]:

$$j\omega d\mu_0\mu_r H_z + \nabla \times d((\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)^{-1}(\nabla \times H_z - \bar{J}^e) - \bar{v} \times \mu_0\mu_r H_z) = 0, \quad (3)$$

де j – густина струму, A/m^2 ; d – товщина корпусу, м; μ – магнітна проникність вакууму; μ_r – магнітна проникність матеріалу корпусу; H_z – напруженість магнітного поля, A/m ; ∇ – оператор Набла; ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму; ϵ_r – відносна діелектрична проникність матеріалу корпусу; $\bar{J}^e$ – густина струму, A/m^2 ; $\bar{v}$ – швидкість, м/с.

Рівняння (3) може бути розв'язаним за умови задавання значень потужності магнітного поля на границі зовнішньої області геометрії деталі. Для визначення еквівалентних параметрів некругового циліндричного індуктора будемо проводити порівняння двох геометрій некругового та кругового перерізів (рис. 3). Умовами еквівалентності приймаємо рівність потужності магнітного поля на поверхні моделей і досягнення однакових енергетичних втрат за обома геометріями. Електрофізичні параметри середовища при цьому – однакові.

Пропонується еквівалентний діаметр розраховувати за периметром некругової моделі з урахуванням уточнень при зміні значень напруженості магнітного поля і частоти живлення. Отже, еквівалентний діаметр будемо визначати так:

$$D_{ek} = \frac{1}{k} \frac{\Pi}{\pi}, \quad (5)$$

де Π – периметр деталі, м; k – корегуючий коефіцієнт.

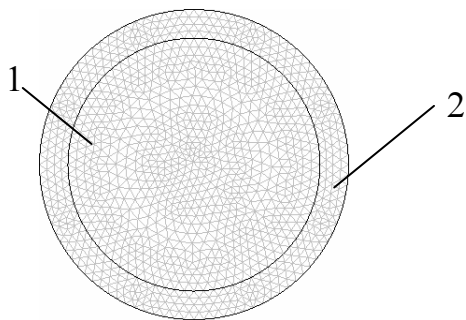


Рис 2. Геометрія корпусу екструдера з кінцево-елементною сіткою:

1 – сталевий корпус;
2 – повітря

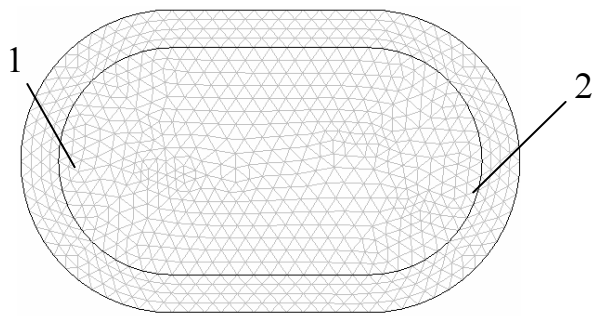


Рис 3. Геометрія з кінцево-елементною сіткою еквівалентна корпусу екструдера:

1 – сталевий корпус; 2 – повітря

Для визначення коригуючого коефіцієнта k проведемо двофакторний експеримент. Досліджуватимемо взаємодію напруженості електромагнітного поля та частоти джерела живлення. Результуючою величиною експерименту буде значення коефіцієнта k , при якому кількість енергії, виділеної в об'ємі еквівалентної та реальної деталей будуть однаковими.

Межі варіювання факторів впливу H та f визначимо на основі літературних даних та результатів аналітичного розрахунку. Так H варіюється в межах від 10000 до 100000 А/м, f змінюємо від 50 до 8000 Гц.

Для детального вивчення ділянок поверхні відгуку k при зміні значення напруженості магнітного поля та частоти струму може бути використаний поліном другого порядку, отриманий за результатами проведення числового повнофакторного експерименту другого порядку [1].

Плани 2-го порядку дозволяють отримати математичний опис процесу у вигляді повної квадратичної моделі, яка містить, крім основних ефектів b_i , всі парні взаємодії b_{ij} і квадратичні ефекти b_{ii} .

На основі аналізу наявних даних вибираємо такі рівні та інтервали варіювання факторів (табл. 1).

1. Інтервали варіювання факторів впливу

Фактор		Рівні				
		-1	0	+1	$+\alpha$	$-\alpha$
Напруженість магнітного поля, H	x_1	23175	55000	86825	100000	10000
Частота, f	x_2	1213.8	4025	6836.2	8000	50

Значення зіркового плеча $\pm\alpha$ для планів другого порядку становить 2,828 [1]. Величину енергетичних втрат, які виникають у корпусі екструдера та еквівалентної конструкції, вимірюємо за допомогою вбудованої функції програми Comsol Multiphysics 3.5a, Subdomain Integration. На основі прийнятих параметрів складаємо матрицю планування експерименту (табл. 2).

2. Матриця планування двофакторного експерименту

Номер досліду в матриці	Фактори в умовних одиницях		Фактори в натуральному масштабі	
	x_1	x_2	$H, A/m$	$f, Гц$
1	-1	-1	23175	1213,8
2	-1	+1	23175	6836,2
3	+1	-1	86825	1213,8
4	+1	+1	86825	6836,2
5	0	0	55000	4025,0
6	-a	0	10000	4025,0
7	+a	0	100000	4025,0
8	0	-a	55000	50,0
9	0	+a	86825	8000,0

За результатами експерименту отримано регресійне рівняння залежності коригуючого коефіцієнта k від напруженості електромагнітного поля та частоти джерела живлення.

$$k(H, f) = 0,955 + 4,468 \cdot 10^{-7} H - 8,1 \cdot 10^{-6} f - 2,63 \cdot 10^{-11} Hf - 1,23 \cdot 10^{-12} H^2 + 6,56 \cdot 10^{-10} f^2. \quad (6)$$

Використовуючи рівняння (6) визначимо розрахункові та експериментально отримані значення коригуючого коефіцієнта для визначення похибки експерименту (табл. 3).

3. Експериментальний та розрахунковий коригуючий коефіцієнт

№ до- сліду	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$k_{\text{експ}}$	0,9556	0,9346	0,9837	0,9434	0,9453	0,9342	0,9593	1	0,9413
$k_{\text{розрах}}$	0,9551	0,9358	0,9727	0,9438	0,9479	0,9364	0,9544	0,9754	0,9430

Визначимо абсолютну похибку вимірювань:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum_i (k_{\text{експ}_i} - k_{\text{розрах}_i})^2}{n-1}}, \quad (7)$$

де n – кількість дослідів.

Відносна похибка:

$$\delta = \frac{\epsilon}{\sum k_{\text{експ}}}. \quad (8)$$

За результатами розрахунків отримуємо, що абсолютна похибки $\epsilon=0,00978$; відносна похибка $\delta=1,024\%$.

На рис 4. наведено графічне зображення поверхні відгуку коригуючого коефіцієнта в межах інтервалів варіювання H та f .

У нашому випадку для корпусу екструдера периметром $\Pi=0,444$ м, напруженістю магнітного поля $H=24710$ А/м, частотою джерела живлення

$f=50$ Гц коригуючий коефіцієнт становитиме $k=0,982$. Розрахований еквівалентний діаметр з урахуванням k буде $D_{ek}=0,144$ м.

Окрім визначення еквівалентного діаметра завантаження індуктора, яке має форму, що відрізняється від круглої, слід зазначити важливість визначення еквівалентного діаметра індуктора. Оскільки еквівалентний діаметр індуктора визначає активний опір обмотки індуктора, а також реактивну складову опору, що вноситься в послідовну схему заміщення, тому його визначення будемо проводити з урахуванням площі незайнятої завантаженням, а також периметра нециліндричної намотки індуктора.

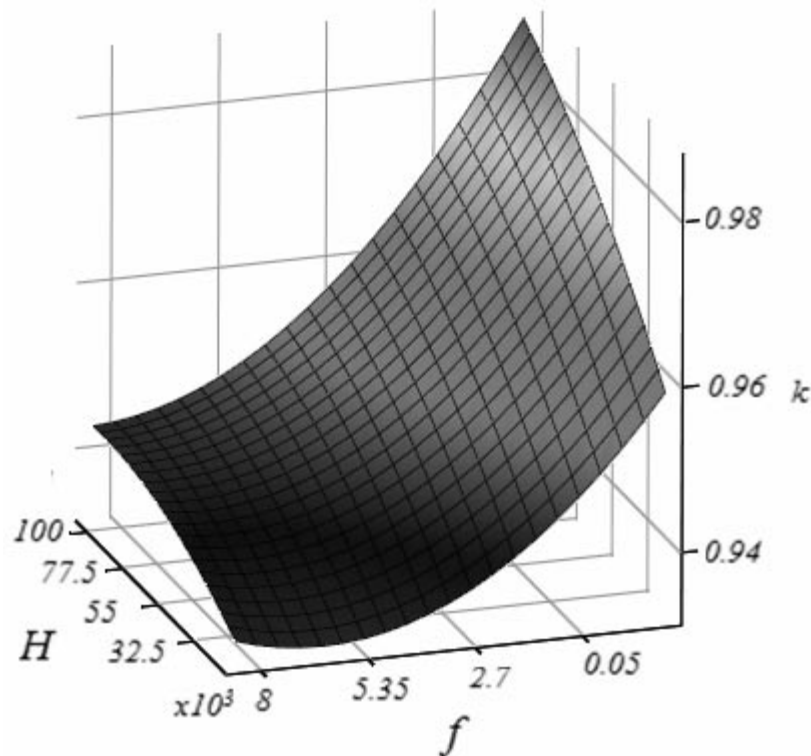


Рис 4. Поверхня відгуку k при зміні значення напруженості магнітного поля та частоти струму

Розрахунок активного опору індуктора є окремою проблемою, оскільки залежить від частоти живлення індуктора, конструкції обмотки (одношарова, багатошарова), і в роботі не розглядаються.

Утворення зазору між індуктором та завантаженням пов'язано з використанням теплоізоляційних матеріалів, що використовуються для підвищення ефективності нагріву та зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище. Саме товщина теплоізоляційного матеріалу визначає відстань між індуктором та деталлю, а отже і площу, незайняту завантаженням.

Для розрахунку еквівалентного діаметра некругового індуктора приймаємо, що площі, незайняті завантаженням в індукторі для корпуса преса та еквівалентної йому кругової геометрії, повинні бути рівними.

Розрахунок еквівалентного діаметра індуктора виконаємо, використовуючи класичну формулу визначення еквівалентування за периметром та порівняємо отриманий результат з виразом, в якому використовується площа теплоізоляційного матеріалу:

$$D'_{in} = \sqrt{\frac{4S}{\pi} + D_{ek}^2}, \quad (7)$$

де S – площа теплоізоляційного матеріалу, m^2 .

Товщину теплоізоляційного матеріалу h змінюємо в діапазоні від 5 до 20 мм. Результати розрахунків наведено в табл. 4.

4. Результати розрахунку еквівалентного діаметра індуктора

$h, \text{мм}$	$\Pi, \text{м}$	$S, \text{м}$	$D_{in}, \text{м}$	D'_{in}	$S', \text{м}$	$\Delta, \%$
5	0,476	0,00229	0,151	0,154	0,00228	1,56
10	0,507	0,00475	0,161	0,164	0,00475	1,40
15	0,538	0,00736	0,171	0,173	0,00736	1,21
20	0,570	0,01014	0,181	0,183	0,01014	1,12

Позначення: Π – периметр теплоізоляційного матеріалу, м; D'_{in} – еквівалентний круговий діаметр індуктора, м; S' – площа еквівалентної теплової ізоляції, m^2 ; Δ – похибка розрахунку визначення діаметра індуктора, використовуючи класичну формулу та формулу, в якій враховується площа теплоізоляційного матеріалу.

Визначення еквівалентного діаметра індуктора з використанням площі теплоізоляційного матеріалу зменшує похибку розрахунку геометричних параметрів індуктора на 1,5 % в порівнянні з класичною формулою.

Висновки

Геометричні параметри деталей некругового перерізу доцільно розраховувати за периметром з урахуванням отриманого коригуючого коефіцієнта.

Діаметр еквівалентного індуктора розраховується із умови рівності площ, незайнятих завантаженням у некруговому та еквівалентному круговому індукторі.

В інженерних розрахунках для зменшення похибки доцільно використовувати коригуючий коефіцієнт для визначення еквівалентного діаметра корпусу некругової деталі, а діаметр індуктора – з використанням площі теплової ізоляції.

Список літератури

1. Грачев Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев. – М.: Пищевая пром-сть, 1979. – 196 с.
2. Егоров В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности (Comsol Multiphysics) / В.И. Егоров. – СПб: ГУ ИТМО, 2006. – 77 с.
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. Слухоцкий А.Е. Индукторы / А.Е. Слухоцкий. – Л.: Машиностроение, 1989. – 69 с.
5. Установки индукционного нагрева: учеб. пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.

Рассмотрены методы эквивалентирования цилиндрических объектов, имеющих некруговую форму, круговыми цилиндрами. Определены корректирующие коэффициенты, позволяющие уменьшить погрешность расчетов энергетических параметров индукторов для нагрева металлических элементов некругового сечения.

Индуктор, эквивалентный диаметр, индукционный нагрев, эксперимент, сопротивление индуктора.

Considers the methods to simplify calculation of cylindrical objects that are not circular shape, a circular cylinder. Definitely adjustment factors to reduce the error calculations of energy parameters inductors for heating metal elements are not circular section.

Inductor, Equivalent diameter of the inductors, induction heating, experiment, inductor resistance.

УДК 535:537:546

ВПЛИВ ЗМІНИ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ НА КОЕФІЦІЄНТ ВІДБИТТЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

***В.В. Бойко, Г.І. Булах, С.В.Шостак,
кандидати фізико-математичних наук***

Теоретично досліджено вплив вологості ґрунту на зміну діелектричної проникності ϵ , відповідно, на коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль від його поверхні. Визначено комплексні коефіцієнти відбиття для перпендикулярно і паралельно поляризованих електромагнітних плоских хвиль від шаруватого напівпростору. Обґрунтовано можливість практичного застосування безконтактних радіолокаційних методів зондування для визначення структури і вологості ґрунтів у системі точного землеробства.

Діелектрична проникність, коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль, вологість ґрунту, система точного землеробства.

Присутність води у ґрунтах змінює їх фізико-механічні характеристики, і, зокрема, їх діелектричну проникність. Пов'язано це з тим, що комплексна діелектрична проникність води в діапазоні надвисоких частот (НВЧ) радіовипромінювання суттєво відрізняється від діелектричної проникності ґрунтів, і тому ефективна діелектрична проникність зволоженого ґрунту буде відрізнятися від відповідної характеристики сухих ґрунтів. Ця зміна, зокрема, буде впливати на коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі від поверхні ґрунту. Оскільки вимірювання коефіцієнта відбиття є дослідженою експериментальною задачею [6], то це, в принципі, дозволяє за зміною коефіцієнта відбиття простежити за зміною

Рассмотрены методы эквивалентирования цилиндрических объектов, имеющих некруговую форму, круговыми цилиндрами. Определены корректирующие коэффициенты, позволяющие уменьшить погрешность расчетов энергетических параметров индукторов для нагрева металлических элементов некругового сечения.

Индуктор, эквивалентный диаметр, индукционный нагрев, эксперимент, сопротивление индуктора.

Considers the methods to simplify calculation of cylindrical objects that are not circular shape, a circular cylinder. Definitely adjustment factors to reduce the error calculations of energy parameters inductors for heating metal elements are not circular section.

Inductor, Equivalent diameter of the inductors, induction heating, experiment, inductor resistance.

УДК 535:537:546

ВПЛИВ ЗМІНИ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ НА КОЕФІЦІЄНТ ВІДБИТТЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

***В.В. Бойко, Г.І. Булах, С.В.Шостак,
кандидати фізико-математичних наук***

Теоретично досліджено вплив вологості ґрунту на зміну діелектричної проникності ϵ , відповідно, на коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль від його поверхні. Визначено комплексні коефіцієнти відбиття для перпендикулярно і паралельно поляризованих електромагнітних плоских хвиль від шаруватого напівпростору. Обґрунтовано можливість практичного застосування безконтактних радіолокаційних методів зондування для визначення структури і вологості ґрунтів у системі точного землеробства.

Діелектрична проникність, коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль, вологість ґрунту, система точного землеробства.

Присутність води у ґрунтах змінює їх фізико-механічні характеристики, і, зокрема, їх діелектричну проникність. Пов'язано це з тим, що комплексна діелектрична проникність води в діапазоні надвисоких частот (НВЧ) радіовипромінювання суттєво відрізняється від діелектричної проникності ґрунтів, і тому ефективна діелектрична проникність зволоженого ґрунту буде відрізнятися від відповідної характеристики сухих ґрунтів. Ця зміна, зокрема, буде впливати на коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі від поверхні ґрунту. Оскільки вимірювання коефіцієнта відбиття є дослідженою експериментальною задачею [6], то це, в принципі, дозволяє за зміною коефіцієнта відбиття простежити за зміною

кількості вологи, присутньої у ґрунті. У зв'язку з поширенням систем точного землеробства проведення таких досліджень є актуальним.

У цій роботі наведено результати проведеного кількісного аналізу впливу зміни вологості ґрунту на коефіцієнт відбиття з метою з'ясування ефективності практичної можливості застосування означеного методу. Товща ґрунту моделюється шаруватим напівпростором, діелектрична проникність шарів якого залежить від кількості води у шарі та його будови. Для визначення діелектричної проникності шарів ґрунту використовується розроблена раніше методика визначення ефективної діелектричної функції пористих середовищ [2–5]. Коефіцієнти відбиття електромагнітної хвилі від шаруватого напівпростору обчислюються за допомогою імпедансного методу [1].

Мета досліджень – аналіз впливу зміни вологості ґрунту на коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі від поверхні ґрунту для з'ясування можливості застосування безконтактних радіолокаційних методів зондування при визначенні структури і вологості ґрунтів у системі точного землеробства.

Тому, цей напрям наукових досліджень є актуальним та перспективним.

Результати досліджень. 1. Знаходження коефіцієнта відбиття електромагнітного випромінювання від шаруватого напівпростору. Будемо моделювати ґрунт шаруватим напівпростором і розглянемо плоску гармонійну електромагнітну хвилю з електричним вектором E і магнітним вектором H відповідно, яка поширюється у верхньому напівпросторі і падає на межу поділу двох напівпросторів:

$$E = E_0 e^{i(kr - \omega t)}; H = (c / \mu \omega) [k \cdot E], \quad (1)$$

де $k = \{k_x, k_y, k_z\}$ – хвильовий вектор; $r = \{x, y, z\}$ – радіус-вектор довільної точки верхнього напівпростору; ω – частота, c^{-1} ; t – час, s ; c – швидкість світла, m/s ; μ – магнітна проникність верхнього напівпростору, Gn/m .

Модуль хвильового вектора при цьому визначається за формулою:

$$k = (\omega / c) \sqrt{\varepsilon \mu} = (2\pi / \lambda) \sqrt{\varepsilon \mu}, \quad (2)$$

де λ – довжина хвилі, m ; $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon'(1 + itg\delta)$ – комплексна діелектрична проникність, F/m ; де ε' , ε'' – дійсна та уявна частини; $tg\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат, який визначається співвідношенням $tg\delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$.

Спочатку розглянемо випадок однорідного нижнього середовища. Позначимо комплексні діелектричну і магнітну проникності у верхньому і нижньому середовищах відповідно через ε , μ та ε_1 , μ_1 . Виберемо прямокутну систему координат так, щоб площина xy збігалася з площиною поділу двох середовищ, а площина xz – із площиною падіння плоскої хвилі. Кут падіння хвилі, тобто кут між хвильовим вектором та площиною поділу позначимо через ϑ , кут заломлення через ϑ_1 (рис.1).

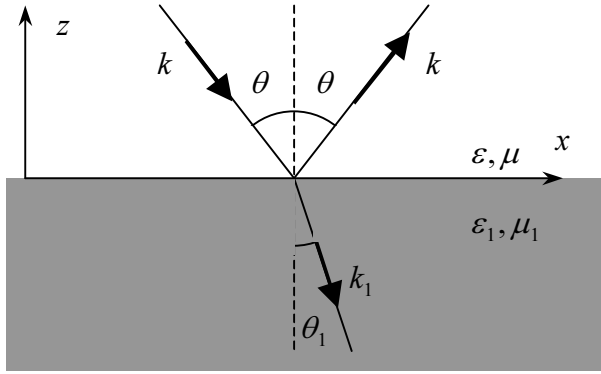


Рис.1. Відбиття плоскої хвилі від межі поділу двох напівпросторів

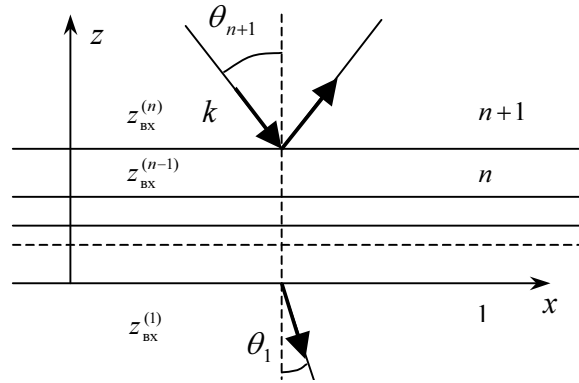


Рис.2. Відбиття плоскої хвилі від шаруватого напівпростору

Як відомо, будь-яка плоска електромагнітна хвиля може бути представлена у вигляді суперпозиції двох хвиль. Для однієї з них вектор електричної складової E є перпендикулярним площині падіння (перпендикулярна поляризація), а для іншої лежить у цій площині (паралельна поляризація).

Електричне поле у верхньому середовищі можна записати у вигляді

$$E = E_y = E_0 e^{i(k_x x - k_z z)} + V E_0 e^{i(k_x x + k_z z)}, \quad (3)$$

де перший доданок являє собою падаючу хвилю, а другий – відбиту хвилю. Амплітуда падаючої хвилі позначена через E_0 , а коефіцієнт відбиття – через V ($V_{\perp}$ – для перпендикулярно поляризованої хвилі, $V_{\parallel}$ – для паралельно поляризованої хвилі). Компоненти хвильового вектора при цьому $k_x = k \sin \vartheta$, $k_z = k \cos \vartheta$.

У нижньому середовищі електричне поле

$$E_1 = E_{1y} = W E_0 e^{i(k_{1x} x - k_{1z} z)}, \quad (4)$$

де W – коефіцієнт прозорості межі ($W_{\perp}$ – для перпендикулярно поляризованої хвилі, $W_{\parallel}$ – для паралельно поляризованої хвилі), а

$$k_{1x} = k_1 \sin \vartheta_1; \quad k_{1z} = k_1 \cos \vartheta_1; \quad k_1 = k(\epsilon_1 \mu_1 / \epsilon \mu)^{1/2}. \quad (5)$$

Сталі V , W , а також кут заломлення ϑ_1 визначаються з граничних умов, які забезпечують неперервність тангенціальних складових E, H по різних сторонах поверхні поділу. Надалі зручно ввести поняття імпедансів. Для верхнього та нижнього напівпросторів відповідно імпеданси дорівнюють:

$$Z = E / H_x; \quad Z_1 = E_1 / H_{1x}, \quad (6)$$

а після запису граничних умов через імпеданси отримуємо вирази для обчислення коефіцієнта відбиття у випадках перпендикулярної та паралельної поляризації:

$$V_{\perp} = \frac{Z_1^0 / \cos \vartheta_1 - Z^0 / \cos \vartheta}{Z_1^0 / \cos \vartheta_1 + Z^0 / \cos \vartheta}; \quad (7)$$

$$V_{||} = \frac{Z_1^0 \cos \vartheta_1 - Z^0 \cos \vartheta}{Z_1^0 \cos \vartheta_1 + Z^0 \cos \vartheta}, \quad (8)$$

де $Z^0 = (\mu / \varepsilon)^{1/2}$, $Z_1^0 = (\mu_1 / \varepsilon_1)^{1/2}$ – хвильові опори верхнього і нижнього середовищ відповідно.

Кути падіння і заломлення для обох поляризацій пов'язані співвідношенням закону заломлення:

$$k_x = k_{1x} \Rightarrow k \sin \vartheta = k_1 \sin \vartheta_1. \quad (9)$$

Поняття вхідного імпедансу дозволяє отримати рекурентну формулу для обчислення коефіцієнта відбиття для системи n шарів, що поділяють два середовища (рис. 2). Вхідний імпеданс обчислюється рекурентно [1]:

$$Z_{\text{ex}}^{(n)} = \frac{Z_{\text{ex}}^{(n-1)} - iZ_n \operatorname{tg} k_{nz} d_n}{Z_n - iZ_{\text{ex}}^{(n-1)} \operatorname{tg} k_{nz} d_n} Z_n, \quad (10)$$

де d_n – товщина n -го шару, м.

Маємо послідовно:

$$Z_{\text{ex}}^{(1)} = Z_1, \quad d_n = d_2; \quad Z_{\text{ex}}^{(2)} = \frac{Z_{\text{ex}}^{(1)} - iZ_2 \operatorname{tg} k_{2z} d_2}{Z_2 - iZ_{\text{ex}}^{(1)} \operatorname{tg} k_{2z} d_2} Z_2 = \frac{Z_1 - iZ_2 \operatorname{tg} k_{2z} d_2}{Z_2 - iZ_1 \operatorname{tg} k_{2z} d_2} Z_2$$

і т.д.

Для n шарів коефіцієнт відбиття можна обчислити за формулою:

$$V = \frac{Z_{\text{ex}}^{(n)} - Z_{n+1}}{Z_{\text{ex}}^{(n)} + Z_{n+1}}, \quad (11)$$

де імпеданси шарів наведено виразами:

$$Z_j = Z_j^0 / \cos \vartheta_j; \quad Z_j = Z_j^0 \cos \vartheta_j, \quad (12)$$

відповідно для перпендикулярної і паралельної поляризацій. При цьому через $Z_j^0 = (\mu_j / \varepsilon_j)^{1/2}$ позначено хвильовий опір j -го шару.

Зауважимо, що для комплексних діелектричних проникностей шарів коефіцієнт відбиття теж буде комплексним числом. Тому звичайно вводять коефіцієнт відбиття за потужністю, який визначається співвідношенням

$$|R|^2 = VV^*, \quad (13)$$

де V^* – спряжене число.

Наведені формули дозволяють повністю розв'язати задачу про встановлення залежності коефіцієнта відбиття плоскої хвилі від шарування середовища від її довжини, кута падіння і поляризації. У випадку нормального падіння коефіцієнти відбиття для обох поляризацій збігаються.

2. Визначення ефективної діелектричної проникності ґрунтів.

Ґрунти моделюємо пористими середовищами. Довжина хвилі λ у діапазоні НВЧ значно більше розмірів характерних утворень пористого середовища, тому ефективна діелектрична проникність зволожених

ґрунтів $\varepsilon = \varepsilon(\omega)$ визначається за допомогою моделі двокомпонентного пористого середовища [2–5] з рівняння:

$$\int_0^1 \frac{\varepsilon_c(\omega, \varphi) - \varepsilon(\omega)}{\varepsilon_c(\omega, \varphi) + 2\varepsilon(\omega)} \lambda(\varphi) \mu(\varphi) d\varphi + \int_0^1 \frac{\varepsilon_B(\omega, \varphi) - \varepsilon(\omega)}{\varepsilon_B(\omega, \varphi) + 2\varepsilon(\omega)} [1 - \lambda(\varphi)] \mu(\varphi) d\varphi = 0, \quad (14)$$

де $\varepsilon_B = \varepsilon_B(\omega)$; $\varepsilon_C = \varepsilon_C(\omega)$ – діелектричні проникності, які характеризують скелетну і перколяційну частини вибраної комірки характерного розміру і обчислюються за формулами:

$$\varepsilon_B = \varepsilon_R \frac{2\varepsilon_R + \varepsilon_w - 2(\varepsilon_R - \varepsilon_w)\varphi}{2\varepsilon_R + \varepsilon_R + 2(\varepsilon_R - \varepsilon_w)\varphi}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_C = \varepsilon_W \frac{\varepsilon_R + (2/3)(\varepsilon_R - \varepsilon_w)\varphi}{\varepsilon_W - (1/3)(\varepsilon_w - \varepsilon_R)\varphi}. \quad (16)$$

У свою чергу $\varepsilon_R, \varepsilon_W$ – це діелектричні проникності скелета та включень відповідно. Усі діелектричні проникності є комплексними величинами.

Функція $\mu(\varphi)$ визначає щільність розподілу ймовірності розмірів пор, а функція $\lambda(\varphi)$ – щільність розподілу довжини зв'язаних між собою пор (перколяційна складова пористих середовищ). Функція $\mu(\varphi)$ може бути визначена експериментально після обробки фотографій перерізів зразків, але для функції $\lambda(\varphi)$ можна отримати тільки деякі теоретичні оцінки [7]. У цій роботі наведено модель однорідно зв'язаних пор, для якої $\lambda(\varphi) = \text{const} = p$ [2,3,7], а функція розподілу пор за розмірами $\mu(\varphi)$ описується бета-розподілом, який при певних значеннях параметрів вироджується в кусочно-сталу функцію. Як і раніше [3,5], приймаємо, що

$$\mu(\varphi) = \begin{cases} 4, & 0 \leq \varphi \leq 0,2 \\ 0, & 0,2 \leq \varphi \end{cases} \quad (17)$$

Формула (14) дозволяє обчислити ефективну діелектричну проникність при відомих проникностях скелета та рідини, що заповнює пори, і функціях розподілу $\mu(\varphi)$, $\lambda(\varphi)$. Для цього потрібно при фіксованому значенні частоти розв'язати рівняння (14), яке можна подати у вигляді: $F(\varepsilon; \lambda, \varphi) = 0$ відносно $\varepsilon = \varepsilon(\omega)$. З цією метою доцільно використовувати метод Ньютона, який поширюється і на функції комплексного аргументу. Тоді невідоме значення діелектричної проникності знаходиться ітеративно за формулою:

$$\varepsilon_{k+1} = \varepsilon_k - F(\varepsilon_k) / F'_{\varepsilon}(\varepsilon_k). \quad (18)$$

Як початкове наближення зручно прийняти середнє арифметичне значення діелектричних проникностей скелета і включень. З фізичних міркувань очевидно, що процес буде завжди збіжним. Застосування формули (18) згідно з (14) пов'язано з обчисленням значень функції, аргумент якої входить під знак визначених інтегралів як параметр. Ці інтеграли при фіксованих значеннях ε, ω знаходяться чисельно.

Як приклад, розглянемо зволожений ґрунт з двома значеннями дійсної частини діелектричної проникності матеріалу скелета $\varepsilon_R' = 5$ та ε_R''

$= 10$, а для води прийємо $\varepsilon_W' = 79$ і провідність $\sigma_W = \varepsilon_W$. При завданні перколяційної функції в моделі однорідно зв'язаних пор прийємо два значення $p=1,0$ і $p=0,5$. Залежності дійсної частини діелектричної проникності та провідності таких пористих середовища від безрозмірної частоти $\omega^* = \omega / \omega_0$ для цих випадків наведено на рис. 3, де $\omega_0 = 1/(\varepsilon_0 \varepsilon_W') = 1,43 \text{ ГГц}$ – це частота релаксації води, а $\varepsilon_0 = 8,8452 \cdot 10^{12} \text{ Ф/м}$.

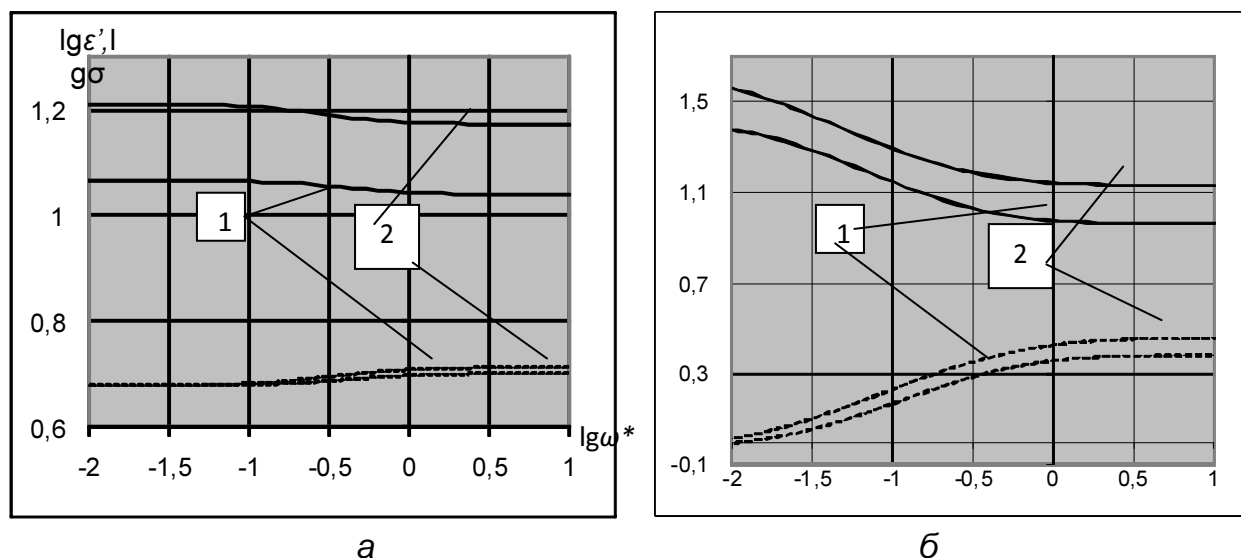


Рис. 3. Частотна залежність дійсної частини діелектричної проникності та провідності для моделі однорідно зв'язаних пор при $\lambda = 1$ (а) та при $\lambda = 0,5$ (б):

1 – $\varepsilon_R = 5$; 2 – $\varepsilon_R = 10$; ----- - ε' ; ——— - σ

Розрахунки були виконані в діапазоні $0,03\omega_0 \leq \omega \leq \omega_0$. На графіках використано подвійні логарифмічні шкали з десятинною основою, суцільними лініями показано криві для ефективної дійсної частини діелектричної проникності, а штриховими – для ефективної провідності.

З наведених даних випливає, що підвищення діелектричної проникності скелета збільшує одночасно і діелектричну проникність пористого середовища і його провідність. Суттєвий вплив має перколяційна складова, яка не тільки змінює ефективні характеристики, а також помітно впливає на їх частотну залежність. При цьому існує певний діапазон частот при $\omega > \omega_0$, тобто діапазон НВЧ, в якому діелектричні характеристики зберігають практично сталі значення. Ця обставина є досить суттєвою, оскільки дозволяє використовувати прилади, які працюють у сантиметровому діапазоні хвиль.

Висновки

Запропонована методика дозволила зв'язати діелектричні характеристики ґрунтів, що знаходяться з використанням запропонованої раніше моделі пористих середовищ, з такою характеристикою, як коефіцієнт

відбиття електромагнітної хвилі від поверхні ґрунту, який визначається за допомогою точного розв'язку рівнянь Максвелла для шаруватого напівпростору із застосуванням імпедансного методу. Визначено діапазон зміни коефіцієнта відбиття, що теоретично обґрунтовує можливість використання безконтактних радіолокаційних методів зондування при визначенні вологості та внутрішньої структури ґрунтів у системі точного землеробства.

Список літератури

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Бреховских Л.М. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
2. 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.
3. Діелектрична проникність пористих середовищ / Л.Г. Гречко, Л. Б. Лерман, А.І. Лесьо [та ін.]. // Вісник Київ. ун-ту. Серія: фіз.-мат. науки. – 2005. – №2. – С. 127–132.
4. Електродинамічні характеристики зволжених дисперсних систем / В.В. Бойко, Л.Г. Гречко, Н.Г. Шкода, С.В. Шостак // Зб. наук. праць НАУ. – 2002. – Т. XII. – С. 21–30.
5. Эффективна діелектрична проникність зволжених дисперсних систем в наближенні локальної пористості / В.В. Бойко, Л.Г. Гречко, Н.Г. Шкода, С.В. Шостак // Збірник наукових праць НАУ. – 2003. – Т. XIII. – С. 103 – 113.
6. Шутко А.М. СВЧ -радиометрия водной поверхности и грунтов / Шутко А.М. – М.: Наука, 1986. – 189 с.
7. Dielectric response of porous medium// Hilfer R. Phys. Rev. – 1991, 44. – P. 60 – 76.

Теоретически исследовано влияние влажности грунта на изменение диэлектрической проницаемости и, соответственно, на коэффициент отражения электромагнитных волн от поверхности. Определены комплексные коэффициенты отражения для перпендикулярно и параллельно поляризованных электромагнитных плоских волн от слоистого полупространства. Обоснована возможность практического применения бесконтактных радиолокационных методов зондирования для определения структуры и влажности грунтов в системе точного земледелия.

Диелектрическая проницаемость, коэффициент отражения электромагнитных волн, влажность грунта, система точного земледелия.

The change of soil humidity on changing of permittivity, and correspondent on coefficients of electromagnetic waves is investigated theoretically. Complex reflection coefficients for perpendicular and parallel polarization from layered semi-space are determinate by impedance method. Elaborated method of solution gives the opportunity of practical determination of soils' humidity and structure with help of the radiometry, and can be used in the systems of fine agriculture also.

Dielectric permittivity, reflection coefficients of electromagnetic waves, soil humidity, system of fine agriculture.

ПОГЛИНАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ БАГАТОШАРОВИМИ КУЛЬОВИМИ ЧАСТИНКАМИ

Ю.Б. Гнучій, доктор фізико-математичних наук

Л.Б. Лерман, кандидат технічних наук

С.В. Шостак, кандидат фізико-математичних наук

С.В. Стеценко, старший викладач

Визначено поляризованість багат шарової кулі. Для побудови розв'язків задачі електростатики використано трансляційні матриці. Наведено приклади тестових розрахунків.

Поляризованість, багат шарові кулі, трансляційні матриці.

Визначення поляризованості малих частинок довільної форми та будови є одним із найважливіших етапів при дослідженні оптичних властивостей як окремих частинок або їх сукупностей, так і матрично-дисперсних систем з такими включеннями [1,3,6,9]. Відомо [1], що прикладене поле наводить у частинці пропорційний йому дипольний момент. Для потенціалу ідеального диполя Φ , який розташований на початку координат, маємо вираз:

$$\Phi = \frac{p \cos \theta}{4\pi\epsilon_m r^2},$$

де p – дипольний момент, дебай; r – відстань до точки спостереження, м; θ – меридіональний кут у сферичній системі координат, градус; ϵ_m – діелектрична проникність середовища, безрозмірна величина.

Дипольний момент p за означенням є величиною

$$p = \epsilon_m \alpha E_0,$$

де E_0 – напруженість сталого електричного поля, В/м; α – поляризованість, безрозмірна величина.

Для суцільної діелектрично-однорідної кулі збурений потенціал Φ_p , який виникає в однорідному полі, що діє вздовж осі z визначається за відомою формулою:

$$\Phi_p = a^3 E_0 \cos \theta \frac{\epsilon_1 - \epsilon_m}{\epsilon_1 + 2\epsilon_m} \frac{1}{r^3},$$

а дипольний момент кулі радіуса a є

$$p = 4\pi\epsilon_m a^3 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_m}{\epsilon_1 + 2\epsilon_m} E_0.$$

Порівняння наведених рівностей дає формулу для обчислення поляризованості кулі α :

$$\alpha = 4\pi a^3 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m}.$$

Отже, поляризованість кульової частинки довільної структури визначається як коефіцієнт при збуреному потенціалу, помножений на 4π . Тому задача полягає в знаходженні явного виразу для цього потенціалу в кожному конкретному випадку.

Мета досліджень – розробка методики розрахунку поляризованості структурно-неоднорідних кульових частинок.

Матеріали та методика досліджень. У цій статті викладено один із можливих підходів до визначення поляризованості кульових частинок з довільним числом шарів із застосуванням так званих трансляційних матриць [2,7–13]. Трансляційні матриці дозволяють переносити граничні умови з шару на шар, і для обчислення збуреного потенціалу шарових частинок вони виявляються дуже зручними. Зокрема в електростатичному наближенні розглядаються багатошарові (концентричні) кулі.

Результати досліджень. Замкнуті формули для обчислення поляризованостей кулі з покриттям (двошарова куля) добре відомі [1], але задача для багатошарової кулі значно ускладнюється у зв'язку із зростанням кількості рівнянь у граничних умовах. Для кулі із довільним законом зміни діелектричної функції від радіальної координати аналітичні розв'язки можуть бути отримано лише для окремих випадків. Нами запропоновано достатньо загальний алгоритм побудови чисельного розв'язку із врахуванням сингулярності в початку сферичної системи координат.

Нами раніш [3,7] була розв'язана задача електростатики для шаруватого еліпсоїда в однорідному полі. З розв'язку цієї задачі можна отримати і розв'язок задачі для кулі. Але внаслідок важливості випадку кулі має сенс отримати розв'язок задачі для багатошарової кулі безпосередньо. До того ж узагальнення розв'язків на кулі, діелектрична проникність шарів яких має трансверсальну анізотропію, потребує окремого розгляду.

Розглянемо кульову частинку (рис. 1), яка складається з n концентричних шарів з діелектричними комплексними проникностями ε_j і зовнішніми радіусами шарів r_j ($j=1,2,\dots,n$ – номер шару). Куля знаходиться у зовнішньому електричному полі E_0 . Для зовнішнього радіуса шару припустимо, що $r_n = a$.

Нумерацію шарів починаємо з центра, тобто для ядра кулі $j=1$, а для зовнішнього середовища – $j=n+1$. Діелектричну проникність зовнішнього середовища позначимо через $\varepsilon_{n+1} = \varepsilon_m$.

Задачу розв'язуємо в сферичних координатах r, θ, φ , пов'язаних із центром кулі. Потенціали електростатичного поля в шарах позначимо через $u_j = u_j(r, \theta, \varphi)$, потенціал зовнішнього поля – через $u_0 = u_0(r, \theta, \varphi)$, а збурений потенціал, який вносить куля, через $u_p = u_p(r, \theta, \varphi)$.

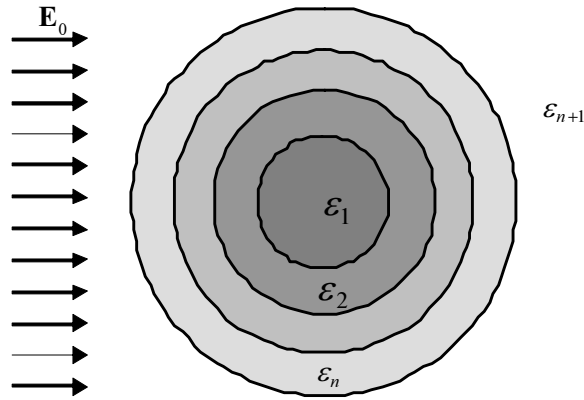


Рис.1. Багатошарова куля в електричному полі

Всі потенціали є розв'язками рівняння Лапласа:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial u_j}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial u_j}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 u_j}{\partial \phi^2} = 0, \quad (1)$$

а на межах шарів при $r = r_j$, ($j = 1, 2, \dots, n-1$) повинні справджуватися умови спряження

$$u_j = u_{j+1}, \quad \varepsilon_j \frac{\partial u_j}{\partial r} = \varepsilon_{j+1} \frac{\partial u_{j+1}}{\partial r}. \quad (2)$$

На поверхні кулі, тобто у випадку, коли $j = n$, матимемо умови ($u_{n+1} = u_0 + u_p$):

$$u_n = u_0 + u_p, \quad \varepsilon_n \frac{\partial u_n}{\partial r} = \varepsilon_m \left(\frac{\partial u_0}{\partial r} + \frac{\partial u_p}{\partial r} \right). \quad (3)$$

До умов (2)–(3) додаються умови обмеженості розв'язків у початку координат і на нескінченності, тобто

$$u_1 < \infty \text{ при } r \rightarrow 0 \text{ і } u_p \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Розв'язки рівнянь для кожного шару і вираз для збуреного потенціалу подамо у вигляді розкладів за сферичними гармоніками $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ при $j = 2, 3, \dots, n$

$$u_j(r, \theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^{l} \left[A_{lm}^{(j)} \left(\frac{r}{a} \right)^l + B_{lm}^{(j)} \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} \right] Y_{lm}(\theta, \varphi);$$

$$u_1(r, \theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^{l} A_{lm}^{(1)} \left(\frac{r}{a} \right)^l Y_{lm}(\theta, \varphi), \quad u_p(r, \theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^{l} B_{lm}^{(n+1)} \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} Y_{lm}(\theta, \varphi), \quad (5)$$

де, як звичайно, $Y_{lm}(\theta, \varphi) = \sum_{m=-l}^l P_l^{|m|}(\cos \theta) e^{im\varphi}$, а $P_l^{|m|}(\cos \theta)$ – приєднані функції Лежандра. При такому виборі розв'язків умови (4) будуть виконані, оскільки для потенціалу в ядрі кулі прийнято $B_{lm}^{(1)} = 0$, а для збуреного потенціалу – $A_{lm}^{(n+1)} = 0$.

На поверхні кулі, тобто при $r = a$ зовнішній потенціал $u_0(r, \theta, \varphi)$ та його частинна похідна $\partial u_0(r, \theta, \varphi) / \partial r$ будуть задавати деякі функції $F(\theta, \varphi) = u_0(a, \theta, \varphi)$, $G(\theta, \varphi) = \partial u_0(a, \theta, \varphi) / \partial r$, які при досить загальних умовах можна розкласти в ряд за сферичними гармоніками

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^{m=l} f_{lm} P_l^{|m|}(\cos \theta) e^{im\varphi}, G(\theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^{m=l} g_{lm} P_l^{|m|}(\cos \theta) e^{im\varphi}, \quad (6)$$

де коефіцієнти розкладів обчислюються за формулами:

$$f_{lm} = \frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \int_0^{2\pi} e^{im\varphi} d\varphi \int_0^\pi F(\theta, \varphi) P_l^{|m|}(\cos \theta) \sin \theta d\theta;$$

$$g_{lm} = \frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \int_0^{2\pi} e^{im\varphi} d\varphi \int_0^\pi G(\theta, \varphi) P_l^{|m|}(\cos \theta) \sin \theta d\theta.$$

Підстановка розкладів (5)–(6) в умови спряження для кожної пари індексів l, m приводить при $j = 1, 2, \dots, n-1$ до систем алгебраїчних рівнянь вигляду:

$$A_{lm}^{(j)} \left(\frac{r_j}{a} \right)^l + B_{lm}^{(j)} \left(\frac{a}{r_j} \right)^{l+1} = A_{lm}^{(j+1)} \left(\frac{r_j}{a} \right)^l + B_{lm}^{(j+1)} \left(\frac{a}{r_j} \right)^{l+1}; \quad (7)$$

$$A_{lm}^{(j)} \varepsilon_j l \left(\frac{r_j}{a} \right)^{l-1} + B_{lm}^{(j)} \varepsilon_j (l+1) \left(\frac{a}{r_j} \right)^{l+2} = A_{lm}^{(j+1)} \varepsilon_{j+1} l \left(\frac{r_j}{a} \right)^{l-1} + B_{lm}^{(j+1)} \varepsilon_{j+1} (l+1) \left(\frac{a}{r_j} \right)^{l+2};$$

а для $j = n$ матимемо систему

$$A_{lm}^{(n)} + B_{lm}^{(n)} = f_{lm} + B_{lm}^{(n+1)}, \quad \varepsilon_n (A_{lm}^{(n)} + B_{lm}^{(n)}) = \varepsilon_m (g_{mm} - (l+1) B_{lm}^{(n+1)}). \quad (8)$$

При цьому, як вказувалось $A_{lm}^{(n+1)} = 0, B_{lm}^{(1)} = 0$.

Для знаходження збуреного потенціалу необхідно мати тільки значення сталої $B_{lm}^{(n+1)}$. Зайві сталі виключимо із системи за допомогою трансляційних матриць. Як і в роботах [3,4,7] після деяких перетворень отримаємо вираз для матриці переходу від j -го до $(j+1)$ -го шару:

$$T_j^{(l)} = \frac{1}{\Delta_j^{(l)}} \begin{bmatrix} t_{11,j}^{(l)} & t_{12,j}^{(l)} \\ t_{21,j}^{(l)} & t_{22,j}^{(l)} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де $\Delta_j^{(l)} = -\varepsilon_{j+1} (2l+1) (a/r_j)^2$ з точністю до множника ε_{j+1} є визначник Вронського відповідних розв'язків, обчислений на межі поділу шарів, а елементи матриці визначаються за формулами:

$$t_{11,j}^{(l)} = -\varepsilon_{j+1} (l+1) \left(\frac{a}{r_j} \right)^2 - \varepsilon_j l \left(\frac{a}{r_j} \right)^2;$$

$$t_{12,j}^{(l)} = -\varepsilon_{j+1} (l+1) \left(\frac{a}{r_j} \right)^{2l+3} - \varepsilon_j (l+1) \left(\frac{a}{r_j} \right)^{2l+3};$$

$$t_{21,j}^{(l)} = -\varepsilon_{j+1} l \left(\frac{r_j}{a} \right)^{2l-1} + \varepsilon_j l \left(\frac{r_j}{a} \right)^{2l-1};$$

$$t_{22,j}^{(l)} = -\varepsilon_{j+1} l \left(\frac{r_j}{a} \right)^2 + \varepsilon_j (l+1) \left(\frac{r_j}{a} \right)^2.$$

Трансляційна матриця визначається добутком матриць переходу шарів

$$T_l(r_1, r_n) = \begin{bmatrix} t_{11}^{(l)} & t_{12}^{(l)} \\ t_{21}^{(l)} & t_{22}^{(l)} \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^{n-1} T_{n-j}^{(l)}. \quad (10)$$

Із застосуванням трансляційної матриці будемо мати:

$$\begin{bmatrix} A_{lm}^{(n)} \\ B_{lm}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11}^{(l)} & t_{12}^{(l)} \\ t_{21}^{(l)} & t_{22}^{(l)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{lm}^{(l)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11}^{(l)} & t_{12}^{(l)} \\ t_{21}^{(l)} & A_{lm}^{(l)} \end{bmatrix},$$

і тоді потенціал в останньому шарі буде визначатися за формулою:

$$U_n^{(l)} = t_{11}^{(l)} A_{lm}^{(l)} \left(\frac{r}{a} \right)^l + t_{21}^{(l)} A_{lm}^{(l)} \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1}, \quad (11)$$

а граничні умови (2) набувають вигляду:

$$(t_{11}^{(l)} + t_{21}^{(l)}) A_{lm}^{(l)} - B_{lm}^{(n+1)} = f_{lm}; \quad \varepsilon_n \left[t_{11}^{(l)} l - t_{21}^{(l)} (l+1) \right] A_{lm}^{(l)} + \varepsilon_m (l+1) B_{lm}^{(n+1)} = \varepsilon_m a g_{lm}. \quad (12)$$

Після знаходження коефіцієнтів для збуреного потенціалу отримаємо вираз:

$$u_p(r, \theta, \varphi) = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\varepsilon_m a g_{lm} \left[t_{11}^{(l)} + t_{21}^{(l)} \right] - \varepsilon_n f_{lm} \left[t_{11}^{(l)} l - t_{21}^{(l)} (l+1) \right]}{\varepsilon_m (l+1) \left[t_{11}^{(l)} + t_{21}^{(l)} \right] - \varepsilon_n \left[t_{11}^{(l)} l - t_{21}^{(l)} (l+1) \right]} \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} Y_l(\theta, \varphi). \quad (13)$$

Розглянемо докладніше однорідне поле з потенціалом $u_0 = -E_0 z = -E_0 \cos \theta$, що діє вздовж осі z . У цьому випадку в розкладі потенціалу зовнішнього поля маємо лише один член ($\cos \theta = P_1(\cos \theta)$, $l=1, m=0$), а $f_{10} = -E_0 a$, $g_{10} = -E_0 a$. Відповідно за випадком значень індексів $l=1, m=0$ всі коефіцієнти розкладів інших потенціалів обертаються на нуль. Вираз для збуреного потенціалу набуває вигляду (індекс “ lm ” опускаємо, і також позначаємо $t_{11}^{(1)} = t_{11}$, $t_{21}^{(1)} = t_{21}$):

$$u_p(r, \theta, \varphi) = \frac{\varepsilon_n [t_{11} - 2t_{21}] - \varepsilon_m [t_{11} + t_{21}]}{2\varepsilon_m [t_{11} + t_{21}] - \varepsilon_n [t_{11} - 2t_{21}]} \left(\frac{a}{r} \right)^3 E_0 r \cos \theta. \quad (14)$$

Звідси знаходимо вираз для обчислення поляризованості шаруватої кулі:

$$\alpha = 4\pi a^3 \frac{\varepsilon_n [t_{11} + 2t_{21}] - \varepsilon_m [t_{11} + t_{21}]}{2\varepsilon_m [t_{11} + t_{21}] + \varepsilon_n [t_{11} - 2t_{21}]} \quad (15)$$

Для суцільної кулі ($n=1$) слід прийняти $t_{11}=1$, $t_{21}=0$ і тоді отримаємо вираз, наведений вище. Для кулі в оболонці ($n=2$) після деяких перетворень будемо мати

$$\alpha = 4\pi a^3 \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_m)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m)r_2^3 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_m + 2\varepsilon_2)r_1^3}{(\varepsilon_2 + 2\varepsilon_m)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m)r_2^3 + 2(\varepsilon_2 - \varepsilon_m)(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)r_1^3}. \quad (16)$$

Цей вираз збігається з формулою, наведеною в [1].

Наведемо деякі результати чисельних розрахунків. Розглянемо окрему біметалеву кульову частинку, яка складається із срібного ядра і золотої оболонки. Для опису діелектричної проникності срібла і золота використовуємо модель Друде:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_p)}, \quad (17)$$

де ω_p – плазмова частота для суцільного матеріалу; γ_p – частота поглинання. У розрахунках прийнято, що для срібла $\varepsilon_{\infty} = 4,5$, $\gamma_p = 0,24 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$, а

для золота $\varepsilon_\infty = 10,0$, $\gamma_p = 0,34 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$ (i – уявна одиниця) [1,8,9]. На рис.2 показана спектральна залежність уявної частини безрозмірної поляризовності $\alpha^* = \alpha / (4\pi a^3)$ кульової частинки із срібним ядром та золотою оболонкою при деяких значеннях об'ємного заповнення $f = (r_1 / r_2)^3$ (зовнішній радіус частинки $a = r_2$ зберігався незмінним). Для навколишнього середовища прийнято значення діелектричної проникності $\varepsilon_m = 1,7$. При цьому спектральна залежність уявної частини ефективної діелектричної проникності розрахована за формулою Максвелл–Гарнетта :

$$\frac{\tilde{\varepsilon} - \varepsilon_m}{\tilde{\varepsilon} + 2\varepsilon_m} = f\alpha / a^3; \quad \tilde{\varepsilon} = \frac{1 + 2f\alpha^*}{1 - f\alpha^*} \varepsilon_m; \quad \alpha^* = \alpha / a^3 \quad (18)$$

при підстановці до неї знайденого значення поляризовності для біметалевих кульових частинок (срібне ядро, золота оболонка).

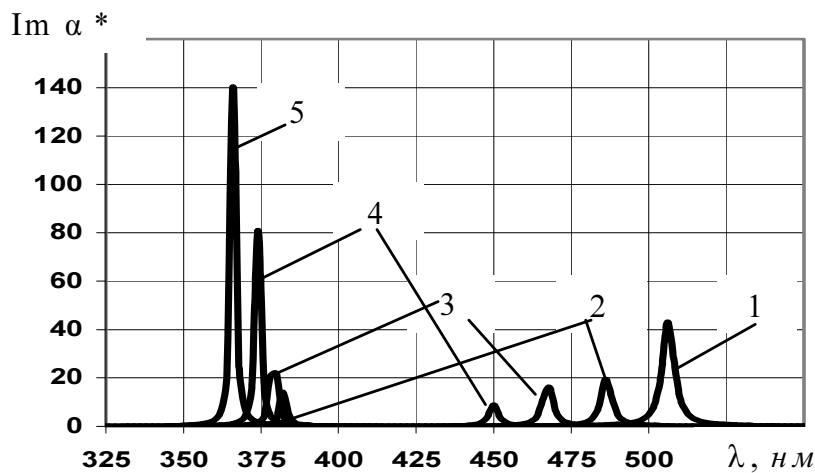


Рис.2. Спектральна залежність уявної частини безрозмірної поляризовності $\alpha^* = \alpha / (4\pi a^3)$ кульової частинки із срібним ядром та золотою оболонкою при різних значеннях об'ємного заповнення $\nu = (r_1 / r_2)^3$:
 1 – $\nu = 0$ (суцільна золота частинка); 2 – $\nu = 0,25$; 3 – $\nu = 0,5$; 4 – $\nu = 0,75$;
 5 – $\nu = 1$ (суцільна срібна частинка)

З наведеного графіка (рис.2) випливає, що наявність оболонки призводить до розщеплення величини довжин хвиль поверхневих плазмонів. Так, у проміжку довжин хвиль між $\lambda_{Ag} = 366 \text{ нм}$ (довжина хвилі поверхневого плазмону суцільної срібної частинки) і $\lambda_{Au} = 506 \text{ нм}$ (довжина хвилі поверхневого плазмону суцільної золотої частинки) спостерігаються два максимуми, розташовані між вказаними граничними значеннями. При цьому абсолютні значення максимумів суттєво зменшуються. Оскільки поглинання в електростатичному наближенні пропорційне $\text{Im} \alpha$, то максимуми поглинання на окремій частинці будуть повторювати залежності, які наведені на рис.2.

Висновки

У роботі запропоновано і практично реалізовано методику розрахунку поляризованості структурно-неоднорідних кульових частинок. Наведені приклади тестових розрахунків підтверджують її високу ефективність. Це відкриває можливість теоретичних досліджень (проведення чисельних експериментів) для визначення як характеристик взаємодії електромагнітного випромінювання з окремими частинками або їх ансамблями, так і діелектричної функції матрично-дисперсних систем з такими включеннями. Така обставина є особливо суттєвою при дослідженні біологічних об'єктів (клітин, бактерій) методами оптичної або діелектричної спектроскопії, моделями яких можуть бути структурно неоднорідні кулі із врахуванням діелектричної анізотропії.

Список літератури

1. Борен К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен М.: Мир, 1986. – 664 с.
2. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1970. – 856 с.
3. Гречко Л.Г. Багатошаровий еліпсоїд в електростатичному полі / Л.Г. Гречко, Л.Б. Лерман, Н.Г. Шкода // Вісник Київ. ун-ту. Серія: фіз.-мат. науки. – 2004. – №1. – С. 386–394.
4. Гречко Л.Г. Розсіювання електромагнітного випромінювання на багатошаровій кулі / Л.Г. Гречко, Л.Б. Лерман, Н.Г. Шкода // Вісник Київ. ун-ту. Серія: фіз.-мат. науки. – 2004. – №3. – С. 376–384.
5. Лерман Л.Б. Применение уравнений плоской задачи теории упругости к исследованию колебаний протяженных слоистых плит с внутренними линейными опорами / Л.Б. Лерман // Прикл. механика. – 1994. – № 6. – С. 66–69.
6. Максвелл-Вагнерівська поляризація матричних дисперсних систем з кульовими напівпровідниковими включеннями в електричному полі / Ю.С. Гончарук, Л.Г. Гречко, О.Ю. Грищук [та ін.] // Вісник Київ. ун-ту. Серія: фіз.-мат. науки. – 2006. – №2. – С. 376–384.
7. Поверхневі моди в багатошарових частинках еліпсоїдальної форми / Л.Г. Гречко, Л.Б. Лерман, Л.М. Білокриницька, С.В. Шостак // Вісник Київ. ун-ту. Серія: фіз.-мат. науки. – 2006. – №4. – С. 416–425.
8. Узагальнений метод ефективного середовища для розрахунку діелектричної проникності неоднорідних середовищ / Л.Г. Гречко, Л. Б. Лерман, О.Я. Покотило [та ін.] // Вісник Київ. ун-ту. Серія: фіз.-мат. науки. – 2005. – №3. – С.402–412.
9. Grechko L.G, Malnev V.N., Shkoda N.G, Shostak S.V. Electrodynamical properties of the matrix disperse systems with two-layered inclusions // Chemistry, Physics and Technology of Surfaces. – 2002, V.7. – P. 89–95.
10. Gurwich I., Kleiman M., Shiloah N., Cohen A. Scattering of electromagnetic radiation by multilayered spheroidal particles: recursive procedure // Applied optics. – 2000. – Vol. 39, No. 3. – P. 470–477.
11. Hongxing Xu. Surface plasmon Photonics. – Thesis for the degree of doctor of philosophy. – Goteborg University, 2002. – 92 p.
12. Moroz A. A recursive transfer-matrix solution for a dipole radiating and outside a stratified sphere // Annals of Physics. – 2005. – 315. – P. 352–418.
13. Wu Z.S., Wang Y.P. Electromagnetic scattering for multi-layered sphere: recursive algorithm // Radio Sci. – 1991, V. 26. – P. 1393–1401.

Определена поляризованность многослойного шара. Для построения решений задачи электростатики использованы трансляционные матрицы. Приведены примеры тестовых расчетов.

Поляризованность, многослойные шары, трансляционные матрицы.

A polarizability of multi-layer spheres with dielectric isotropic and orthotropic layers is determined. To construct solutions of electrostatics problems the transmission matrixes. Examples of test calculations are presented.

Polarizability, multilayer balls, translational matrix.

УДК 536.24

РОЗРАХУНОК ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛОВОГО СОЛЬОВОГО АКУМУЛЯТОРА

В.Г. Горобець, доктор технічних наук

Є.О. Антипов, аспірант*

Розроблено методику розрахунку теплового сольового акумулятора з фазовим переходом акумулюючого матеріалу. Проведено розрахунок акумулятора теплоти для обігріву будівельних приміщень. Визначено розміри акумулятора та масу акумулюючого матеріалу для добового теплоспоживання. Розраховано теплові втрати в навколишнє середовище та часові проміжки для «зарядки» і «розрядки» теплового акумулятора.

Тепловий сольовий акумулятор, акумулюючий матеріал, теплові втрати, фазовий перехід.

Акумуляція теплоти доцільна і може широко застосовуватися в тих випадках, коли є надлишок теплової енергії або інших видів енергії, які можна перетворити в теплову в певні проміжки часу. Надлишкову теплову енергію після її акумуляції можна використовувати в інші періоди часу, для яких потреба в ній зростає. Акумуляція теплоти в теплових акумуляторах (ТА) може здійснюватися або за рахунок лише теплоємності теплоносія, або додаткового використання фазового переходу плавлення з твердого стану в рідкий теплоакumuлюючого матеріалу (ТАМу) [1–7].

Як теплоакumuлюючі матеріали вибрано солі та їх евтектики із загальною енергоємністю 200–1900 МДж/м³. Вказані матеріали мають низьку вартість і доступні у великих кількостях.

Перспективним напрямом теплоакumuлювання є акumuлювання низькопотенційної теплоти навколишнього середовища, використовуючи, наприклад, теплові насоси та (або) сонячні колектори [5–6]. Іншим джерелом теплової енергії може бути електрична енергія в нічний час при вико-

*Науковий керівник – доктор технічних наук В.Г. Горобець

© В.Г. Горобець, Є.О. Антипов, 2013

Определена поляризованность многослойного шара. Для построения решений задачи электростатики использованы трансляционные матрицы. Приведены примеры тестовых расчетов.

Поляризованность, многослойные шары, трансляционные матрицы.

A polarizability of multi-layer spheres with dielectric isotropic and orthotropic layers is determined. To construct solutions of electrostatics problems the transmission matrixes. Examples of test calculations are presented.

Polarizability, multilayer balls, translational matrix.

УДК 536.24

РОЗРАХУНОК ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛОВОГО СОЛЬОВОГО АКУМУЛЯТОРА

В.Г. Горобець, доктор технічних наук

Є.О. Антипов, аспірант*

Розроблено методику розрахунку теплового сольового акумулятора з фазовим переходом акумулюючого матеріалу. Проведено розрахунок акумулятора теплоти для обігріву будівельних приміщень. Визначено розміри акумулятора та масу акумулюючого матеріалу для добового теплоспоживання. Розраховано теплові втрати в навколишнє середовище та часові проміжки для «зарядки» і «розрядки» теплового акумулятора.

Тепловий сольовий акумулятор, акумулюючий матеріал, теплові втрати, фазовий перехід.

Акумуляція теплоти доцільна і може широко застосовуватися в тих випадках, коли є надлишок теплової енергії або інших видів енергії, які можна перетворити в теплову в певні проміжки часу. Надлишкову теплову енергію після її акумуляції можна використовувати в інші періоди часу, для яких потреба в ній зростає. Акумуляція теплоти в теплових акумуляторах (ТА) може здійснюватися або за рахунок лише теплоємності теплоносія, або додаткового використання фазового переходу плавлення з твердого стану в рідкий теплоакумулюючого матеріалу (ТАМу) [1–7].

Як теплоакумулюючі матеріали вибрано солі та їх евтектики із загальною енергоємністю 200–1900 МДж/м³. Вказані матеріали мають низьку вартість і доступні у великих кількостях.

Перспективним напрямом теплоакумулювання є акумулювання низькопотенційної теплоти навколишнього середовища, використовуючи, наприклад, теплові насоси та (або) сонячні колектори [5–6]. Іншим джерелом теплової енергії може бути електрична енергія в нічний час при вико-

*Науковий керівник – доктор технічних наук В.Г. Горобець

© В.Г. Горобець, Є.О. Антипов, 2013

ристанні багатотарифних лічильників електроенергії. При цьому вартість теплової енергії суттєво знижується. Може бути розроблений акумулятор теплоти для добового акумулювання теплоти або сезонний акумулятор, який акумулює теплоту навколишнього середовища протягом весняно-літньо-осіннього періоду часу, а використовує накопичену теплоту в зимово-осінній період. При розробці добових або сезонних акумуляторів використовують ТАМи з низькою температурою плавлення, наприклад глауберову сіль $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, гіпосульфит натрію $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, бішофіт $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ тощо.

Мета досліджень – розробка методики розрахунку добового теплового сольового акумулятора на фазових перетвореннях ТАМу. Розрахунок ТА з низькою температурою плавлення ТАМу, що дає змогу акумулювати теплоту сонячного випромінювання, теплоту ґрунту, водойм та інших низькопотенційних альтернативних джерел енергії з використанням геліоколекторів і теплових насосів та дешевої електричної енергії в нічний період часу.

Матеріали та методика досліджень. Тепловий розрахунок ТА. Враховуючи те, що температура теплоносія при опаленні приміщень з використанням, наприклад водяної теплої підлоги, становить 30–50 °С, як ТАМ вибрано сіль $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, а теплоізолюючим матеріалом для побутового ТА використано поліуретан.

Теплофізичні властивості ТАМу та поліуретану:

- температура плавлення (кристалізації) $t_{\text{кр}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$;
- густина твердого ТАМу $\rho_{\text{ТВ}} = 1,52 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;
- масова теплоємність ТАМу $C_{\text{ф}} = 1,22 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;
- прихована теплота плавлення (кристалізації) $r_{\text{ф}} = 275 \text{ кДж/кг}$;
- теплоізоляція – плити з пінополіуретану:
 - коефіцієнт теплопровідності $\lambda_0 = 0,04 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$;
 - товщина шару теплоізоляції $\delta_{\text{із}} = 0,05\text{--}0,1 \text{ м}$;
- температура ядра: максимальна $t_{\text{max}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; мінімальна $t_{\text{min}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура повітря в приміщенні $t_0 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура ґрунту $t_{\text{зов}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура теплоносія в колекторі або тепловому насосі $t_{\text{в,к}} = 60\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура води в підлоговій системі опалювання $t_{\text{в,о}} = 20\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Обмежуючи інтервал робочих температур ядра акумулятора значеннями t_{max} і t_{min} , а також нехтуючи тепловими втратами пристрою і теплоємністю його конструкції, тепловий баланс пристрою можна виразити співвідношенням:

$$Q_{\text{ак}} = V_{\text{ф}} \rho_{\text{ф}} (C_{\text{ф}} (t_{\text{кр}} - t_{\text{min}}) + r_{\text{ф}}), \quad (1)$$

де $V_{\text{ф}}$ – об'єм, який займає ТАМ, що проходить фазове перетворення, м^3 ;

$\rho_{\text{ф}}$ – густина ТАМу (в тому однофазному стані, при якому вона менша), кг/м^3 ;

$C_{\text{ф}}$ – масова теплоємність ТАМу (в інтервалі температур $t_{\text{max}}\text{--}t_{\text{min}}$), $\text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;

r_{ϕ} – теплота фазового переходу ТАМу, кДж/кг.

Розрахунок необхідного об'єму ТАМу. Для розрахунку теплового акумулятора необхідно визначити кількість теплоти, яка необхідна для опалення та гарячого водопостачання приміщень. Виберемо, що об'єм приміщення, яке необхідно забезпечити теплою становить 85 м^3 . Згідно з нормами для опалення 1 м^3 житлового приміщення необхідно витратити 22 Вт теплової енергії. При цьому необхідна кількість теплоти для опалення вибраного приміщення – 145,9 МДж на 1 добу.

При виборі як ТАМу солі $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ($\rho_{\phi} = 1520 \text{ кг/м}^3$, $r_{\phi} = 275 \text{ кДж/кг}$) і, приймаючи значення $t_{\text{кр}} = 35^\circ\text{C}$, $t_{\text{min}} = 25^\circ\text{C}$, отримаємо:

$$V_{\phi} = \frac{Q_{\text{ак}}}{\rho_{\phi} C_{\phi} (t_{\text{кр}} - t_{\text{min}}) + \rho_{\phi} r_{\phi}} \quad (2)$$

Оцінюючи теплові втрати значенням 15 % від величини $Q_{\text{ак}}$, і, враховуючи їх з коефіцієнтом $\psi=1,15$, знаходимо необхідний об'єм ТАМу в акумулюючому ядрі. Відповідно, маса компонента ядра:

$$V_{\text{там1}} = \psi V_{\phi} = 0,36 \text{ м}^3. \quad M_{\text{там1}} = \rho_{\phi} V_{\phi} = 549,236 \text{ кг}.$$

Визначення маси корпусу ТА. Оболонка теплоакумулятора являє собою сталевий корпус, в якому знаходиться ТАМ. При нагріванні ядра акумулятора теплота акумулюється як в ТАМі, так і в матеріалі корпусу $H_{\text{я}} = H_{\text{там}} + H_{\text{к}}$. Кількість теплоти, акумульованої корпусом визначається виразом:

$$H_{\text{к}} = M_{\text{к}} C_{\text{к}} (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}), \text{ кДж},$$

де $M_{\text{к}}$ – маса корпусу, кг; $C_{\text{к}}$ – масова питома теплоємність матеріалу корпусу, кДж/кг $^\circ\text{C}$.

Для об'єму ТАМу, що становить $0,36 \text{ м}^3$, проектуємо металевий корпус з геометричними розмірами $1,1 \times 1,1 \times 0,3 \text{ м}$ або $2,2 \times 0,55 \times 0,3 \text{ м}$. Як матеріал для корпусу ядра використовуємо листову сталь марки AISI439 (12x18H10T) товщиною 1 мм. Питома теплоємність сталі $C_{\text{к}}=0,5 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{C}$.

Маса корпусу визначається за формулою, кг: $M_{\text{к}} = F_{\text{я}} m_{\text{ст}}$,

$$M_{\text{к}} = 19,8 \text{ кг}, \quad \text{де } F_{\text{я}} - \text{площа поверхні стін ядра, } F_{\text{я}} = 3,74 \text{ м}^2.$$

Теплота, акумульована корпусом, $H_{\text{к}} = 345,25 \text{ кДж}$.

Геометричні розміри ТА наведено на рис. 1.

Розрахунок потужності нагрівача під час заряду ТА. Теплоакумулятор являє собою пристрій неперервної дії. Задаємося такими параметрами:

- добовий час заряду – 8–13 год;
- добовий час розряду – 24 год;
- тривалість режимів роботи ТА на добу, с.:
- перший етап:

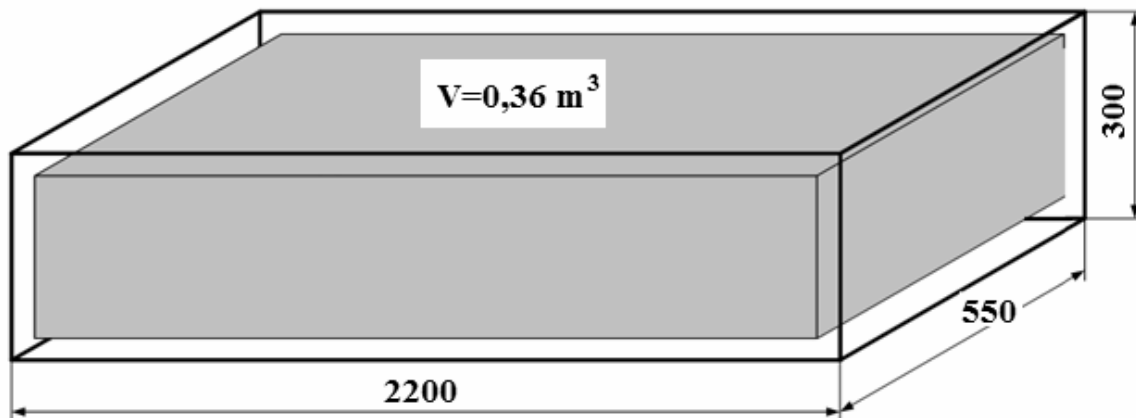


Рис. 1. Геометричні розміри теплоізовованого корпусу ТА з ТАМом

- заряд – 14400 с;
- розряд – 14400 с;
- другий етап:
 - розряд – 28800 с.

За умови використання добової величини акумульованої теплової енергії на базі сонячних колекторів, значення останньої становить, Вт:

$$Q_{к.с.о} = A_{к.с.о} \eta_{річ} q_i, \quad (3)$$

де $A_{к.о}$ – площа поглинаючої поверхні геліоустановки, m^2 ; $\eta_{річ}$ – річний (сезонний) ККД установки; q_i – інтенсивність сонячної радіації, що падає на площину колектора, $Вт/м^2$.

Підставивши відповідні дані, отримаємо: $Q_{к.с.о} = 37641,98$ Вт.

При використанні теплового насоса необхідна теплова потужність повинна мати таку ж величину.

Визначення втрат теплоти через теплоізоляцію. Для розрахунку теоретичних значень часу заряду, тепловідводу при заряді, часу розряду та тепловідводу при розряді необхідно визначити коефіцієнти тепловіддачі для стінки акумулятора з теплоізоляцією.

Тепловий потік від ядра передається стінці теплоізоляції, звідки частина його втрачається (теплопровідністю через теплоізоляцію) в навколишнє середовище, Вт:

$$Q_{із} = K_{із} F_{ст.із} (t_{ст.із} - t_{\min}), \quad (4)$$

де $F_{ст.із}$ – площа поверхні стінки теплоізоляції $F_{ст.із} = 3,8$ m^2 ; $t_{ст.із}$ – температура стінки теплоізоляції, $^{\circ}C$.

Коефіцієнт теплопередачі від стінки теплоізоляції $K_{із}$, $Вт/м^2$ $^{\circ}C$, визначається за формулою:

$$K_{із} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{там}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{із}}{\lambda_{із}} + \frac{1}{\alpha_{із}}}, \quad (5)$$

де $\alpha_{там}$, $\alpha_{із}$ – відповідно коефіцієнт тепловіддачі від ТАМу до стінки корпусу ядра та від стінки теплоізоляції в навколишнє середовище; для

натрієвої солі маємо $\alpha_{\text{ТАМ}} = 2,32\text{--}11,63 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$; відповідно для пінополіуретану $-\alpha_{i3} = 10\text{--}12 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$; $\delta_{\text{СТ}}$, δ_{i3} – товщина стінки корпусу ядра та шару ізоляції, м; $\lambda_{\text{СТ}}$, λ_{i3} – коефіцієнт теплопровідності сталі марки AISI439 (12x18H10T) та пінополіуретану, $\lambda_{\text{СТ}} = 16,88 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{С}$, $\lambda_{i3} = 0,0416 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$.

Коефіцієнт теплопередачі згідно з (5) має значення

$$K_{i3} = 0,491 \frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}} \cdot \text{Величина теплового потоку, що передається через}$$

стінку теплоізоляції в навколишнє середовище (вважаємо, що акумулятор знаходиться в ґрунті), при різних температурних режимах роботи ТА (в інтервалі температур $25\text{--}60 \text{ }^\circ\text{С}$) знаходиться в діапазоні:

$$Q_{i3} = 27,98 \text{--}93,27 \text{ Вт}.$$

Розрахунок робочих параметрів ТА під час нагріву ТАМу.

Теплопідвід і час нагріву ядра від $25 \text{ }^\circ\text{С}$ до $35 \text{ }^\circ\text{С}$. Враховуючи геометричні розміри корпусу ядра теплоакумулятора та значення обрахованої вище кількості теплоти, задаємося такими параметрами теплообмінної поверхні пучка труб, що знаходиться в ТА:

- матеріал труб – нержавіюча сталь марки SUS304;
- зовнішній діаметр – $d_3 = 0,034 \text{ м}$;
- відстань між нагрівними трубами – $0,11 \times 0,11 \text{ м}$;
- кількість нагрівних труб – $n_{\text{тр}} = 5 \text{ шт.}$

Теплопідвід при нагріві ядра від $25 \text{ }^\circ\text{С}$ до $35 \text{ }^\circ\text{С}$. Час, який потрібний для прогріву ядра від $25 \text{ }^\circ\text{С}$ до $35 \text{ }^\circ\text{С}$, визначається теплотою, необхідною для прогріву ТАМу, та тепловим потоком, який витрачається на його прогрів, с:

$$\tau_{31} = \frac{H_{31}}{Q_{31}}, \quad (6)$$

де Q'_{31} – теплова енергія, яку ми отримуємо від сонячних колекторів або теплового насоса (із врахуванням величини теплового потоку, який відводиться від нагрівних труб під час нагріву ядра ТА, а також втрат теплової енергії через шар теплоізоляції), Вт:

$$Q'_{31} = Q_{31} - Q_{i3}, \quad (7)$$

де Q_{i3} – тепловтрати через шар ізоляції з пінополіуретану (при середньому значенні температури в інтервалі від $25 \text{ }^\circ\text{С}$ до $35 \text{ }^\circ\text{С}$), Вт; Q_{31} – тепловий потік, який відводиться від труб, Вт.

Величину останнього знаходимо з виразу:

$$Q_{31} = K_{\text{см}} F_{\text{тр}} (t_{\text{с}} - t_{\text{я}}), \quad (8)$$

а $K_{ст}$ – коефіцієнт теплопередачі від сталеві труби до ТАМу, Вт/м² °С; визначається за формулою:

$$K_{ст} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{\delta_{ст.тр}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{ст}}}, \quad (9)$$

$$L_{тр} = nl_1 = 11,0 \text{ м}; F_{тр} = 1,28 \text{ м}^2.$$

де α_v – коефіцієнт тепловіддачі від води до стінки сталеві труби, згідно з виконаним розрахунком $\alpha_v = 2560 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$; $\alpha_{ст}$ – коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до теплоакумуючого матеріалу (для сталі марки SUS304 – $\alpha_{ст} = 15 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$); $\delta_{ст.тр}$ – товщина стінки труби, $\delta_{ст.тр} = 0,002 \text{ м}$; $\lambda_{ст}$ – коефіцієнт теплопровідності: для сталі марки SUS304, $\lambda_{ст} = 16,88 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{С}$; $F_{тр}$ – загальна площа поверхні стінки труб, м²,

$$F_{тр} = \pi d L_{тр},$$

де $L_{тр}$ – загальна довжина всіх нагрівних труб, м; Підставивши значення, отримаємо: t_v – температура води в системі в початковий період заряду ТА, $t_v = 30 ^\circ\text{С}$.

Маса нагрівальних труб $M_{тр}$, кг визначається за формулою:

$$M_{тр} = L_{тр} m_{тр}, \quad (10)$$

де $m_{тр}$ – маса 1 м. труби з нержавіючої сталі марки SUS304, $m_{тр} = 2,42 \text{ кг}$. Звідки отримаємо:

$$M_{тр} = 29,282 \text{ кг}.$$

Величина коефіцієнта теплопередачі обчислюється за формулою (9), звідки і отримаємо $K_{ст} = 14,79 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$.

Величина теплового потоку, який відводиться від труб (у початковий період акумулювання при температурі ядра $t_{я} = 25\text{--}35 ^\circ\text{С}$) рівна:

$$Q_{з1} = 946,56 \text{ Вт}.$$

Необхідна кількість теплової енергії, отриманої від сонячних колекторів або теплового насоса, яка витрачається на нагрів ядра ТА:

$$Q_{з1}' = 909,25 \text{ Вт}. \quad (11)$$

Кількість теплоти, яка необхідна для нагріву ядра від $25 ^\circ\text{С}$ до $35 ^\circ\text{С}$, становить:

$$H_{з1} = M_{там} C_{\phi} (t_{кр} - t_{min}) + M_{к} C_{к} (t_{кр} - t_{min}) + M_{тр} C_{ст} (t_v - t_{min}) = 7,605 \text{ МДж}. \quad (12)$$

Час прогріву ядра від $25 ^\circ\text{С}$ до $35 ^\circ\text{С}$:

$$\tau_{31} = 8364 \text{ с} = 2,32 \text{ год.}$$

Теплопідвід при плавленні ТАМ (35 °С) Для другої стадії «заряду» акумулятора на поверхні труб має місце природна конвекція розплавленого ТАМу. Оцінки показують, що при цьому коефіцієнт тепловіддачі на поверхні труб рівний $\alpha_{ст} = 140 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$. При обчисленні коефіцієнта тепlopередачі за формулою (9) отримаємо $K_{ст}=130,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$.

Величина теплового потоку, який відводиться від труб:

$$Q_{32} = Q_{31} = K_{ст} F_{тр} (t_{в,к} - t_{я}) = 7523,1 \text{ Вт.} \quad (13)$$

Кількість теплоти, яка необхідна для плавлення ТАМу:

$$H_{32} = M_{там} r_{\phi} = 150,754 \text{ МДж.} \quad (14)$$

Теплова енергія, яка витрачається при плавленні ядра ТА:

$$Q_{32}' = Q_{32} - Q_{из}.$$

Величина теплового потоку, який відводиться від труб (в другий період акумулювання при температурі ядра $t_{я}=35 \text{ } ^\circ\text{С}$) рівна:

$$Q_{31} = 7523,1 \text{ Вт.}$$

Необхідна кількість теплової енергії, отриманої від сонячних колекторів або теплового насоса, яка витрачається на нагрів ядра ТА:

$$Q_{32}' = 7476,4 \text{ Вт.}$$

Час плавлення ТАМу:

$$\tau_{32} = \frac{H_{32}}{Q_{32}'} = 20164 \text{ с} = 5,6 \text{ год.} \quad (15)$$

Теплопідвід при нагріві ядра від 35 °С до 60 °С. Теплота, яка відводиться від труб:

$$Q_{33} = Q_{31} = K_{ст} F_{тр} (t_{в} - t_{я}) = 5432,96 \text{ Вт.} \quad (16)$$

Кількість теплоти, яка необхідна для нагріву ядра від 35 °С до 60 °С, становить:

$$H_{33} = M_{там} C_{\phi} (t_{max} - t_{кр}) + M_{к} C_{к} (t_{max} - t_{кр}) + M_{тр} C_{ст} (t_{max} - t_{кр}) = 17,361 \text{ МДж.} \quad (17)$$

Теплова енергія, яка витрачається при нагріванні розплавленого ядра ТА:

$$Q_{33}' = 7460,6 \text{ Вт.}$$

Час прогріву ядра:

$$\tau_{33} = \frac{H_{33}}{Q_{33}'} = 2327 \text{ с} = 0,65 \text{ год.} \quad (18)$$

Розрахунок робочих параметрів ТА під час охолодження та кристалізації ТАМу.

При розрахунку охолодження теплового акумулятора припустимо, що кількість труб, в яких протікає вода з системи опалення рівна $n=15$ шт.. Площа поверхні труб визначається за формулою

$$L_{mp} = nl_1 = 33,0 \text{ м}^2,$$

де L_{mp} – загальна довжина всіх нагрівних труб, м:

Підставивши значення, отримаємо: $F_{mp}=3,84 \text{ м}^2$.

Загальна маса труб

$$M_{mp} = 79,84 \text{ кг}.$$

Визначення кількості відданої теплоти та часу охолодження ядра при “розряді” ТА (від 60 °С до 35 °С). Кількість відданої теплоти:

$$H_{p1} = M_{там} C_{\phi} (t_{max} - t_{kp}) + M_{\kappa} C_{\kappa} (t_{max} - t_{kp}) + M_{mp} C_{cm} (t_{max} - t_{kp}) = 17,361 \text{ МДж.} \quad (19)$$

Час охолодження рідкого ТАМу від 60 °С до 35 °С, с:

$$\tau_{p1} = \frac{H_{p1}}{K_{cm} F_{mp} (t_{max} - t_{kp}) + K_{iz} F_{iz} (t_{max} - t_{kp})}, \quad (20)$$

де α_{iz} – коефіцієнт теплопередачі для теплоізоляції; K_{cm} – коефіцієнт теплопередачі через стінку, Вт/м²·°С.

Згідно з розрахунками

$$\alpha_{iz} = 0,491 \text{ Вт / м}^2 \cdot ^\circ\text{С};$$

$$K_{cm}=130,6 \text{ Вт/м}_2 \cdot ^\circ\text{С}. \quad (21)$$

Підставивши, отримаємо:

$$\tau_{p1} = \frac{17361000}{2194,7} = 7910 \text{ с} = 2,2 \text{ год}.$$

Охолодження ядра при кристалізації ТАМу. Теплота, віддана при кристалізації:

$$H_{p2} = M'_{там} r_{\phi} = 150,754 \text{ МДж}. \quad (22)$$

Величина відведеної трубами теплоти (з урахуванням тепловтрат через ізоляцію):

$$Q_{p2} = Q_{iz} + K_{cm} F_{mp} (t_{я} - t_{o}) = 2554,4 \text{ Вт}. \quad (23)$$

Час охолодження ТАМу:

$$\tau_{p2} = \frac{H_{p2}}{Q_{p2}} = \frac{150754000}{2554,4} = 59017 \text{ с} = 16,4 \text{ год}. \quad (24)$$

Охолодження ядра від 35 °С до 25 °С. Кількість теплоти, яка необхідна для охолодження ядра від 35 °С до 25 °С, буде:

$$H_{p3} = M_{там} C_{\phi} (t_{кр} - t_{min}) + M_{к} C_{к} (t_{кр} - t_{min}) + M_{тр} C_{ст} (t_{г} - t_{min}) = 7,01 \text{ МДж} . \quad (25)$$

Величина відведеної трубами теплоти (з урахуванням тепловтрат через ізоляцію):

$$Q_{p3} = Q_{iz} + K_{ст} F_{тр} (t_{я.сер} - t_o) = 305,76 \text{ Вт} . \quad (26)$$

Час охолодження ТАМ:

$$\tau_{p3} = \frac{H_{p3}}{Q_{p3}} = \frac{7010000}{305,76} = 22927 \text{ с} = 6,4 \text{ год} . \quad (27)$$

Результати досліджень. Результати розрахунку тепловідводу при заряді та розряді ТА наведено в таблиці.

Розрахунковий та заданий час роботи акумулятора в різних режимах

Режим роботи ТА	Температура, °С	Тривалість роботи, год.	
		розрахована	задана
Заряд	25 – 35	2,32	
	35	5,6	
	35 – 60	0,65	8,0 – 11,0
	60 – 35	2,2	
Розряд	35	16,4	
	35 – 25	6,4	24,0

Схема розміщення трубного пучка в тепловому акумуляторі наведена на рис. 2.

Враховуючи те, що реальний ККД плоских сонячних колекторів знаходиться в межах 22–40 % (величину ККД отримано дослідним шляхом) від номінального розрахункового значення, яке склало 64 %, що майже в 2 рази більше за реальне, тому пропонується залишити прийняті параметри теплообмінної поверхні без змін.

Щодо тривалості роботи ТА в режимі “заряд”, то як видно з таблиці, розрахункове значення менше заданого, але враховуючи реальне значення ККД плоских сонячних колекторів, а також час роботи ТА в режимі “розряд”, вважаємо, що параметри теплообмінної поверхні (кількість нагрітих труб та їх діаметр), є оптимальними для обох режимів роботи ТА.

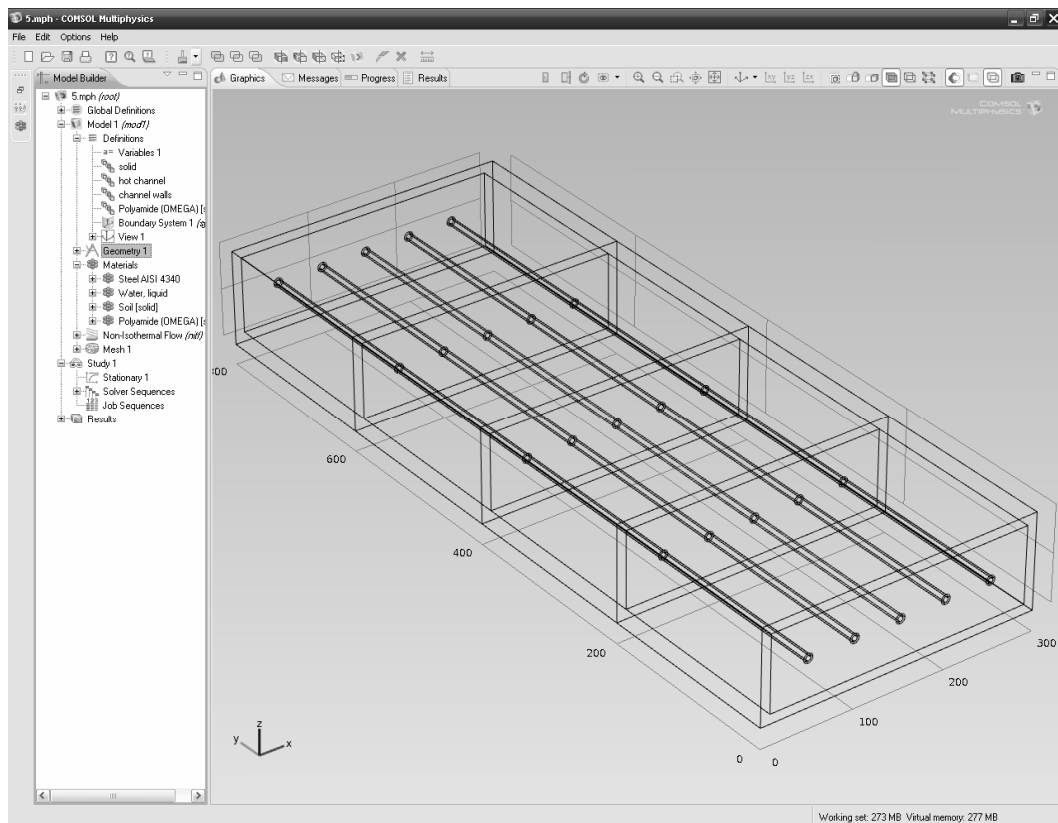


Рис. 2. Схема теплового аккумулятора

Висновки

Проведені розрахунки показали, що для добового акумулювання теплової енергії з подальшим її використанням в системі теплозабезпечення приміщення об'ємом 80 м^3 , потрібен ТА з такими параметрами:

- матеріал труб – нержавіюча сталь марки SUS304;
- зовнішній діаметр $d_3 = 0,034 \text{ м}$;
- відстань між нагрівними трубами $0,11 \times 0,11 \text{ м}$;
- кількість нагрівних труб $n_{\text{тр}} = 5 \text{ шт.}$,
- кількість охолоджуючих труб $n_{\text{тр}} = 15 \text{ шт.}$,
- теплоакумуючий матеріал – сіль $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$;
- маса ТАМу – 550 кг ;
- розміри аккумулятора – $2,2 \times 0,55 \times 0,3 \text{ м}$.

Список літератури

1. Бекман Г. Тепловое аккумулирование энергии / Г. Бекман, П. Гилли – Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 272 с.
2. Быстров В.П. Теплоаккумуляторы с использованием фазового перехода / В.П. Быстров, А.В. Ливчак // Вопросы экономии теплоэнергетических ресурсов в системах вентиляции и теплоснабжения. Сб. науч. трудов. – М.: Изд-во ЦНИИЭПИО, 1984. – С.75–90.
3. Гулиа Н.В. Накопители энергии / Н.В. Гулиа. – М.: Мир, 1980. – 321 с.
4. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман. – М.: Мир, 1977. – 312 с.

5. Елистратов В.В. Аккумуляирование солнечной энергии / В.В. Елистратов // Нетрадиционная энергетика и технология: материалы междунар. конф. – Ч. 1. – Владивосток: ДВО РАН, 1975. – С. 32.

6. Матвеев В.М. Приближенный расчет теплопередачи в аккумуляторах тепла солнечных энергоустановок / В.М. Матвеев // Гелиотехника. – 1971. – №5. – С. 43–45.

7. Шишкин Н.Д. Тепловые аккумуляторы с фазовым переходом / Н.Д. Шишкин, Ю.В. Цымбалюк. – Ростов на Дону: Просвещение, 2005. – 120 с.

Разработана методика расчета теплового солевого аккумулятора с фазовым переходом аккумулирующего материала. Проведен расчет аккумулятора теплоты для обогрева строительных помещений. Определены размеры аккумулятора и массу аккумулирующего материала для суточного теплопотребления. Рассчитаны тепловые потери в окружающую среду и временные промежутки для «зарядки» и «разрядки» теплового аккумулятора.

Тепловой солевой аккумулятор, аккумулирующий материал, тепловые потери, фазовый переход.

The method of calculation of the thermal battery with electrolyte phase transition of accumulating material is developed. The calculation of heat battery for heating of building space is made. Size accumulator battery and weight accumulating material for daily heat consumption are found. Heat loss to the environment and time period to "charge" and "discharge" of thermal battery are calculated.

Heat salt battery, accumulating material, heat loss, phase transformation.

УДК 621.314

ІНСТРУМЕНТАЛЬНА ДОСТОВІРНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЮ

О.І. Щепотьєв, кандидат технічних наук

А.В. Жильцов, доктор технічних наук

В.В. Васюк, аспірант*

Розглянуто питання інструментальної достовірності результатів допускового контролю. Обґрунтовано вимоги до засобів вимірювання залежно від характеристик контролюваного параметра для досягнення необхідної величини достовірності.

Надійність, допусковий контроль, інструментальна достовірність, об'єкт контролю.

Достовірність результатів контролю – це показник ступеня об'єктивного відображення результатами контролю дійсного технічного стану

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

© О.І. Щепотьєв, А.В. Жильцов, В.В. Васюк, 2013

5. Елистратов В.В. Аккумуляирование солнечной энергии / В.В. Елистратов // Нетрадиционная энергетика и технология: материалы междунар. конф. – Ч. 1. – Владивосток: ДВО РАН, 1975. – С. 32.

6. Матвеев В.М. Приближенный расчет теплопередачи в аккумуляторах тепла солнечных энергоустановок / В.М. Матвеев // Гелиотехника. – 1971. – №5. – С. 43–45.

7. Шишкин Н.Д. Тепловые аккумуляторы с фазовым переходом / Н.Д. Шишкин, Ю.В. Цымбалюк. – Ростов на Дону: Просвещение, 2005. – 120 с.

Разработана методика расчета теплового солевого аккумулятора с фазовым переходом аккумулирующего материала. Проведен расчет аккумулятора теплоты для обогрева строительных помещений. Определены размеры аккумулятора и массу аккумулирующего материала для суточного теплопотребления. Рассчитаны тепловые потери в окружающую среду и временные промежутки для «зарядки» и «разрядки» теплового аккумулятора.

Тепловой солевой аккумулятор, аккумулирующий материал, тепловые потери, фазовый переход.

The method of calculation of the thermal battery with electrolyte phase transition of accumulating material is developed. The calculation of heat battery for heating of building space is made. Size accumulator battery and weight accumulating material for daily heat consumption are found. Heat loss to the environment and time period to "charge" and "discharge" of thermal battery are calculated.

Heat salt battery, accumulating material, heat loss, phase transformation.

УДК 621.314

ІНСТРУМЕНТАЛЬНА ДОСТОВІРНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЮ

О.І. Щепотьєв, кандидат технічних наук

А.В. Жильцов, доктор технічних наук

В.В. Васюк, аспірант*

Розглянуто питання інструментальної достовірності результатів допускового контролю. Обґрунтовано вимоги до засобів вимірювання залежно від характеристик контролюваного параметра для досягнення необхідної величини достовірності.

Надійність, допусковий контроль, інструментальна достовірність, об'єкт контролю.

Достовірність результатів контролю – це показник ступеня об'єктивного відображення результатами контролю дійсного технічного стану

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

© О.І. Щепотьєв, А.В. Жильцов, В.В. Васюк, 2013

об'єкта контролю. Вона може бути подана у вигляді двох складових частин – методичної достовірності та інструментальної достовірності.

Методична достовірність [1] – складова достовірності контролю, яка визначається сукупністю параметрів, які контролюються, методикою контролю та прийнятими в ній критеріями оцінки технічного стану об'єкта.

Інструментальна достовірність – складова достовірності результатів контролю, яка визначається ймовірнісними властивостями ознак об'єкта, видом алгоритму обробки ознак, точнісними характеристиками засобів вимірювання тощо.

Один із найважливіших видів контролю є допускний контроль, який встановлює співвідношення між значеннями параметра, що контролюється, та встановленими певним чином границями (допусками) на його відхилення.

Оскільки вимірювальним пристроям властиві похибки, результати вимірювань потребують кількісних оцінок, що відображають ступінь довіри до отриманих результатів.

При допусковому контролі «придатним» визначається об'єкт з параметрами, результати вимірювань яких знаходяться в межах заданих допусків, та «непридатним» – з параметрами, результати вимірювання яких знаходяться не в межах.

Межі – це встановлені досвідом або розрахунком границі для значень параметрів об'єкта, при яких він здатний виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники протягом необхідного часу при визначених умовах. Величина експлуатаційних меж встановлюється інструкцією з експлуатації чи іншими відповідними документами для тих параметрів об'єкта, які контролюються в умовах експлуатації.

Мета досліджень – розробка методики оцінки інструментальної достовірності результатів допускового контролю технічних об'єктів.

Матеріали та методика досліджень. Модель процесу [3] здійснення допускового контролю показана на рис. 1. При цьому допускається повна безвідмовність засобів контролю, а можливі результати контролю обумовлені лише їх точнісними характеристиками і фактичним станом об'єкта контролю.

Позначення:

A – випадок, який полягає у тому, що значення параметра, який контролюється, знаходиться в межах поля допусків (об'єкт контролю «придатний»);

$\bar{A}$ – випадок, який полягає у тому, що значення параметра, який контролюється, не знаходиться в межах поля допусків (об'єкт контролю «непридатний»);

У результаті здійснення контролю отримаємо або результат, який визначає об'єкт контролю придатним (результат контролю знаходиться в межах встановлених допусків) – випадок B , або результат, який визначає об'єкт контролю непридатним (результат контролю знаходиться за межами

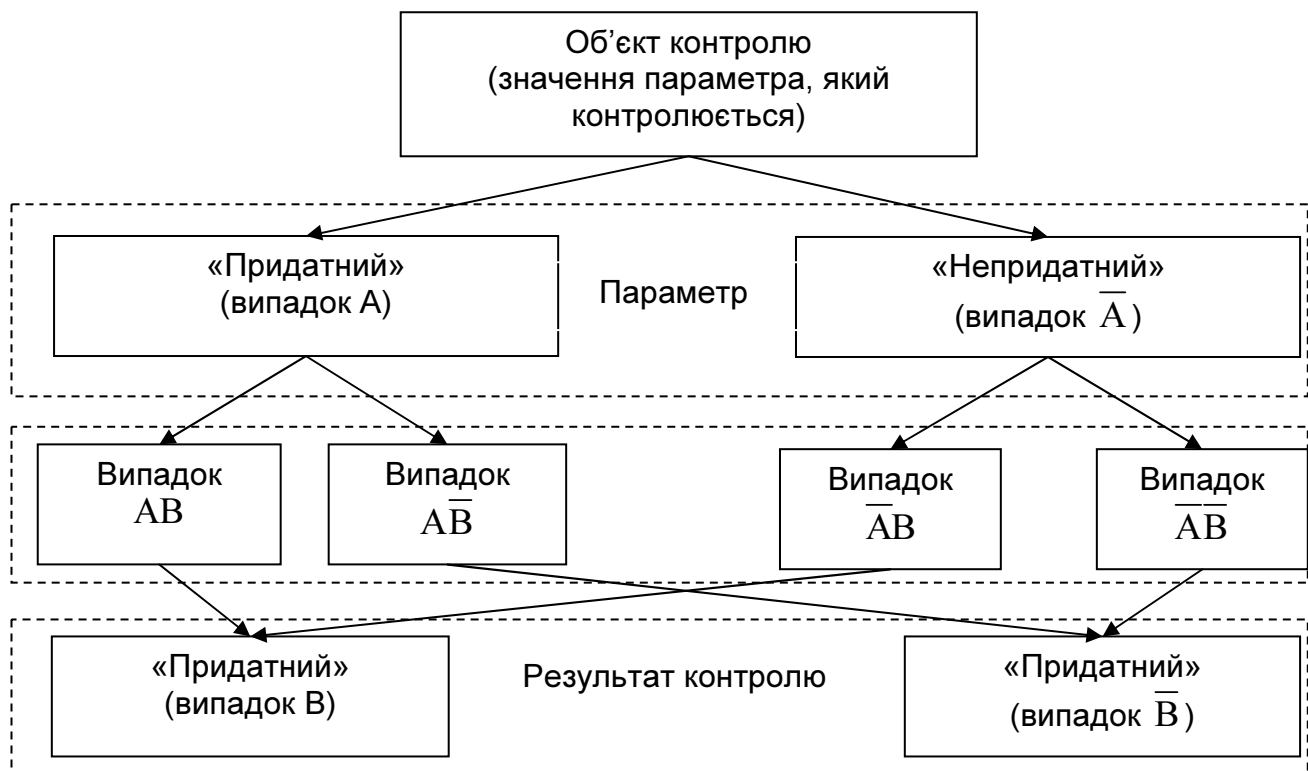


Рис.1. Модель процесу здійснення допускового контролю

встановлених допусків) – випадок $\bar{B}$. У силу властивих вимірювальним пристроям помилок вимірювання отримані результати не можуть розглядатися як абсолютні.

З наведеної моделі процесу здійснення контролю видно, що поява випадку $\bar{B}$ можливо разом або з випадком A , або разом з випадком $\bar{A}$. Тому згідно з математичною логікою можна записати:

$$B = AB + \bar{A}B.$$

Аналогічно випадок $\bar{B}$ можна записати так:

$$\bar{B} = A\bar{B} + \bar{A}\bar{B},$$

де AB – складний випадок, який полягає у тому, що дійсне значення параметра, який контролюється, і результат контролю знаходиться в межах поля допуску;

$\bar{A}B$ – складний випадок, який полягає у тому, що дійсне значення параметра, який контролюється, і результат контролю знаходиться не в межах поля допуску;

$A\bar{B}$ – складний випадок, який полягає у тому, що дійсне значення параметра, який контролюється, знаходиться не в межах поля допуску і результат контролю знаходиться в межах поля допуску;

$\bar{A}\bar{B}$ – складний випадок, який полягає у тому, що дійсне значення параметра, який контролюється, знаходиться в межах поля допуску і результат контролю знаходиться не в межах поля допуску.

Випадки $AB, \overline{A}\overline{B}, \overline{A}B, A\overline{B}$ складають повний склад подій, тому:

$$P(AB)+P(\overline{A}\overline{B})+P(\overline{A}B)+P(A\overline{B})=1.$$

Стан об'єкта контролю перед контролем є невизначеним [2] (невідоме фактичне значення параметрів, які контролюються, та їх положення відносно поля допущень). Задача контролю і полягає у рішенні цієї невизначеності. Тому, перш за все цікавить ймовірність відповідності стану об'єкта контролю і цю степінь відповідності найповніше виражають умовні апостеріорні ймовірності $P(A/B)$ та $P(\overline{A}/\overline{B})$, які відповідно є числовою мірою достовірності результатів щодо рішень «придатний» та «непридатний».

Результати досліджень. Таким чином, під інструментальною достовірністю результатів контролю щодо рішення «придатний» необхідно розуміти умовну ймовірність знаходження значень параметра, який контролюється, в межах поля допуску за умову, що отримано результат контролю «придатний» – $P(A/B)$.

Позначимо:

d_{π} – інструментальна достовірність результатів контролю щодо рішення «придатний»;

d_{π} – інструментальна достовірність результатів контролю щодо рішення «непридатний».

Відповідно до теореми гіпотез Байеса ймовірності $P(A/B)$ та $P(\overline{A}/\overline{B})$ визначаємо з таких співвідношень:

$$d_{\pi}=P(A/B)=\frac{P(AB)}{P(B)};$$

$$d_{\pi}=P(\overline{A}/\overline{B})=\frac{P(\overline{A}\overline{B})}{P(\overline{B})}.$$

Позначимо:

$f(x)$ – диференціальний закон розподілу значень контрольованого параметра;

$f(y)$ – диференціальний закон розподілу похибок засобів контролю;

a, b – межі поля допуску.

Якщо позначити через x – значення параметра, який контролюється, через y – похибку засобів контролю, то результат вимірювань z є випадковою величиною, яка дорівнює сумі випадкових величин X та Y .

Ймовірність отримання результату контролю в полі допуску визначається з виразу:

$$P(B)=\int_a^b f(z)dz.$$

Ймовірність отримання результату контролю за межами поля допуску визначається з виразу:

$$P(\overline{B}) = \int_{-\infty}^a f(z) dz + \int_b^{\infty} f(z) dz.$$

Умови того, що значення параметра, який контролюється, і результат контролю знаходяться в полі допуску (випадок AB), визначаються нерівностями:

$$\begin{cases} a \leq x \leq b \\ a \leq x+y \leq b \end{cases} \text{ або } \begin{cases} a \leq x \leq b \\ a-x \leq y \leq b-x \end{cases}.$$

Тому, ймовірність $P(AB)$ може бути визначена в загальному випадку так:

$$P(AB) = \int_a^b f(x) \left[\int_{a-x}^{b-x} f(y) dy \right] dx.$$

Умови того, що значення контрольованого параметра, і результат контролю знаходяться за межами поля допуску (випадок $\overline{AB}$), визначаються нерівностями:

$$\begin{cases} -\infty \leq x \leq a \\ b \leq x \leq \infty \\ -\infty \leq x+y \leq a \\ b \leq x+y \leq \infty \end{cases} \text{ або } \begin{cases} -\infty \leq x \leq a \\ b \leq x \leq \infty \\ -\infty \leq y \leq a-x \\ b-x \leq y \leq \infty \end{cases}.$$

Тому, ймовірність $P(\overline{AB})$ може бути в загальному випадку визначена так:

$$P(\overline{AB}) = \int_{-\infty}^a f(x) \left[\int_{-\infty}^{a-x} f(y) dy + \int_{b-x}^{\infty} f(y) dy \right] dx + \int_b^{\infty} f(x) \left[\int_{-\infty}^{a-x} f(y) dy + \int_{b-x}^{\infty} f(y) dy \right] dx.$$

Звідси, в загальному випадку вираз для достовірності результатів контролю щодо рішень «придатний» і «непридатний» можуть бути записані:

$$d_{\Pi} = \frac{p(AB)}{P(B)} = \frac{\int_a^b f(x) \left[\int_{a-x}^{b-x} f(y) dy \right] dx}{\int_a^b f(z) dz}; \quad (1)$$

$$d_{\Pi} = \frac{p(\overline{AB})}{P(B)} = \frac{\int_{-\infty}^a f(x) \left[\int_{-\infty}^{a-x} f(y) dy + \int_{b-x}^{\infty} f(y) dy \right] dx + \int_b^{\infty} f(x) \left[\int_{-\infty}^{a-x} f(y) dy + \int_{b-x}^{\infty} f(y) dy \right] dx}{\int_{-\infty}^a f(z) dz + \int_b^{\infty} f(z) dz}. \quad (2)$$

На рисунках 2 та 3 наведено залежності інструментальної достовірності щодо рішення «придатний» – d_{Π} та рішення «непридатний» – d_{Π} від відношення середньоквадратичних відхилень засобів контролю σ_{Π} та контролюваного параметра σ_{Π} , які побудовані на основі формул (1) та (2).

При збільшенні $\frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_{\Pi}}$ величина інструментальної достовірності контролю зменшується. При збільшенні величини поля допусків параметра, який контролюється, інструментальна достовірність результатів контролю щодо рішення «придатний» – збільшується, а рішення «непридатний» – зменшується.

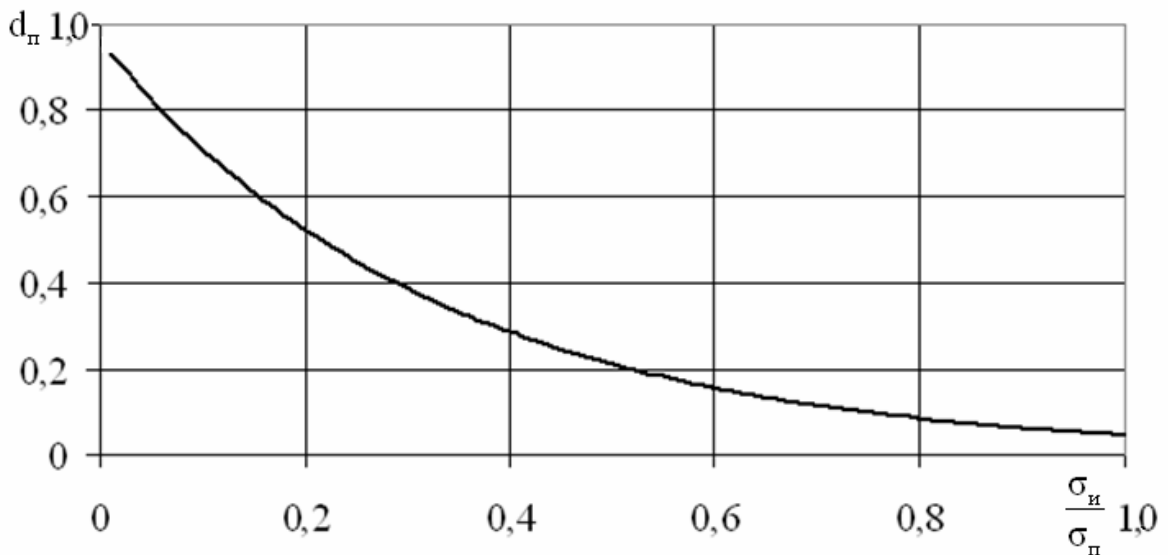


Рис.2. Залежність інструментальної достовірності щодо рішення «придатний»

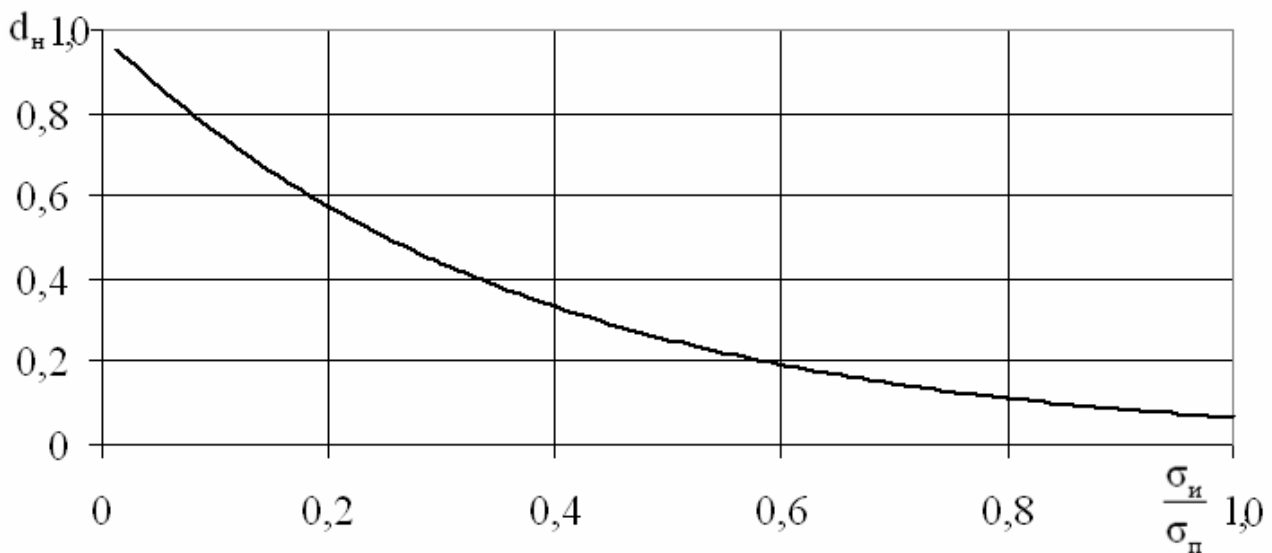


Рис.3. Залежність інструментальної достовірності щодо рішення «непридатний»

Висновки

Для оцінки якості допускового контролю повинні використовуватись апріорні (для оцінки характеристик систем контролю) чи апостеріорні (для оцінки якості контролю об'єкта, стан якого невідомий) характеристики достовірності контролю.

Список літератури

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов / Е.С. Вентцель. – [6-е изд. стер.] – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.
2. Мушик Э. Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер. – М.: Мир, 1990. – 206 с.
3. Щепотьев А.И. Инструментальная достоверность результатов контроля и её зависимость от характеристик контролируемых параметров и средств контроля / А.И. Щепотьев, А.Ю. Смаковенко // Средства индикации и управления систем автоматизированного контроля авиационной техники: Сб. – М., 1972. – №6. – С. 19–21.

Рассмотрен вопрос инструментальной достоверности результатов допускового контроля. Обоснованы требования к средствам измерения в зависимости от характеристик контролируемого параметра для достижения необходимой величины достоверности.

Надежность, допусковой контроль, инструментальная достоверности, объект контроля.

The question of the reliability of the results of the instrumental limit test. Justified demands to the measurement depending on the characteristics of the controlled parameter to achieve the required amount of confidence.

Reliability, tolerance control, instrument reliability, the object of control.

**КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ В MatLab ЕЛЕКТРОПРИВОДА
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ СЕРІЇ Lenze 530 З ВІД'ЄМНИМ
ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ЗА НАПРУГОЮ ЯКОРЯ**

***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 модель електропривода постійного струму з тиристорним регулятором напруги Lenze 534 з від'ємним зворотним зв'язком за напругою якоря та результати досліджень електромеханічних характеристик.

Перехідний процес, напівпровідниковий перетворювач напруги, зворотний зв'язок, П-регулятор, електромеханічна характеристика, модель.

Автори публікують серію статей, в яких дано рекомендації з отримання інформації про роботу в перехідних режимах регульованого електропривода на базі сучасних напівпровідникових перетворювачів напруги, зокрема привода постійного струму серії Lenze 530. Дослідження приводних характеристик рекомендується проводити на базі комп'ютерної моделі в системі MatLab. Регулятори напруги серії Lenze 530 можуть працювати з від'ємним зворотним зв'язком або за швидкістю, або напругою якоря (IR- компенсація) [3]. У роботі [2] наведена модель електропривода з тиристорним регулятором напруги Lenze 534 і від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю та результати досліджень роботи електропривода. Ця робота присвячена моделюванню електропривода з регулятором Lenze 534 і від'ємним зворотним зв'язком за напругою якоря.

Мета досліджень – отримання достовірних характеристик електропривода постійного струму з напівпровідниковим перетворювачем напруги серії Lenze 530 у 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 з використанням комп'ютерної моделі в системі MatLab.

Результати досліджень. Двоконтурна система "тиристорний перетворювач напруги – двигун" з від'ємними зворотними зв'язками за струмом і напругою якоря наведена на рис. 1. Введенням у систему електропривода зворотного зв'язку за струмом досягається обмеження струму і моменту, а за напругою якоря – автоматичну стабілізацію швидкості.

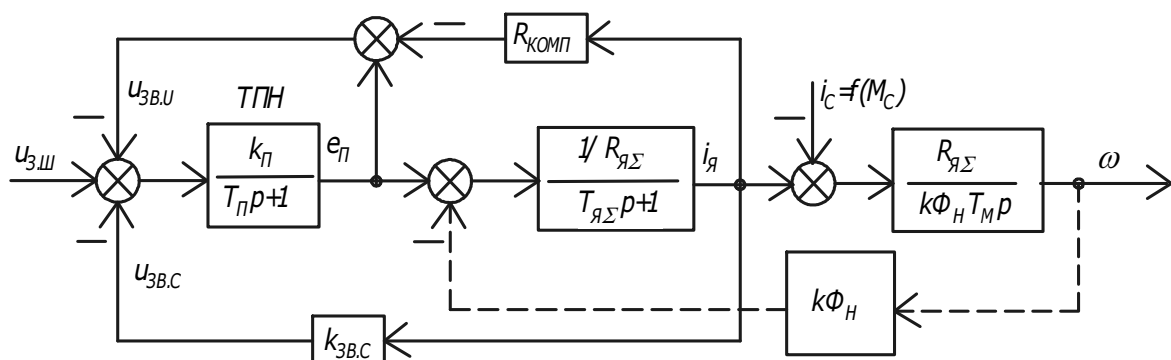


Рис. 1. Двоконтурна структурна схема електропривода в системі ТПН-Д з від'ємними зворотними зв'язками за струмом і напругою якоря:

$u_{з.ш}$ – задаючий сигнал швидкості; $u_{зв.у}$ – сигнал зворотного зв'язку за напругою якоря; $u_{зв.с}$ – сигнал зворотного зв'язку за струмом; $R_{комп}$ – компенсаційний опір; $R_{я\sigma}$ – сумарний опір якорного кола; ТПН – тиристорний перетворювач напруги; k_{π} – коефіцієнт підсилення ТПН; $k\Phi_H$ – номінальний магнітний потік двигуна; $k_{зв.с}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом; T_{π} , $T_{я\sigma}$ – електромагнітні сталі часу ТПН та якорного кола; T_M – електромеханічна стала часу; e_{π} – ЕРС тиристорного перетворювача напруги; $i_{я}$, i_c – миттєві значення струму якорного кола та струму, пропорційного моменту статичного опору робочої машини; p – оператор Лапласа

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом $k_{зв.с}$ можна визначити за максимальною напругою завдання швидкості $U_{з.ш.макс}$ і максимальним (пусковим) струмом двигуна:

$$k_{зв.с} = \frac{U_{з.ш.макс}}{\lambda_I I_H}, \quad (1)$$

де λ_I – допустима кратність пускового струму; I_H – номінальний струм електродвигуна.

Стабілізація ЕРС ТПН здійснюється шляхом подачі узгодженого від'ємного сигналу зворотного зв'язку $u_{зв.у} = e_{\pi} - i_{я}R_{комп}$ на вхід задаючого сигналу швидкості. Змінюючи величину $R_{комп}$, змінюють величину коефіцієнта зворотного зв'язку. При збільшенні навантаження напруга на затискачах двигуна знижується за рахунок втрат в якорному колі. При цьому збільшуються втрати напруги на опорі $R_{комп}$, сигнал з якого віднімається від e_{π} та узгоджено подається на вхід $u_{з.ш}$. Напруга на виході ТРН автоматично збільшується.

Згідно зі структурною схемою електропривода (див. рис. 1) можна записати таку систему рівнянь електромеханічної характеристики:

$$\begin{cases} k_{\pi}[u_{з.ш} - (e_{\pi} - i_{я}R_{комп}) - k_{зв.с}i_{я}] = (T_{\pi}p + 1)e_{\pi}; \\ e_{\pi} - k\Phi_H\omega = R_{я}(T_{я\sigma}p + 1)i_{я}. \end{cases} \quad (2)$$

Після перетворень рівнянь (2) одержимо вирази динамічних електромеханічної і механічної характеристик електропривода:

$$\omega = \frac{k_{\pi}u_{з.ш}}{k\Phi_H[(T_{\pi}p+1)+k_{\pi}]} - \frac{R_{я}[(T_{\pi}p+1)+k_{\pi}](T_{я\sigma}p+1)+k_{\pi}k_{зв.с}-k_{\pi}R_{комп}}{k\Phi_H[(T_{\pi}p+1)+k_{\pi}]} i_{я}; \quad (3)$$

$$\omega = \frac{k_{\pi} u_{\Sigma \Sigma}}{k_{\Phi_H} [(T_{\pi} p + 1) + k_{\pi}]} - \frac{R_{\Sigma} [(T_{\pi} p + 1) + k_{\pi}] (T_{\Sigma} p + 1) + k_{\pi} k_{\Sigma \Sigma} - k_{\pi} R_{\text{КОМП}}}{(k_{\Phi_H})^2 [(T_{\pi} p + 1) + k_{\pi}]} m. \quad (4)$$

При $p=0$ рівняння (3) і (4) являють собою рівняння статичних електромеханічної і механічної характеристик:

$$\omega = \frac{k_{\pi} u_{\Sigma \Sigma}}{k_{\Phi_H} (k_{\pi} + 1)} - \frac{R_{\Sigma} + k_{\pi} k_{\Sigma \Sigma} - k_{\pi} R_{\text{КОМП}}}{k_{\Phi_H} (k_{\pi} + 1)} i_{\Sigma}, \quad (5)$$

$$\omega = \frac{k_{\pi} u_{\Sigma \Sigma}}{k_{\Phi_H} (k_{\pi} + 1)} - \frac{R_{\Sigma} + k_{\pi} k_{\Sigma \Sigma} - k_{\pi} R_{\text{КОМП}}}{(k_{\Phi_H})^2 (k_{\pi} + 1)} m. \quad (6)$$

Жорсткість механічних характеристик у цій замкненій системі залежить від величини зворотних зв'язків, отже від коефіцієнтів $k_{\Sigma \Sigma}$ і $R_{\text{КОМП}}$. Так, при $R_{\Sigma} = k_{\pi} k_{\Sigma \Sigma} - k_{\pi} R_{\text{КОМП}}$ характеристика має нескінченно велику жорсткість $\beta = \infty$, а при $R_{\Sigma} < k_{\pi} k_{\Sigma \Sigma} - k_{\pi} R_{\text{КОМП}}$ – додатну жорсткість $\beta > 0$.

У MatLab була створена модель електропривода, який складається з ТПН Lenze 534 і двигуна постійного струму незалежного збудження МИ32 314-02, з від'ємними зворотними зв'язками за струмом і напругою якоря (рис 2). Технічні характеристики вказаного двигуна наведено в [2].

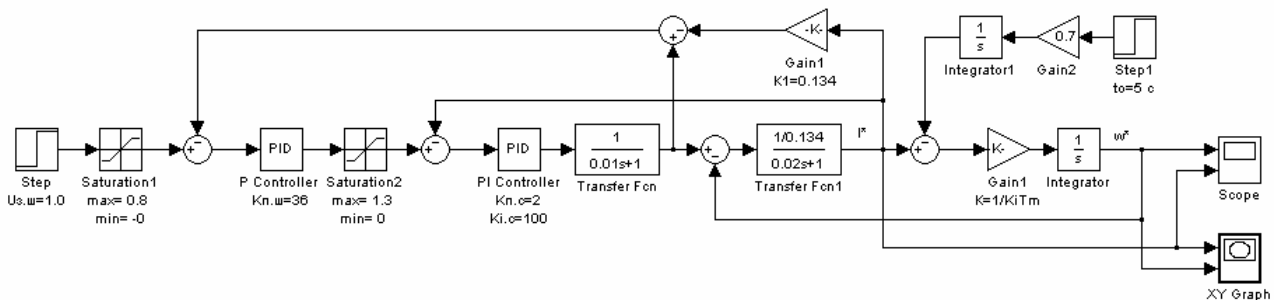


Рис. 2. Комп'ютерна модель електропривода постійного струму з від'ємним зворотним зв'язком за струмом та напругою якоря

Вхідні параметри моделі задаються у відносних одиницях. Для перекладення 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 Fcn моделює ланку якоря двигуна з $T_{\Sigma} = 0,02$ с та коефіцієнт підсилення $1/R_{\Sigma}^*$, а блок Transfer Fcn1 – ланку тиристорного перетворювача напруги з $T_{\pi} = 0,01$ с. Блоки Integrator і підсилювач Gain з коефіцієнтом підсилення $K = 1/k_I T_M$ реалізують рівняння руху електропривода. Струм навантаження формується блоками Step1, Gain2 з коефіцієнтом підсилення $K_2 = 0,7$ та Integrator1 як інтеграл від постійного сигналу.

Для досягнення високої точності регулювання швидкості виникла необхідність одночасного регулювання струму (моменту). При цьому використана системи підпорядкованого керування з певними стандартними настройками.

Основою першого контуру є ПІ-регулятор і ланки ТПН та якоря двигуна, які охоплені від'ємним зворотним зв'язком за струмом якоря. Зазви-

чай регулятор струму налаштовують на технічний оптимум. При цьому згідно з теорією автоматичного керування [1, 4] необхідно, щоб передаточна функція регулятора мала вигляд:

$$W_{P.C}(p) = \frac{T_{\Sigma}p+1}{T_{\Pi}p}. \quad (7)$$

Згідно з (7) коефіцієнти підсилення регулятора струму мають значення:

- коефіцієнт інтегрального підсилення

$$k_{I.C} = 1/T_{\Pi} = 1/0,01 = 100;$$

- коефіцієнт пропорційного підсилення

$$k_{P.C} = T_{\Sigma}/T_{\Pi} = 0,02/0,01 = 2.$$

Другий контур з від'ємним зворотним зв'язком за напругою якоря налаштований також на технічний оптимум і має пропорційний П-регулятор. Коефіцієнти визначено за передаточною функцією регулятора швидкості [1, 4]:

$$W_{P.ш.}(p) = \frac{T_M}{2T_{\Pi}}. \quad (8)$$

Згідно з (8) коефіцієнт підсилення регулятора швидкості:

$$k_{P.ш.} = 0,72/(2 \cdot 0,01) = 36.$$

Керування моделлю здійснює блок Step, який задає напругу на виході TRN. 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 на осцилографі Scope можна спостерігати за зміною швидкості та струму якоря в часі.

Результати моделювання роботи електропривода наведено на рис. 3 та 4.

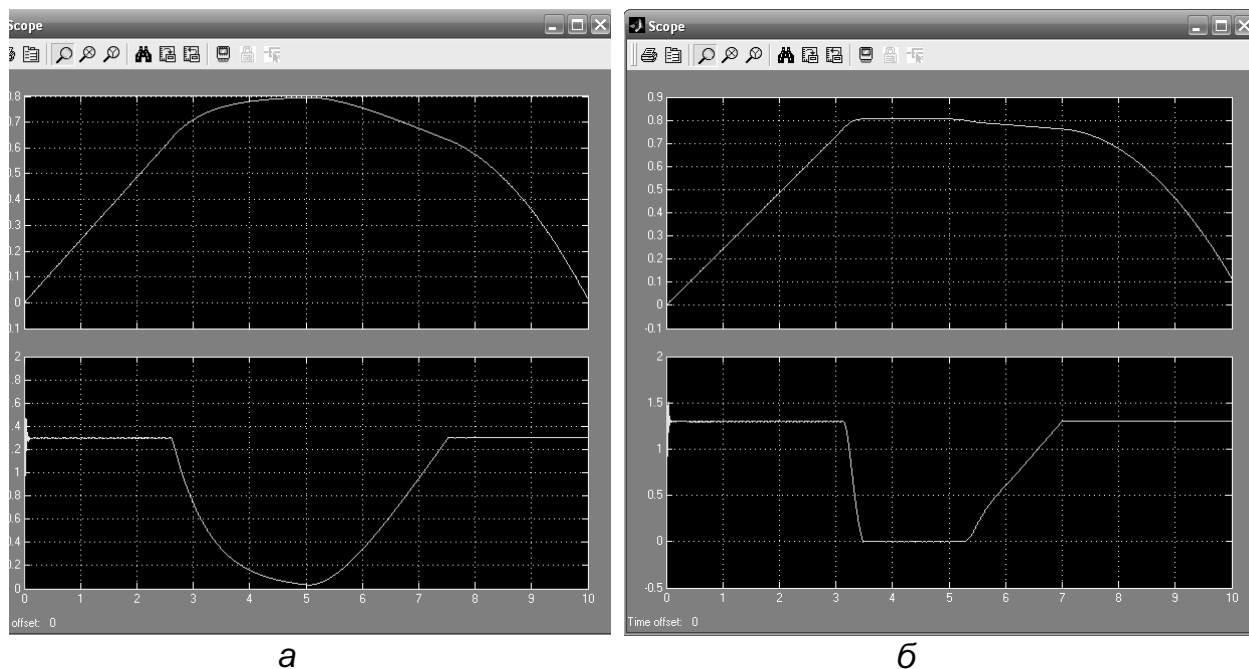


Рис. 3. Графіки миттєвих значень швидкості (верхній) та струму (нижній):

a – $R_{комп} = 0,034$ в.о.; *б* – $R_{комп} = 0,134$ в.о.

Процес роботи двигуна змодельований так. Запуск відбувається без навантаження (див. рис 3), а через 5 с починає плавно зростати навантаження. Згідно з завданням встановлено обмеження: швидкості до $0,8\omega_0$, а максимального струму – $1,3I_H$. Встановлені граничні значення модель точно відслідковує, що видно з рис. 4. На початку пуску, коли різниця між заданим та дійсним значеннями швидкості є досить великою, регулятор швидкості переходить у режим "насичення". При цьому сигнал завдання за струмом є сталим і в системі працює тільки контур регулювання струму якоря. Завдяки ПІ-регулятору значення струму залишається незмінним, а швидкість лінійно зростає (див. рис.3). Коли П-регулятор швидкості (напруги) виходить з "насичення", система керування фактично стає двоконтурною: із внутрішнім контуром регулювання струму та зовнішнім контуром регулювання напруги. При цьому жорсткість характеристик підвищується, але вони не стають абсолютно жорсткими через наявність П-регулятора швидкості. Пусковий струм розпочинає спадати, а система стабілізувати швидкість на заданому рівні. Коли навантаження на двигун стає більшим його максимального моменту, двигун починає зупинятися та знову переходить у режим стабілізації струму.

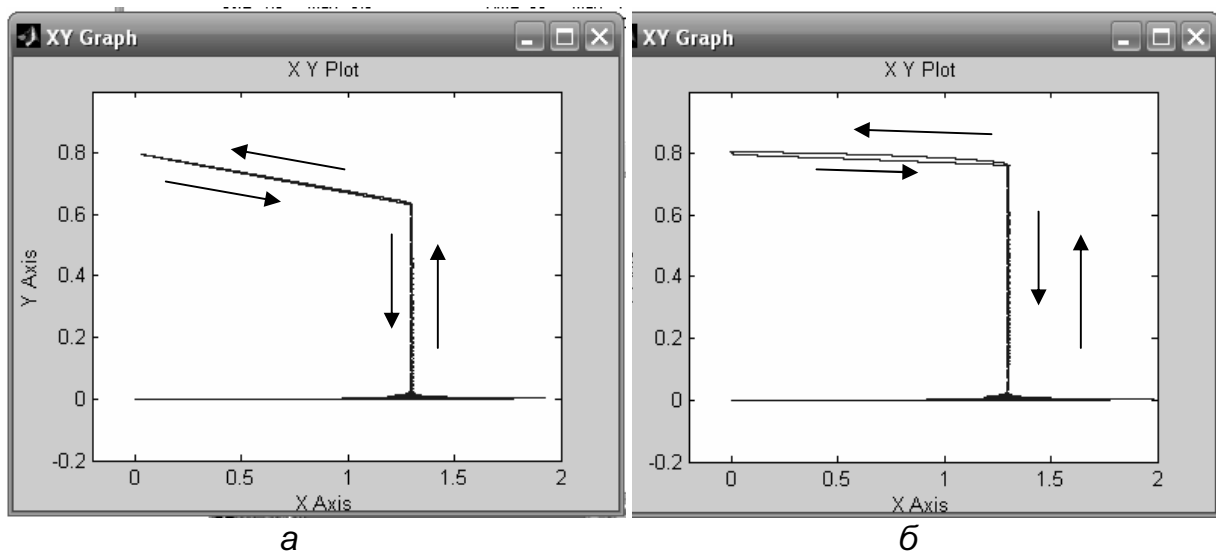


Рис. 4. Електромеханічні характеристики електропривода:

а – $R_{КОМП} = 0,034$ в.о.; *б* – $R_{КОМП} = 0,134$ в.о.

Пояснити отримані електромеханічні характеристики (див. рис. 4) можна так. При пуску двигуна відбувається незначне коливання пускового струму, потім він утримується на максимально допустимому рівні, а швидкість двигуна збільшується. Коли струм стає меншим максимального, швидкість лінійно збільшується до максимально допустимої $0,8\omega_0$. При збільшенні навантаження відбувається зворотний процес. На рис. 4, б добре видно вплив динамічного моменту при розгоні двигуна (верхня крива електромеханічної характеристики).

Моделювання проведено при двох значеннях коефіцієнтів зворотного зв'язку за напругою якоря, який визначається опором $R_{КОМП}$ (коефіцієнт компенсації). Як видно з рис. 4 жорсткість електромеханічної характе-

ристики збільшується при збільшенні коефіцієнтів зворотного зв'язку, що підтверджує раніше наведені теоретичні викладки. Коефіцієнт компенсації в електроприводі серії Lenze 530 установлюється регулятором "I×R" на лицевій панелі пристрою.

На рис. 5 наведено електромеханічну характеристику, яка знята на лабораторній установці. Аналіз графіків підтверджує адекватність результатів, отриманих на моделі і реальній установці.

Висновки

Створена в MatLab комп'ютерна модель електропривода, що складається з ТПН серії Lenze

530 і двигуна постійного струму незалежного збудження, в якій передбачено обмеження максимальної і мінімальної швидкостей та максимального струму, стабілізацію заданої швидкості за рахунок від'ємного зворотного зв'язку за напругою якоря. Аналіз результатів досліджень підтвердив адекватність моделі реальним характеристикам електропривода.

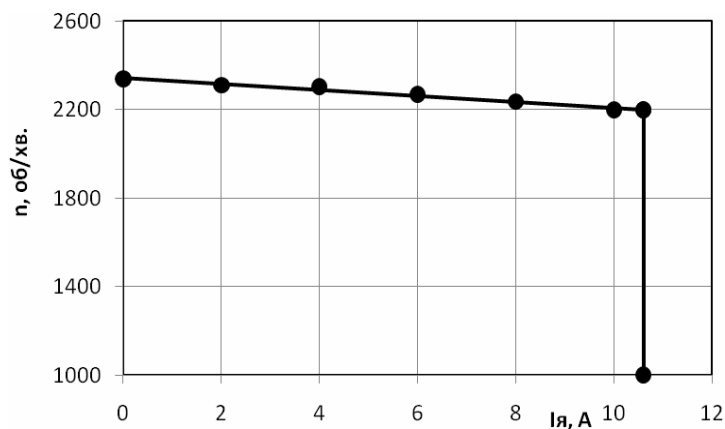


Рис. 5. Електромеханічна характеристика, знята на лабораторній установці ($R_{\text{комп}}=0,134 \text{ в.о.}$)

Список літератури

1. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: учеб. пособие / С.Г. Герман-Галкин. – СПб: КОРОНА принт, 2002. – 304 с.
2. Голодний І.М. Дослідження на моделі в MatLab характеристик електропривода постійного струму серії Lenze 530 / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, А.В. Торопов // Науковий вісник НУБіП України. Серія "Техніка та енергетика АПК". – 2013. – Вип. 184, ч. 1. – С. 120-125.
3. 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.
4. 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.

Приведена модель електропривода постійного тока с тиристорным регулятором напряжения Lenze 534 с отрицательной обратной связью по напряжению якоря и результаты исследований электромеханических характеристик.

Переходной процесс, тиристорный преобразователь напряжения, обратная связь, П-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, P-controls, electromechanical characteristics, model.

УДК 621.384.3

РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ДЕФЕКТНИХ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ З УРАХУВАННЯМ ВЕЛИЧИН ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ

***М.Т. Лут, А.В. Міщенко, кандидати технічних наук
Ю.В. Смаглюк, інженер***

Проведено дослідження впливу теплових потоків у зоні дефектного контактного з'єднання на температуру його поверхні. Встановлено залежність поверхневої температури дефектного лінійного контактного з'єднання від питомого опору провідника та умов теплообміну з навколишнім середовищем.

Електричний струм, електричний опір, температура, тепловий потік, теплопровідність, тепловіддача.

Тепловізори та пірометри дають нові можливості дистанційного контролю технічного стану силового електрообладнання, зокрема виявлення дефектів струмопровідних елементів електричних апаратів. Тепловізійне обстеження контактних з'єднань має дві суттєві переваги перед іншими способами діагностування:

- проводиться на працюючому обладнанні без зняття напруги;
- дозволяє виявляти дефекти на ранній стадії їх розвитку.

Сучасна тепловізійна техніка здатна реєструвати перегрівання обстежуваного об'єкта від 0,1 °С, що дозволяє виявити дефекти контактних з'єднань електрообладнання при струмах 2–5 % від номінального. Експертами рекомендується виконувати перерахунок отриманого при обстеженні значення перевищення температури над нормованим [5].

Мета досліджень – встановлення взаємозв'язку температури поверхні дефектного контактного з'єднання з його електрофізичними характеристиками та умовами теплообміну з навколишнім середовищем.

Матеріали і методика досліджень. Оцінка теплового стану дефектних контактних з'єднань при різних струмах навантаження проводилась з використанням положень чинних нормативних документів у галузі випробування електрообладнання.

Використовуючи положення теорії теплообміну в твердих тілах і газах, визначали залежність температури поверхні дефектного контактного

DC drive model with thyristor voltage regulator Lenze 534 and results of investigations of electromechanical properties are presented.

Transition process, semiconductor voltage converters, feedback, P-controls, electromechanical characteristics, model.

УДК 621.384.3

РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ДЕФЕКТНИХ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ З УРАХУВАННЯМ ВЕЛИЧИНИ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ

***М.Т. Лут, А.В. Міщенко, кандидати технічних наук
Ю.В. Смаглюк, інженер***

Проведено дослідження впливу теплових потоків у зоні дефектного контактного з'єднання на температуру його поверхні. Встановлено залежність поверхневої температури дефектного лінійного контактного з'єднання від питомого опору провідника та умов теплообміну з навколишнім середовищем.

Електричний струм, електричний опір, температура, тепловий потік, теплопровідність, тепловіддача.

Тепловізори та пірометри дають нові можливості дистанційного контролю технічного стану силового електрообладнання, зокрема виявлення дефектів струмопровідних елементів електричних апаратів. Тепловізійне обстеження контактних з'єднань має дві суттєві переваги перед іншими способами діагностування:

- проводиться на працюючому обладнанні без зняття напруги;
- дозволяє виявляти дефекти на ранній стадії їх розвитку.

Сучасна тепловізійна техніка здатна реєструвати перегрівання обстежуваного об'єкта від 0,1 °С, що дозволяє виявити дефекти контактних з'єднань електрообладнання при струмах 2–5 % від номінального. Експертами рекомендується виконувати перерахунок отриманого при обстеженні значення перевищення температури над нормованим [5].

Мета досліджень – встановлення взаємозв'язку температури поверхні дефектного контактного з'єднання з його електрофізичними характеристиками та умовами теплообміну з навколишнім середовищем.

Матеріали і методика досліджень. Оцінка теплового стану дефектних контактних з'єднань при різних струмах навантаження проводилась з використанням положень чинних нормативних документів у галузі випробування електрообладнання.

Використовуючи положення теорії теплообміну в твердих тілах і газах, визначали залежність температури поверхні дефектного контактного

з'єднання від його електрофізичних характеристик та умов теплообміну з навколишнім середовищем.

Результати досліджень. Оцінку теплового стану болтових контактних з'єднань при струмах навантаження $0,6\text{--}1,0 I_{\text{НОМ}}$ рекомендується здійснювати за формулою:

$$\Delta\theta_{\text{НОМ}} / \theta_{\text{роб}} = (I_{\text{НОМ}} / I_{\text{РОО}})^2, \quad (1)$$

де $\Delta\theta_{\text{НОМ}}$, $\Delta\theta_{\text{роб}}$ – перевищення температури при номінальному $I_{\text{НОМ}}$ і робочому $I_{\text{РОО}}$ струмах навантаження контактного з'єднання.

Похибка оцінки температури контактних з'єднань при використанні формули (1) суттєво підвищується при проведенні випробувань при струмах менше $0,25\text{--}0,3 I_{\text{НОМ}}$ [4]. У випадках, коли навантаження знаходиться в межах $0,3\text{--}0,6 I_{\text{НОМ}}$ для розрахунку рекомендується співвідношення:

$$\Delta\theta_{0,5} / \Delta\theta_{\text{роб}} = (0,5 I_{\text{НОМ}} / I_{\text{РОО}})^2, \quad (2)$$

де $\Delta\theta_{0,5}$, $\Delta\theta_{\text{роб}}$ – перевищення температури при струмі $0,5 I_{\text{НОМ}}$ і робочому $I_{\text{РОО}}$ струмі навантаження контактного з'єднання (таблиця).

Класифікація дефектів болтових контактних з'єднань [5]

Ступінь несправності	$\Delta\theta_{0,5}$, °C, при $0,5 I_{\text{НОМ}}$	Коефіцієнт дефектності $K_{\text{деф}}$	Стадія розвитку дефекту	Рекомендації експлуатаційному персоналу
1	5...10	<1,2	Початкова	Контроль
2	10...30	1.2 – 1,5	Розвинутий дефект	Вжити заходи щодо усунення дефектів
3	>30	>1,5	Аварійний дефект	Негайне усунення дефектів

Оцінка теплового стану болтових контактних з'єднань проводиться з урахуванням коефіцієнта дефектності.

Досвід діагностування дефектних контактних з'єднань свідчить, що на основі цих рекомендацій отримують завищені значення перевищення температури, чим і обумовлено потребу врахування всіх складових процесу теплообміну з навколишнім середовищем.

Завищені дані прогнозованих температур призводять до некоректної оцінки, немотивованої зупинки обладнання. Статистичні відомості, що науково обґрунтовують експертну оцінку, в літературі відсутні.

Залишається відкритим питання про потік пошкоджень та ймовірність безвідмовної роботи контактних з'єднань на об'єктах. Існує низка проблемних питань, які вимагають вирішення: статистичний аналіз даних тепловізійного контролю; методологія ухвалення експертного рішення; терміни розвитку дефектів контактних з'єднань.

Аналіз літературних джерел показує, що в процесі використання тепловізійної техніки перелічені проблеми не розглядаються.

Розглянемо методику оцінки нагріву елементів обладнання (проводів або контактних з'єднань) під дією струму.

Величина перевищення температури $\Delta\Theta$ розраховується за формулою:

$$\Delta\Theta = (\Theta_n - \Theta_0) , \quad (3)$$

де Θ_n , Θ_0 – температура поверхні з'єднання і середовища при довільному струмі, °C.

Припустимо, що виміри проводяться при струмі I_1 , температурі навколишнього середовища Θ_0 . При цьому потужність розсіювання P_1 можна записати у вигляді формули:

$$P_1 = I_1^2 R_1 = I_1^2 \rho_1 F , \quad (4)$$

де $\rho_1 = \rho(\Theta_1)$ – питомий електричний опір матеріалу деталей з'єднання при температурі вимірювання, Ом·мм²/м; F – параметр, пов'язаний з формою об'єкта і незалежний від температури вимірювання, м/мм²; I_1 – виміряний струм, А.

В умовах теплової рівноваги потужність P_1 , що виділяється, відводиться від об'єкта у вигляді теплового потоку Q_1 , отже, з урахуванням (4) можна записати:

$$P_1 = I_1^2 R_1 = I_1^2 \rho_1 F = Q_1 = \alpha_1 S \Delta\Theta_1 = \alpha_1 S (\Theta_1 - \Theta_0) , \quad (5)$$

де α_1 – сумарний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°C): $\alpha_1 = \alpha_{1T} + \alpha_{1B} + \alpha_{1K}$; S – площа поверхні об'єкта, м²; Θ_1 – температура поверхні об'єкта при струмі I_1 , °C; Θ_0 – температура навколишнього середовища, °C; $\alpha_T, \alpha_B, \alpha_K$ – коефіцієнти теплообміну (теплопровідність, випромінювання, конвекція), Вт/(м²·°C).

Остаточню:

$$P_1 = \alpha_1 S (\Theta_1 - \Theta_0) = \alpha_1 S \Delta\Theta_1 . \quad (6)$$

Для номінального навантаження P_2 , наприклад 100 %, для приведеної температури Θ_{np} можна записати:

$$P_2 = \alpha_2 S (\Theta_2 - \Theta_{np}) = \alpha_2 S \Delta\Theta_2 , \quad (7)$$

де α_2 , – сумарний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°C):

$$\alpha_2 = \alpha_{2T} + \alpha_{2B} + \alpha_{2K} . \quad (8)$$

На підставі співвідношень (4) – (8) можна оцінити перевищення температури протяжного об'єкта (проводу) без урахування охолодження за рахунок теплопровідності вздовж металу:

$$\rho_1 I_1^2 / \rho_2 I_2^2 = \alpha_1 \Delta\Theta_1 / \alpha_2 \Delta\Theta_2 . \quad (9)$$

Вважаючи, що питомий опір металу в досліджуваній області і тепловіддача не залежать від температури, можна отримати рекомендований у нормативних документах [5] вираз:

$$I_1^2 / I_2^2 = \Delta\Theta_1 / \Delta\Theta_2 . \quad (10)$$

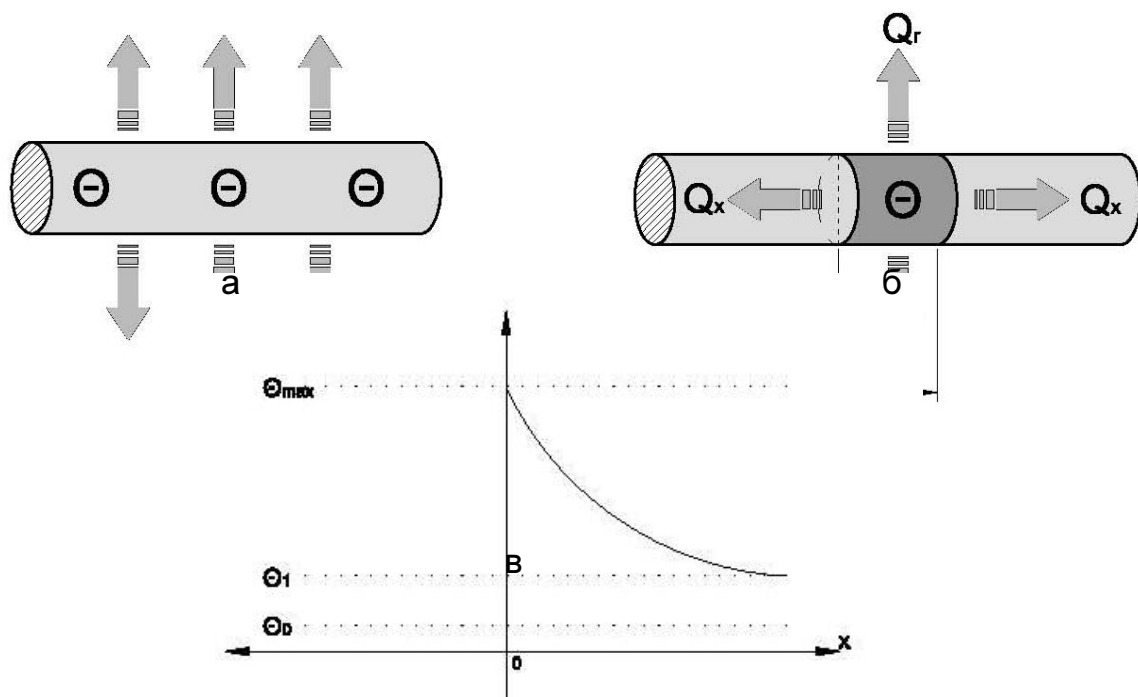
Нехтуючи зміною коефіцієнта тепловіддачі, але враховуючи залежність $\rho(\Theta)$ для дефектного контактного з'єднання, можна використати формулу:

$$\rho_1 I_1^2 / \rho_2 I_2^2 = \Delta\Theta_1 / \Delta\Theta_2 . \quad (11)$$

На відміну від спрощеного виразу (10), співвідношення (11) враховує зміну значення питомого електричного опору від температури, що призводить до збільшення розрахункового значення перевищення температури.

При розрахунках за співвідношенням (11), що враховує як радіальний тепловідвід від поверхні, так і зміну опору матеріалу проводу при зростанні температури, можна визначити значення перевищення температури.

Врахуємо додаткові фактори, що обумовлюють відвід теплоти від досліджуваного нагрітого об'єкта (проводу або контактного з'єднання). Як зазначалося вище співвідношення (9) та його спрощені варіанти (10) і (11) характерні для опису процесів, що проходять у протяжних об'єктах (наприклад, проводах), для яких характерний радіальний тепловідвід Q_r у повітря від ділянки, що нагрівається (рисунок а).



Теплові потоки в області локального дефекту провідника

Дефекти, наприклад надрізи провідників, можуть бути розглянуті у вигляді локального джерела тепла, потік якого поширюється не тільки радіально за рахунок тепловіддачі в середовище, але й уздовж проводу за рахунок теплопровідності металу (рисунок б). У цьому випадку температура Θ приймає максимальне значення Θ_{max} у місці дефекту і знижується в міру віддалення від нього (рисунок "в") до температури непорушеної ділянки проводу Θ_1 .

Температура дефектного місця може бути визначена на основі розрахунку теплопередачі в стержні при лінійному тепловому потоці.

Тепловий потік Q_x , що відводиться від площини перерізу стержня з координатою $X=0$ [1], може бути представлений у вигляді:

$$Q_x = (\Theta_{\max} - \Theta_0)(\alpha P \lambda S)^{1/2} = (\alpha P \lambda S)^{1/2} \Delta \Theta, \quad (12)$$

де P – периметр поперечного перерізу, м; S – площа поперечного перерізу, м².

Вважаючи, що тепловий потік обумовлений тепловідводом за рахунок теплопровідності металу в області дефекту, перевищення температури можна визначити із співвідношення, в якому враховується вплив температури на величини ρ , α , λ при струмах I_1 і I_2 :

$$\rho_1 I_1^2 / \rho_2 I_2^2 = (\lambda_1 \alpha_1)^{1/2} \Delta \Theta_1 / (\lambda_2 \alpha_2)^{1/2} \Delta \Theta_2. \quad (13)$$

Вирішення задачі про розподіл температури вздовж провідника, який має дефектну ділянку з температурою $\Theta_{\max}$, наведено в [2]: температура експоненціально спадає від максимального значення до рівноважного значення на відстані, що в 5–6 разів перевищує довжину дефекту.

Коефіцієнти електропровідності і теплопровідності металу зв'язані між собою відомим законом Відемана-Франца [2]. Тому, для співвідношення коефіцієнта теплопровідності та питомого електричного опору можемо записати:

$$\lambda \rho = 2(k/e)^2 \Theta, \quad (14)$$

де k – стала Больцмана; e – заряд електрона.

З урахуванням співвідношення (14) можна отримати:

$$\lambda_{1d} \rho_{1d} / \lambda_{2d} \rho_{2d} = \Theta_{1d} / \Theta_{2d}, \quad (15)$$

де λ_{1d} , λ_{2d} , ρ_{1d} , ρ_{2d} – параметри ділянок металу, розташованих поблизу дефекту при "усереднених" температурах Θ_{1d} і Θ_{2d} .

На основі співвідношень (13) і (15) можна отримати вираз:

$$\rho_1 I_1^2 / \rho_2 I_2^2 = (\rho_{2d} / \rho_{1d})^{1/2} (\alpha_1 / \alpha_2)^{1/2} (\Theta_{1d} / \Theta_{2d})^{1/2} (\Delta \Theta_1 / \Delta \Theta_2). \quad (16)$$

Вважаючи, що температура Θ , яку ми визначаємо, наближена до температури дефекту, тобто $\Theta_{1d} \approx \Theta_1$, $\Theta_{2d} \approx \Theta_2$, отримуємо при різних струмах:

$$\Delta \Theta_2 / \Delta \Theta_1 = (\rho_2 / \rho_1)^{3/2} (\alpha_1 \Theta_1 / \alpha_2 \Theta_2)^{1/2} (I_2 / I_1)^2. \quad (17)$$

Радіальний тепловідвід від нагрітої ділянки дефектної області за рахунок тепловіддачі в повітря і теплопередачі по довжині металевого провідника враховуються так:

$$I^2 R = Q_r + Q_x, \quad (18)$$

де R – опір металу безпосередньо в області дефекту, Ом.

З урахуванням формули (18) при фіксованому струмі I_1 отримаємо:

$$I_1^2 \rho_1 l / S_d = \alpha_1 \Delta \Theta_1 S_{\pi d} + 2(\alpha_1 P \lambda S)^{1/2} \Delta \Theta_1, \quad (19)$$

де l – довжина ділянки дефекту, м; $S_d = \pi D X_0$ – площа бічної поверхні ділянки дефекту, м²; D , X_0 – діаметр і лінійний розмір дефекту, м; $P = \pi D$ – периметр поперечного перерізу стержня, м²; $S = \pi D^2 / 4$ – площа поперечного перерізу стержня, м².

З урахуванням (20) при різних струмах маємо:

$$\Delta \Theta_2 = \left\{ I_2^2 \rho_2 \left[\alpha_1 X_0 + (D \alpha_1 \beta \Theta_1 / \rho_1)^{1/2} \right] \Delta \Theta_1 / \left\{ I_1^2 \rho_1 \left[\alpha_2 X_0 + (D \alpha_2 \beta \Theta_2 / \rho_2)^{1/2} \right] \right\} \right\}. \quad (20)$$

При малих розмірах дефекту ($X_0=0$) із (20) отримаємо вираз:

$$\Delta\Theta_2 = I_2^2 \rho_2^{3/2} (\alpha_1 \Theta_1)^{1/2} \Delta\Theta_1 / [I_1^2 \rho_1^{3/2} (\alpha_2 \Theta_2)^{1/2}] , \quad (21)$$

ідентичний (17).

При зменшенні діаметра проводу до нуля ($D = 0$) вираз (20) ідентичний співвідношенню (9).

Вважаючи, що питомий опір сплаву ρ незначно залежить від температури, відповідно до (20) отримуємо:

$$\Delta\Theta_2 = \left\{ I_2^2 \rho \left[\alpha_1 X_0 + (D \alpha_1 \beta \Theta_1 / \rho)^{1/2} \right] \right\} \Delta\Theta_1 / \left\{ I_1^2 \rho \left[\alpha_2 X_0 + (D \alpha_2 \beta \Theta_2 / \rho)^{1/2} \right] \right\} . \quad (22)$$

З врахуванням співвідношень (6) – (8) можна записати:

$$\left[\rho(\Theta_1) I_1^2 / \rho(\Theta_2) I_2^2 \right] = \alpha_1 (\Theta_1 - \Theta_0) / \alpha_2 (\Theta_2 - \Theta_{PP}) . \quad (23)$$

Таким чином, із співвідношення (23) можна розрахувати температуру поверхні дефекту Θ_2 при відомих значеннях $\rho(\Theta_1)$, $\rho(\Theta_2)$, I_1 , I_2 , α_1 , α_2 , Θ_1 , Θ_0 .

$$\Theta_2 = \frac{\alpha_1 (\Theta_1 - \Theta_0) \rho(\Theta_2) I_2^2}{\alpha_2 \rho(\Theta_1) I_1^2} + \Theta_{PP} . \quad (24)$$

Умови (6) – (8) та (24) справедливі при припущенні, що тепловідвід від дефекту здійснюється шляхом конвекції і випромінювання на межі метал – повітря, і додатковий тепловідвід здійснюється за допомогою теплопровідності в об'ємі металу від місця локалізації дефекту вздовж провідника.

Висновки

Можливості дистанційної оцінки величин теплових потоків дозволяють розробляти алгоритми, що будуть застосовуватись для підвищення вірогідності діагностування шляхом збільшення числа діагностичних параметрів, які раніше не враховувались, і які підвищують об'єктивність експертної оцінки при діагностуванні.

Використання величини теплового потоку в процесі діагностування контактних з'єднань дозволяє перейти від емпіричних експертних рекомендацій до розробки науково-обґрунтованих пропозицій при проведенні технічного обстеження.

Список літератури

1. Залесский А.М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А.М. Залесский, Г.А. Кукеков. – Л.: Энергия, 1967. – 379 с.
2. Залесский А.М. Электрические аппараты высокого напряжения / А.М. Залесский. –Л.; М.: ГЭИ, 1957.– 540 с.
3. Калашников С.Г. Электричество / С.Г. Калашников — [6-е изд., стереотип]. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 624 с.
4. Масленников Д.С. О тепловизионном контроле электротехнического оборудования / Д.С. Масленников, А.Г. Константинов, В.Н. Осотов // Электрические станции. – 1985. – № 11. – С. 73–75.
5. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – [Чинний від 15.01.2007 р.]. – Харків, 2009. – 278 с.

Проведено исследование влияния тепловых потоков в зоне дефектного контактного соединения на температуру его поверхности. Установлена зависимость поверхностной температуры дефектного линейного контактного соединения от удельного сопротивления проводника и условий теплообмена с окружающей средой.

Электрический ток, электрическое сопротивление, температура, тепловой поток, теплопроводность, теплоотдача.

A study of the effect of heat flow in the area of defective pin connection on the temperature of its surface. The dependence of the surface temperature of the defective line pin connections from the resistivity of the conductor and the conditions of heat exchange with the environment.

Electric current, electrical resistance, temperature, heat flow, thermal conductivity, convective heat transfer.

УДК 621.3

ПІДВИЩЕННЯ ККД ІМПУЛЬСНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ

А.П.Пузанов, кандидат технічних наук

Проаналізовано вторинні джерела електроживлення зі стабілізацією вихідної напруги широтно-імпульсним модулятором з транзисторним ключем, який навантажено на вихідний імпульсний трансформатор. Такі схеми дають можливість досягнути масогабаритних характеристик 300 Вт/дм^3 при частоті перетворення до 200 кГц і ККД до 70 %.

Розглянуто резонансні та квазірезонансні схеми AC/DC-перетворювачів із використанням LC-кіл. Показано, що резонансні схеми мають більш високу стабільність і ефективність, дають можливість збільшити частоту перетворення до 2 МГц, що дозволяє для джерел з вихідною потужністю до 100 Вт досягнути малогабаритних характеристик до 930 Вт/дм^3 при ККД до 87 %.

Перетворювач напруги, широтно-імпульсний модулятор, стабілізатор напруги, резонансні кола, ефективність.

Стрімкий розвиток нових напівпровідникових технологій привів до революції й у такій області електротехніки, як джерела електроживлення. За короткий термін вторинні джерела електроживлення радикально змінилися: на зміну громіздким пристроям з мережним трансформатором і додатковим транзисторним стабілізатором прийшли мініатюрні імпульсні модулі. Виробляються малогабаритні AC/DC-перетворювачі в корпусах звичайних мікросхем.

Мета досліджень - підвищення ефективності імпульсних джерел живлення.

Проведено исследование влияния тепловых потоков в зоне дефектного контактного соединения на температуру его поверхности. Установлена зависимость поверхностной температуры дефектного линейного контактного соединения от удельного сопротивления проводника и условий теплообмена с окружающей средой.

Электрический ток, электрическое сопротивление, температура, тепловой поток, теплопроводность, теплоотдача.

A study of the effect of heat flow in the area of defective pin connection on the temperature of its surface. The dependence of the surface temperature of the defective line pin connections from the resistivity of the conductor and the conditions of heat exchange with the environment.

Electric current, electrical resistance, temperature, heat flow, thermal conductivity, convective heat transfer.

УДК 621.3

ПІДВИЩЕННЯ ККД ІМПУЛЬСНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ

А.П.Пузанов, кандидат технічних наук

Проаналізовано вторинні джерела електроживлення зі стабілізацією вихідної напруги широтно-імпульсним модулятором з транзисторним ключем, який навантажено на вихідний імпульсний трансформатор. Такі схеми дають можливість досягнути масогабаритних характеристик 300 Вт/дм^3 при частоті перетворення до 200 кГц і ККД до 70% .

Розглянуто резонансні та квазірезонансні схеми АС/DC-перетворювачів із використанням LC-кіл. Показано, що резонансні схеми мають більш високу стабільність і ефективність, дають можливість збільшити частоту перетворення до 2 МГц , що дозволяє для джерел з вихідною потужністю до 100 Вт досягнути малогабаритних характеристик до 930 Вт/дм^3 при ККД до 87% .

Перетворювач напруги, широтно-імпульсний модулятор, стабілізатор напруги, резонансні кола, ефективність.

Стрімкий розвиток нових напівпровідникових технологій привів до революції й у такій області електротехніки, як джерела електроживлення. За короткий термін вторинні джерела електроживлення радикально змінилися: на зміну громіздким пристроям з мережним трансформатором і додатковим транзисторним стабілізатором прийшли мініатюрні імпульсні модулі. Виробляються малогабаритні АС/DC-перетворювачі в корпусах звичайних мікросхем.

Мета досліджень - підвищення ефективності імпульсних джерел живлення.

Матеріали та методика досліджень. Основними джерелами електроживлення є централізовані системи електропостачання зі стандартними параметрами. Звичайно в міських мережах електроенергія подається споживачеві у вигляді трифазного струму з лінійною напругою 380 В, частотою 50(±0,5 Гц) і фазною напругою 220 В. Якість електропостачання визначається ГОСТ 3109-99 [3], однак стабільність напруги і частоти в первинних мережах електроживлення невисокі, що призводить до необхідності застосування стабілізаторів перемінного струму навіть по колах первинного електроживлення. Для живлення сучасних електротехнічних пристроїв потрібні джерела постійного струму напругою +5 В, +12 В або +27 В. Перетворювачі змінної напруги 220 В у постійне (AC/DC) називають вторинними джерелами живлення (ВДЖ) [1].

Узагальнена структура ВДЖ показана на рис.1. Вхідна напруга перемінного струму 220 В перетворюється трансформатором (Тр) до необхідної величини (наприклад, 6 В), випрямляється (В), фільтрується (Ф), а потім за необхідності стабілізується (Ст). Навантаження підключається до виходу стабілізатора. Трансформатор на вході ВДЖ забезпечує і гальванічну розв'язку між мережею первинного електро-живлення і навантаженням.

Якість ВДЖ характеризує коефіцієнт пульсацій на навантаженні:

$$k_n = \frac{\Delta U_n}{U_2},$$

де $\Delta U_n = U_{2\max} - U_{2\min}$; U_2 , $U_{2\max}$, $U_{2\min}$ ~ необхідна постійна, імпульсна максимальна і мінімальна напруга на навантаженні відповідно. Звичайно $k_n = 0,05 \div 0,2$.

Низька частота мережі 50 Гц призводить до необхідності застосування громіздких трансформаторів і фільтрів, при цьому коефіцієнт пульсацій на виході фільтра залежить від величини навантаження і часто виявляється неприпустимо великим. Коефіцієнт корисної дії (ККД) таких ВДЖ дорівнює відношенню потужності, що віддається в навантаження P_n , до потужності P_1 , споживаної від первинної електромережі $\eta = P_n/P_1$, як правило, не вище 40 %.

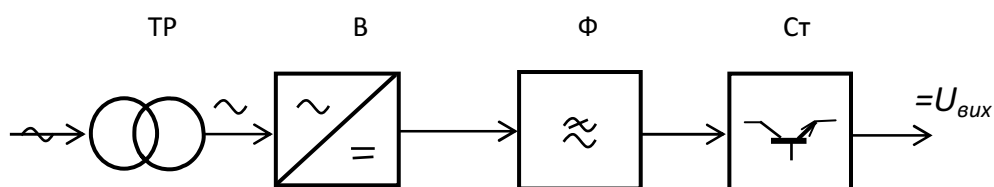


Рис.1. Структурна схема ВДЖ з трансформаторним входом

Розвиток електронних технологій призвело до створення елементної бази, що дозволяє принципово поліпшити техніко-економічні показники ВДЖ у широкому діапазоні потужностей. При цьому суттєво вплинуло

на характеристики ВДЖ створення високовольтних високочастотних електронних ключів, оптронів та інших електронних приладів, що дозволяють перетворювати електроенергію не на частотах первинної електромережі 50 Гц, а на частотах 40–250 кГц. Відповідно змінилися і базові структури ВДЖ. Основною стала “безтрансформаторна” структура ВДЖ (рис.2), відповідно до якої напруга мережі 220 В безпосередньо випрямляється діодним випрямлячем (B_1) і фільтрується низькочастотним фільтром (Φ). Отримана постійна напруга (близько 305 В) перетворюється генератором (M) в імпульсну напругу з підвищеною частотою імпульсів (до 200 кГц), яка потім за допомогою імпульсного високочастотного трансформатора Tr перетворюється в перемінну напругу потрібної амплітуди. Напруга вторинної обмотки імпульсного трансформатора TP випрямляється (B_2) і стабілізується стабілізатором $Ст1$.

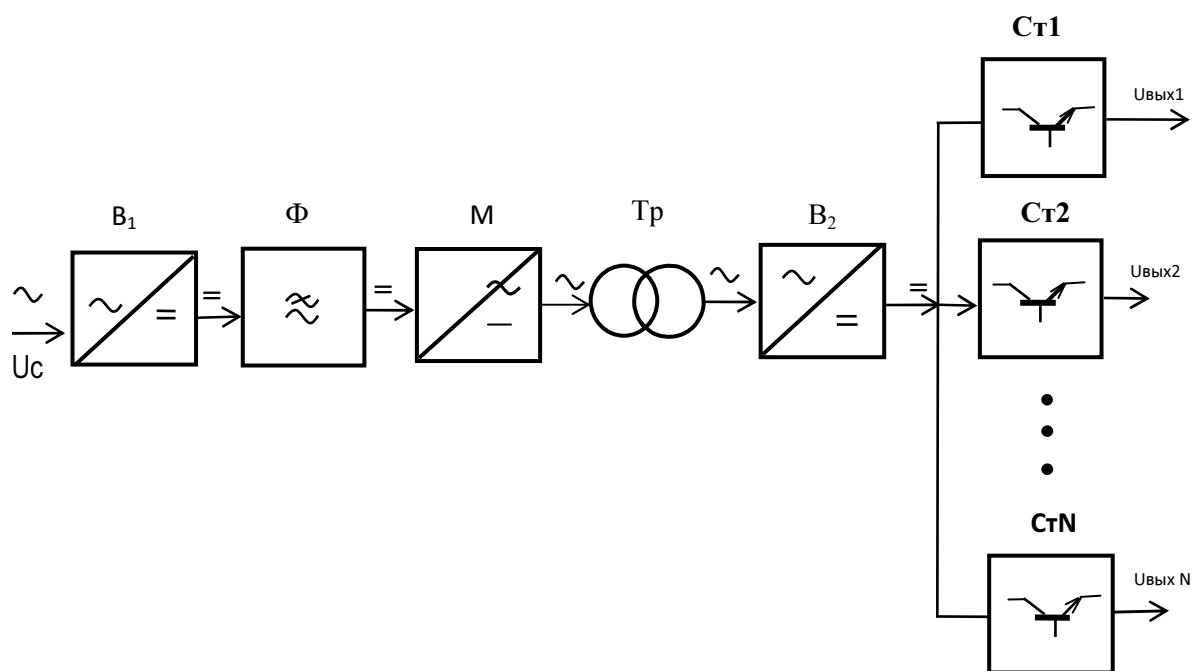


Рис.2. Структура ВДЖ з безтрансформаторним входом

Високочастотний трансформатор має невеликі розміри і забезпечує гальванічну розв'язку між входом і виходом ВДЖ до 5 кВ. Вихідна імпульсна напруга підвищеної частоти потім повторно випрямляється за допомогою найпростішого однофазного діодного мостового випрямляча і фільтрується простим фільтром низьких частот, що звичайно складають з конденсаторів великої ємності (до 1000 мкФ, 500 В). За необхідності кількість вторинних обмоток імпульсного трансформатора може бути збільшено ($Ст1, Ст2, \dots, СтN$) для одержання потрібного складу вторинних напруг $U_{вых1}, U_{вых2}, \dots, U_{выхN}$. Стабілізація вихідної напруги забезпечується шляхом зміни тривалості імпульсів генератора, тому такі схеми одержали назву широтно-імпульсних модуляторів (ШИМ) [1,4].

Нині кілька фірм (Power Integrations, FranMar, Peak, Lambda, Ericsson) випускають AC/DC перетворювачі з мікросхемами ШИМ різної

потужності від 0,5 Вт до 50 Вт, причому перетворювачі потужністю до 6 Вт виконуються у корпусах DIP-8, DIP-8B, або у планарному виконанні – корпус SMD-8B.

Перетворювачі потужності до 25 Вт випускаються у прямокутних корпусах 50x25 мм, висотою 10 – 15 мм, а потужності 25–50 Вт – у корпусах 50x50мм або 25x75 мм.

Результати досліджень. Більшість AC\DC - перетворювачів виконуються за схемою прямого перетворення постійного струму (рис.3). У цій схемі вхідні і вихідні обмотки розташовуються на загальному магнітопроводі реактора, виконаного з феросплаву. Гальванічна розв'язка забезпечується наявністю двох обмоток. Випрямлення забезпечується однополуперіодним діодним випрямлячем (імпульсний діод VD2) і фільтром низьких частот (C_Φ).

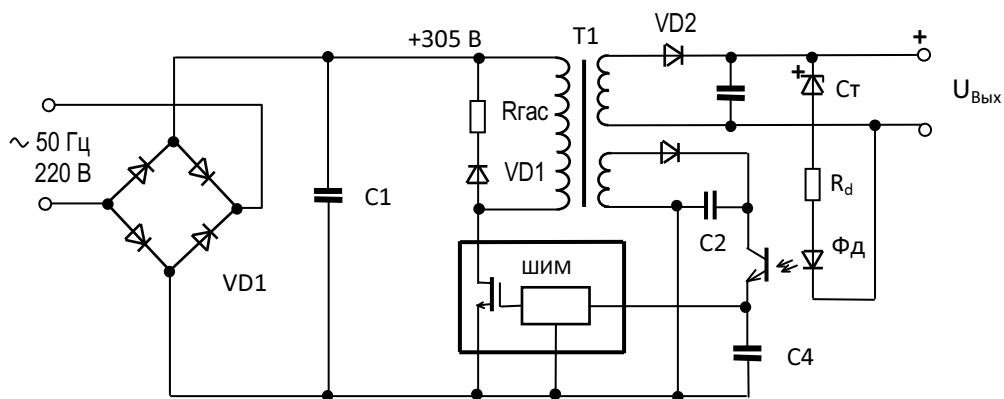


Рис.3. Схема імпульсного AC/DC-перетворювача

Як випрямлячі можуть бути використані напівмостові і мостові схеми, рівень пульсацій яких майже вдвічі нижче, ніж на виході однонапівперіодної схеми.

Перші покоління описаних вище перетворювачів створювалися на основі біполярних транзисторів, що працюють на частотах декількох кГц із досить низьким ККД (50 – 60 %) Відповідно і питомі масогабаритні показники таких ВДЖ не перевищували 300 Вт/дм³. Основними факторами, що обмежують зростання цих показників, були низькі характеристики фільтрів на таких частотах і великі комутаційні втрати потужності в транзисторах. Спроби знизити ці втрати введенням RLC-кіл («сноберів»), які роблять швидше процес переключення транзистора, виявилися недостатньо ефективними, тому що «снобери» самі створюють втрати потужності. Ситуація покращилася з появою могутніх польових транзисторів, що відрізняються високою швидкодією і практично нульовою потужністю імпульсів керування. У результаті стало можливим створення нового покоління перетворювачів з «м'якою» комутацією ключів у моменти, коли струм або напруга на транзисторі близькі до нуля.

Перетворювачі нового покоління були названі квазірезонансними [2,3]. У свою чергу вони розрізняються на два класи: перетворювачі з ко-

мутацією в нулі струму (КНС) і перетворювачі з комутацією в нулі напруги (КНН) [1].

Принцип дії таких перетворювачів заснований на введенні в схеми перетворювачів LC-кіл, які при переключенні ключів створюють квазісинусоїдні коливання, що дозволяють виключати ключ у нулі струму або включати ключ у максимумі напруги (рис.4) [2,4]. Ці ключі можуть ефективно використовуватися в базових схемах ВДЖ. Для перетворювачів потужністю 100 Вт досягнуті питомі характеристики 930 Вт/дм^3 . Висока ефективність цього типу схем обумовлена практично виключенням втрат при вимиканні. При цьому граничними частотами для перетворювачів із КНТ є частота 2 МГц, подальше її збільшення обмежується втратами в «паразитних» ємностях МОН-транзисторів. Перетворювачі з КНН можуть працювати на високих частотах (до 10 МГц). Оскільки в момент переключення напруга колектор-емітер $U_{ке}$ транзистора близька до нуля, на перезаряд ємностей транзистора енергія майже не втрачається. Крім того, оскільки напруга, що комутується, мала (2–3 В), імпульсна напруга перешкоди, що створюється у мережі перемінного струму 220 В, також є мінімальною.

Нині квазірезонансні перетворювачі потужністю до 100 Вт створюються на основі гібридної товстоплівкової технології. Перетворювачі малої потужності (до 10 Вт) випускаються у 8 – вивідних і 14 – вивідних DIP–корпусах.

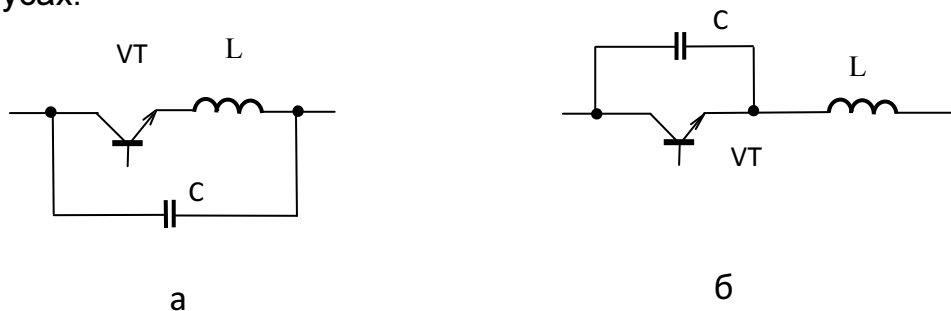


Рис.4. Резонансні ключі:

а – з комутацією в нулі напруги; б – з комутацією в нулі струму

Висновки

Для підвищення ККД та ефективності імпульсних перетворювачів необхідно застосовувати квазірезонансні контури при використанні високочастотних МОН-транзисторів.

Перетворювачі напруги потужністю до 300 Вт з комутацією в нулі напруги можуть працювати на частотах до 10 МГц. При цьому практично дорівнюють нулю втрати при комутації, обумовлені «паразитними» ємностями МОН-транзисторів, що забезпечує високий ККД (до 87 %). Одночасно знижується рівень перешкод, що створює імпульсний перетворювач у мережі змінного струму.

Список літератури

1. Касаткин А.С. Курс электротехники / А.С.Касаткин, М.В.Немцов.— М.: Высш. шк., 2008. — 542 с.
2. Ли Ф.К. Высокочастотные квазирезонансные преобразователи /Ф.К.Ли. ТИИР. — 1988. — Т.76 — №4. — С.12.
3. Розанов Ю. Вторичные источники питания: от сетевого трансформатора до корректора коэффициента мощности / Ю.Розанов, М.Рябчинский, А.Кваснюк / Chip News Украина. — 2004. — №4. — С. 3–8.
4. Самойлов В.Ф. Импульсная техника / В.Ф Самойлов, В.Г.Маковеев. — М.: Связь, 1971. — 224 с.
5. Ступельман В.Ш. Полупроводниковые приборы / В.Ш.Ступельман, Г.А.Филаретов. — М.: Сов. радио, 1973. — 248 с.

Проанализированы вторичные источники электропитания со стабилизацией выходного напряжения широтно-импульсным модулятором с транзисторным ключом, нагруженным на выходной импульсный трансформатор. Такие схемы позволяют достигнуть массогабаритных характеристик 300 Вт/дм³ при частоте преобразования до 200 кГц и КПД 70 %.

Рассмотрены резонансные и квазирезонансные схемы AC/DC-преобразователей с использованием LC-цепей. Показано, что резонансные схемы имеют более высокую стабильность и эффективность, дают возможность увеличить частоту преобразования до 2 МГц, что позволяет для источников с выходной мощностью до 100 Вт достигнуть массогабаритных характеристик 930 Вт/дм³ при КПД до 87%.

Преобразователь напряжения, широтно-импульсный модулятор, стабилизатор напряжения, резонансные цепи, эффективность.

Analyzed secondary power sources with stabilization of output voltage by width-pulse modulator with transistor key, laden on output pulsed transformer, that allows to reach 300 Wt/dm³ under CUE before 70%.

Considered resonant scheme AC/DC converters with use LC-sidebars. Install that resonant scheme has more high efficiency, enable to enlarge a transformation frequency before 2 MHZ, that allows for the power of load before 100 Wt reach 930 Wt/dm³ under CUE before 87%.

Converter of voltage, width-pulse modulator, voltage stabilizator, resonant schemes, efficiency.

МОНІТОРИНГ І ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ

***Т. П. Резніченко, кандидат технічних наук
Д. П. Кожан, студент магістратури***

Розглянуто питання застосування методу частотних розрядів для виявлення місць старіння або пошкодження ізоляції кабелів із зшитого поліетилену. Запропоновано застосування сучасних приладів фірм ДАТОС ЛТД, ДІМРУС та Вібро-Центр.

Ізоляція, контроль, тестування, моніторинг, діагностування, прогнозування, частотні розряди, частотні імпульси.

У системах електропостачання тепличних комплексів широко використовують кабельні мережі 10 та 0,4 кВ. Кабельні лінії 10 кВ виконані, в основному, маслонаповненими кабелями ААБ, АСБ, АСБж, ААШв перерізами від 70 до 240 мм². В останнє десятиліття знайшли широке застосування кабелі із зшитого поліетилену на напругу 6 – 35 кВ марки ПвПг, ПвПуг, АПвПг, АПвПуг.

Контроль та діагностування стану ізоляції маслонаповнених та із зшитого поліетилену кабелів нині суттєво відрізняються. По-різному трактуються деякі поняття та установлені ПТЕ норми та обсяги технічного обслуговування й випробовування.

На більшості тепличних комбінатів кабельні мережі з використанням маслонаповнених кабелів практично відпрацювали по 30 – 40 років. Є певний напрацьований досвід. До 30 % всіх кабельних ліній підлягають реконструкції і заміні.

Складніше з кабельними лініями із застосуванням кабелів із зшитого поліетилену. При цьому ряд фірм (ТОВ «ДАТОС ЛТД», ТОВ «ДІМРУС», НПФ «Вібро-Центр») рекомендують на кабельних лініях 10, 35, 110, 220, 330 кВ забезпечувати моніторинг технічного стану ізоляції «під робочою напругою» на основі методу реєстрації імпульсів частотних розрядів [1].

Мета досліджень – застосування методу частотних розрядів для виявлення місць старіння або пошкодження ізоляції кабелів із зшитого поліетилену.

Матеріали та методика досліджень. Частотний розряд являє собою, зосереджене джерело, що розповсюджує звукові (електромагнітні) коливання в однорідному середовищі ізоляційної конструкції.

Як пристрої, що генерують та фіксують ці коливання, можуть використовуватися OVM – 3, CDM – 30 тощо.

Датчики фіксації розрядів розміщувалися на початку та в кінці КЛ – 10 кВ з використанням кінцевої арматури. При цьому лінія контролюється постійно в режимі очікування «сигналу розряду».

Маючи схему реальної лінії та її геоінформаційну модель, фіксували розряд з одночасним визначенням місця «контрольного сигналу» з прив'язкою його до реальної схеми.

При цьому використовували систему програмного забезпечення «АС – Диагностика – СВО» фірми ТОВ «ДАТОС ЛТД» [1].

Результати досліджень. Під терміном «робоча напруга» кабеля мається на увазі рівень максимальної робочої напруги мережі.

Запропоновано застосовувати метод частотних розрядів для діагностування стану ізоляцій кабелів, який раніше використовувався лише для твердих ізоляційних конструкцій (ізоляторів, прохідних ізоляторів, кабелів із зшитої ізоляції). Цей метод дозволяє зменшити кількість випробувань кабелів підвищеною напругою і продовжити їх строк експлуатації. Додатково ми можемо прогнозувати термін наступного їх випробування і технічного обслуговування підвищеною напругою за фактичним станом ізоляції.

При реєстрації частотних розрядів із застосуванням приладів OVM – 3, CDM – 30 (рис. 1) з рівнем від 10 пКл можна визначати місце виникнення частотних розрядів, їх інтенсивність і потужність.

За умов занесення в програму «АС – Диагностика – СВО» фізичних координат кабельних мереж та «прив'язки» координат муфт можна досліджувати технічний стан кабельних муфт.

При цьому датчики частотних розрядів приладу CDM – 30 і струмів витоків встановлюються на клемі – заземлення кабелю (рис. 2).

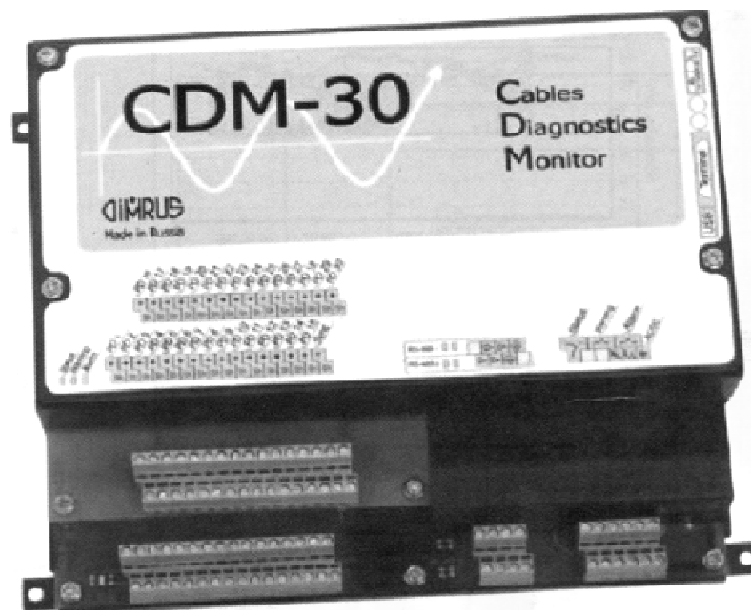


Рис. 1. Загальний вид приладу

Блок узгодження для різних типів ізоляції кабелів здійснюється за сигналами GPS або оптоволоконними каналами (що в умовах тепличного комплексу більш раціонально). За даними авторів [2] на поверхні кабельних трас спостерігається наявність магнітного поля над поверхнею землі у місці проходження кабельної лінії [2].

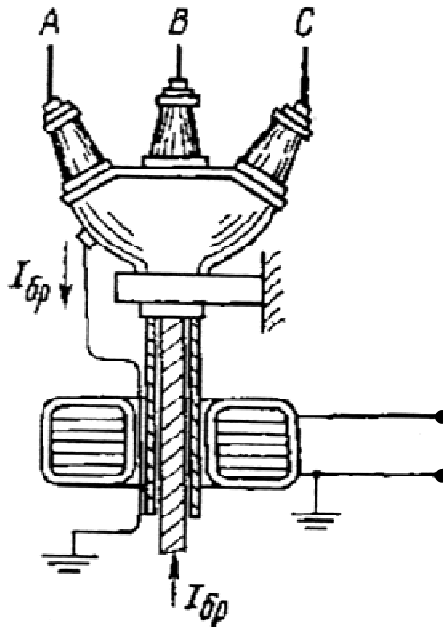


Рис. 2. Кінцева муфта з розміщенням ТНП

Місце виникнення частотних розрядів у кабельних лініях (кількість кабельних входних і відхідних ліній може бути до 30!), а, отже, і дефекти, що розвиваються, визначаються з точністю 5 – 10 м.

Всі прилади об'єднуються в локальну мережу. Управління приладами здійснюється прикладним програмним забезпеченням «АС – Діагностика – СВО», встановленим на робочій станції, на базі промислового комп'ютера і під управлінням операційної системи Windows ® фірми Microsoft.

Стационарна система моніторингу побудована у вигляді трьох рівнів: верхній – рівень робочої станції; середній – рівень інтелектуальних контролерів на базі зазначених приладів CDM – 30; нижній – рівень датчиків.

На АРМ головного енергетика підприємства на 19 «LCD – моніторі» у вікні «Користувача» показується кабельна лінія, на якій «семафорами» вказується технічний стан лінії, де зеленим кольором індукуюється стан «норма без відхилень», жовтим – «передаварійний стан», червоним – «аварія» (рис. 3).

Моніторинг зареєстрованих імпульсів частотних розрядів дозволяють будувати величини їх потужності та інтенсивності. За цими величинами визначається час, коли обслуговуючому персоналу необхідно застосовувати попереджувальні дії з метою запобігання аварії на лінії.

Функціональне графічне вікно користувача (див. рис. 3) або «Інтерфейс Користувача» створюється під конкретний об'єкт, що підлягає моніторингу та діагностуванню.

Зазвичай у цьому вікні відображається початок і кінець діагностуючої лінії, створюються «семафори», що відображають стан об'єкта, наприклад кабельної лінії. Колір «семафора» вибирається так: зелений – технічний стан об'єкта в «нормі», жовтий – технічний стан об'єкта погіршився і фіксується як «попередження», червоний – технічний стан об'єкта

фіксується як «аварійний» і вимагає ремонту лінії. У функціональному вікні системи моніторингу відображуються також параметри роботи і стан локальної мережі, віддалених робочих станцій, виставлення і настройка уставок, перегляд виміряних величин, оцінювання подій персоналом.

Основою функціонування прикладного програмного забезпечення, що реалізує функції моніторингу, діагностування, прогнозу залишкового ресурсу, стаціонарних систем моніторингу є база даних виміряних величин. У нашому випадку величини частотних розрядів – параметр "Q" виражений у кулонах, інтенсивність частотних розрядів – параметр "PDI" виражений значенням «імп /сек», потужність частотних розрядів – параметр "P" виражена значенням «мВт». Результати вимірювань прив'язуються до відповідної фази напруги (наприклад, «А»).

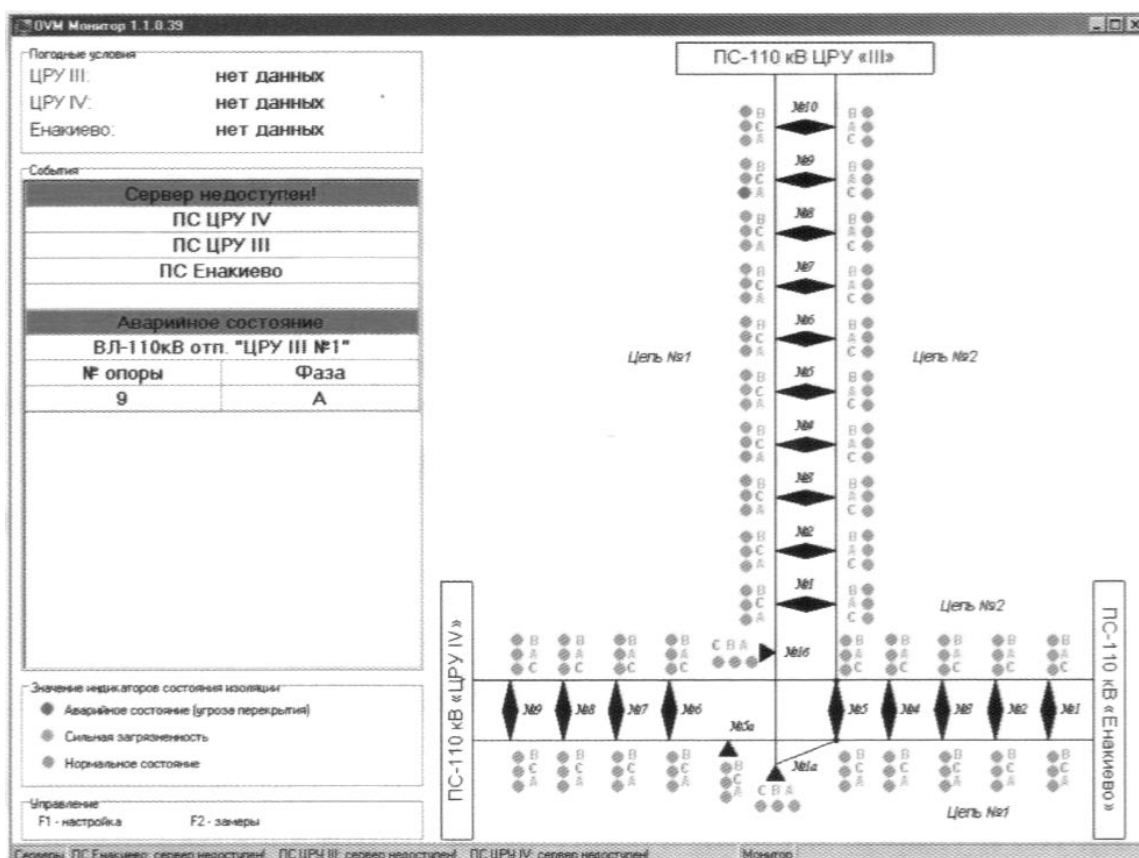


Рис. 3. Монитор користувача

При цьому алгоритм діагностування стану ізоляції кабелю можна виразити в логічній формі:

- в автоматичному режимі визначається, чи є імпульси частотних розрядів у лінії (вид імпульсу показаний на рис. 4);
- якщо зареєстрований імпульс – це частотний розряд, а діагностичному процесору відома довжина лінії або ліній, то в автоматичному режимі визначається, звідки прийшов імпульс частотного розряду з кабельної лінії чи ззовні;

■ якщо частотний імпульс з контрольованої лінії, то будується величина інтенсивності PDI частотного розряду або його потужності Р. При досягненні заздалегідь введеної уставки оператора повідомляється рівень утвореного дефекту у вигляді «семафорів».

Результати роботи діагностичного процесора стаціонарної системи «АС – Диагностика – СВО» перевірялися в лабораторних умовах з використанням спеціальних переносних реєстраційних приладів (див. рис. 4).

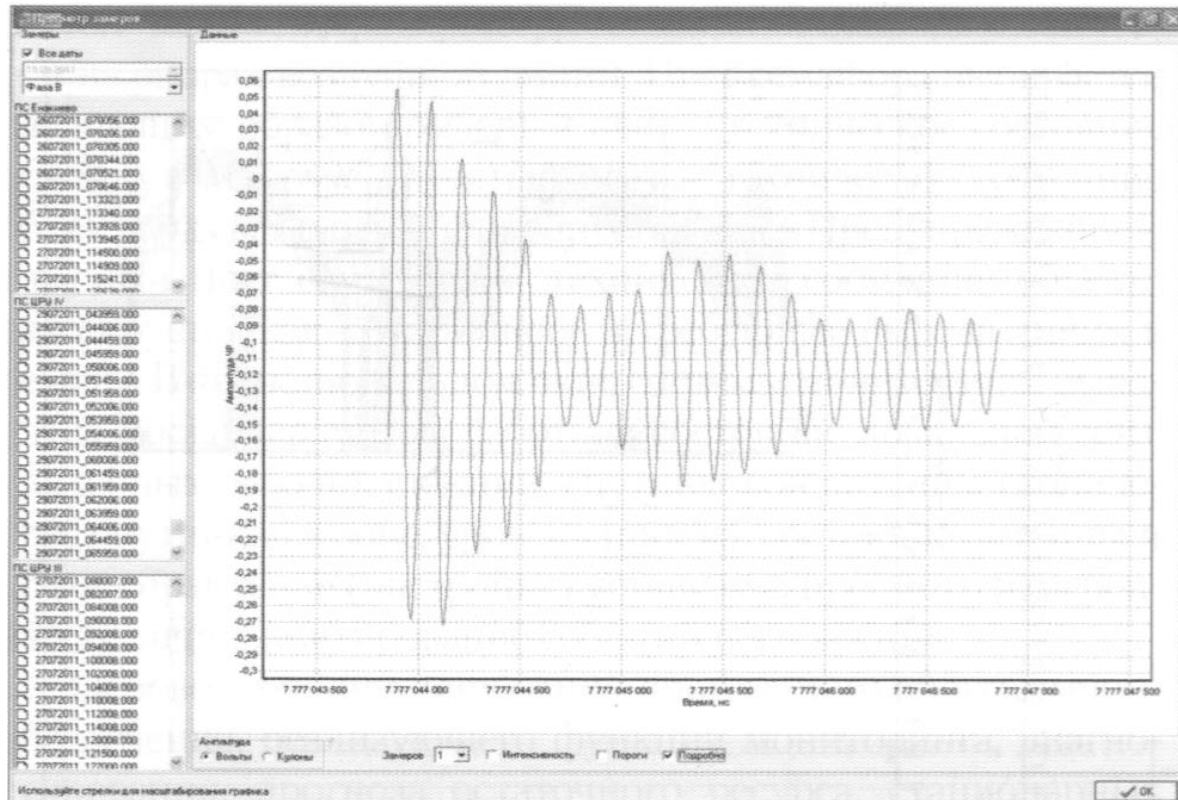


Рис. 4. Імпульс частотного розряду в фазі В з тривалістю задаючого імпульсу частотного розряду 3 мкс

Висновки

На підставі розробок ТОВ «ДАТОС ЛТД» і ТОВ «ДИМУС» зроблено спробу створити варіант дослідної експлуатаційної системи контролю технічного стану кабелів 10 кВ.

Визначено дослідним шляхом характеристики частотного розряду в полімерній ізоляції: інтенсивність і потужність.

Для подальшого вдосконалення алгоритмів системи необхідний літній і осінній період реєстрації частотних розрядів в умовах підвищеної вологості температури та різних режимів роботи підприємства.

Список літератури

1. Богатырев. Ю.Л. Мониторинг изоляции ЛЭП под рабочим напряжением / Ю.Л. Богатырев // Электропанорама. – 2011. – №7-8. – С. 26 – 31.
2. Искра В.Д. О проектировании экранов кабельных линий / В.Д. Искра, А.А. Квицинский // Электрические сети и системы. – 2011. – №1. – С. 18 – 22.

Рассмотрен вопрос применения метода частичных разрядов для выявления мест старения или повреждения изоляции кабелей из сшитого полиэтилена. Предложено применение современных приборов фирм ДАТОС ЛТД, ДИМРУС и Вибро-Центр.

Изоляция, контроль, тестирование, мониторинг, диагностирование, прогнозирование, частотные разряды, частотные импульсы.

The question of applying the method frequency discharges to detect locations aging or damage to isolation of cables of crosslinked polyethylene. Proposed application of modern instrumentation companies DATOS LTD, DIMRUS and Vibro Center.

Isolation, control, testing, monitoring, diagnosis, prognosis, frequency discharges, frequency pulses.

УДК 621.31

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕГУЛЬОВАНОГО ЗА НАПРУГОЮ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ СТАТИСТИЧНО ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗУ ЗАМКНУТИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Ю.В. Шуруб, кандидат технічних наук

Запропоновано лінеаризовану модель регульованого за напругою асинхронного двигуна при випадкових навантаженнях, що дозволяє застосовувати до регуляторів асинхронних електроприводів методи статистично оптимального синтезу.

Асинхронний двигун, перетворювач напруги, стохастичне навантаження.

Одним із шляхів усунення негативних наслідків випадкового характеру зміни моменту навантаження асинхронних електроприводів та підвищення ефективності їх роботи є створення замкнутих систем електроприводів, які за допомогою своїх регуляторів можуть активно впливати на перехідні та динамічні квазісталі режими роботи. У цій роботі досліджено електроприводи робочих машин, які мають значні випадкові коливання моменту навантаження та не потребують регулювання швидкості у великому діапазоні. Вказаним умовам відповідає замкнута система електропривода «перетворювач напруги – асинхронний двигун» із регулятором, оптимальним за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки регулювання при дії стохастичних навантажень – статистично оптимальним регулятором.

Мета досліджень – розробка математичної моделі асинхронного двигуна для статистично оптимального синтезу асинхронних електроприводів.

Рассмотрен вопрос применения метода частичных разрядов для выявления мест старения или повреждения изоляции кабелей из сшитого полиэтилена. Предложено применение современных приборов фирм ДАТОС ЛТД, ДИМРУС и Вибро-Центр.

Изоляция, контроль, тестирование, мониторинг, диагностирование, прогнозирование, частотные разряды, частотные импульсы.

The question of applying the method frequency discharges to detect locations aging or damage to isolation of cables of crosslinked polyethylene. Proposed application of modern instrumentation companies DATOS LTD, DIMRUS and Vibro Center.

Isolation, control, testing, monitoring, diagnosis, prognosis, frequency discharges, frequency pulses.

УДК 621.31

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕГУЛЬОВАНОГО ЗА НАПРУГОЮ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ СТАТИСТИЧНО ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗУ ЗАМКНУТИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Ю.В. Шуруб, кандидат технічних наук

Запропоновано лінеаризовану модель регульованого за напругою асинхронного двигуна при випадкових навантаженнях, що дозволяє застосовувати до регуляторів асинхронних електроприводів методи статистично оптимального синтезу.

Асинхронний двигун, перетворювач напруги, стохастичне навантаження.

Одним із шляхів усунення негативних наслідків випадкового характеру зміни моменту навантаження асинхронних електроприводів та підвищення ефективності їх роботи є створення замкнутих систем електроприводів, які за допомогою своїх регуляторів можуть активно впливати на перехідні та динамічні квазісталі режими роботи. У цій роботі досліджено електроприводи робочих машин, які мають значні випадкові коливання моменту навантаження та не потребують регулювання швидкості у великому діапазоні. Вказаним умовам відповідає замкнута система електропривода «перетворювач напруги – асинхронний двигун» із регулятором, оптимальним за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки регулювання при дії стохастичних навантажень – статистично оптимальним регулятором.

Мета досліджень – розробка математичної моделі асинхронного двигуна для статистично оптимального синтезу асинхронних електроприводів.

Матеріали і методика досліджень. Математичні моделі асинхронного двигуна, що найповніше описують динамічні режими роботи [3], є нелінійними, що робить неможливим їх застосування при використанні аналітичних методів статистичного синтезу оптимальних регуляторів асинхронних електроприводів за системою «перетворювач напруги – асинхронний двигун» за зовнішнім стохастичним збуренням.

У роботі [2] показано, що математична модель асинхронного двигуна може бути лінеаризована на робочій ділянці його механічної характеристики шляхом розкладання нелінійних членів диференціальних рівнянь повної динамічної моделі в ряд Тейлора. Тоді рівняння електричної частини асинхронного двигуна в операторній формі може бути подано в такому вигляді:

$$(1 + T_e s)M(t) = \frac{2M_k}{\omega_0 s_k} (\omega_0 - \omega(t)), \quad (1)$$

де M_k – критичний момент двигуна, Н·м; s_k – критичне ковзання двигуна, у.о.; $T_e = \frac{1}{\omega_0 s_k}$ – електромагнітна постійна часу, с; $\frac{2M_k}{\omega_0 s_k} = \beta$ – жорсткість механічної характеристики асинхронного двигуна, Н·м·с/рад.

Рівняння механічної частини електропривода в операторній формі має такий вигляд:

$$Js\omega(t) = M(t) - M_c(t), \quad (2)$$

де J – сумарний момент інерції електропривода, кг·м².

Вважаючи вихідною величиною двигуна як елемента автоматичної системи кутову швидкість обертання $\omega(t)$, вхідною керуючою дією – кутову швидкість обертання холостого ходу $\omega_0(t)$, вхідною збурюючою дією – момент навантаження $M_c(t)$, з рівнянь (1) та (2) отримаємо загальне рівняння електричної та механічної частин асинхронного двигуна, виключаючи проміжну змінну – електромагнітний момент $M(t)$:

$$T_e T_M s^2 \omega(t) + T_M s \omega(t) + \omega(t) = \omega_0 - \frac{1}{\beta} (1 + T_e s) M_c(t), \quad (3)$$

де $T_M = \frac{J}{\beta}$ – електромеханічна постійна часу асинхронного двигуна, с.

Вхідною керуючою дією двигуна в складі замкнутої системи «перетворювач напруги – асинхронний двигун» є напруга живлення статора. При зміні напруги змінюється жорсткість механічної характеристики двигуна, тому при переході від керуючої дії у вигляді швидкості обертання холостого ходу $\omega_0(t)$ до керуючої дії у вигляді напруги живлення $U(t)$ цю зміну жорсткості механічної характеристики слід враховувати коефіцієнтом передачі за напругою (коефіцієнтом передачі за керуючою дією):

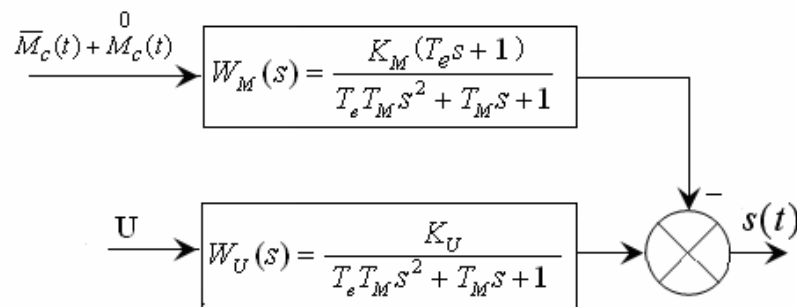
$$K_U = \frac{1}{\beta_{\text{прип}}} \frac{\Delta \beta}{\Delta U}, \quad (4)$$

де $\beta_{\text{прир}}$ – жорсткість природної механічної характеристики, Н·м·с/рад;

$\frac{\Delta\beta}{\Delta U}$ – чутливість зміни жорсткості штучних механічних характеристик

асинхронного двигуна $\Delta\beta$ до зміни напруги ΔU , яка визначається шляхом отримання сімейства штучних механічних характеристик при різних значеннях напруги живлення за допомогою повної динамічної математичної моделі та подальшого визначення залежності жорсткості штучної механічної характеристики від напруги живлення статора $\beta = f(U)$ і лінеаризації цієї залежності. Жорсткість штучних механічних характеристик для робочих ділянок визначалась як $\beta = \frac{dM}{d\omega}$.

Результати досліджень. Згідно з виразами (3) та (4) лінеаризована математична модель асинхронного двигуна, регульованого за напругою, може бути подана у вигляді структурної схеми (рисунок).



Структурна схема регульованого за напругою асинхронного двигуна

Оскільки в режимі оптимізації енергоспоживання контрольованою величиною системи «перетворювач напруги – асинхронний двигун» є ковзання, яке слід підтримувати на оптимальному рівні, у цій структурній схемі вихідною величиною показано саме ковзання $s(t)$, а не кутова швидкість обертання $\omega(t)$.

Враховуючи, що отримана структурна схема регульованого за напругою асинхронного двигуна необхідна для синтезу статистично оптимального регулятора замкнутого електропривода, що знаходиться під дією випадкових навантажень, вхідна збурююча дія – момент навантаження $M_c(t)$ – подана у вигляді суми середнього значення $\bar{M}_c(t)$ та центрова-

ного випадкового процесу $M_c(t)$, флуктуації коливань якого відбуваються

навколо цього середнього значення: $M_c(t) = \bar{M}_c(t) + M_c(t)$. Відтворення реалізацій центрованого випадкового процесу із заданими статистичними характеристиками може бути здійснено як результат проходження «білого» шуму через деяку динамічну систему, що отримала назву «формуючий фільтр», структура та параметри якої визначаються ви-

дом випадкового процесу [4]. Такий підхід дозволяє використовувати до цього класу електроприводів методи оптимального синтезу лінійних стохастичних динамічних систем [1].

Висновки

Запропонована лінеаризована на робочих ділянках штучних механічних характеристик математична модель регульованого за напругою асинхронного двигуна дозволяє застосовувати методи статистично оптимального синтезу асинхронних електроприводів за системою «перетворювач напруги – асинхронний двигун» при дії на них стохастичних навантажень.

Список літератури

1. Головінський Б.Л. Теорія автоматичного управління: навч. посіб. / Головінський Б.Л., Шуруб Ю.В., Лисенко В.П. – К.: Вид. Центр НУБіП України, 2012. – 240 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И.Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
3. Математичні моделі, методи дослідження та проектування електромеханічних систем на базі асинхронних машин із особливостями живлення та навантаження / В.Я.Лісник, О.М.Попович, О.В.Бібік, Ю.В.Шуруб // Технічна електродинаміка. – 2008. – №5. – С.42 – 45.
4. Шуруб Ю.В. Розробка системи керування трифазно-однофазних асинхронних електроприводів при випадкових навантаженнях/ Ю.В.Шуруб // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип.1(17). – С. 12 – 15.

Предложено линеаризированную модель регулируемого по напряжению асинхронного двигателя при случайных нагрузках, позволяющую применять к регуляторам асинхронных электроприводов методы статистически оптимального синтеза.

Асинхронный двигатель, преобразователь напряжения, стохастическая нагрузка.

It is offered the linearized model of the voltage regulated induction motor at the random loads, allowing to apply to regulators of induction electric drives of methods of statistically optimal synthesis.

Induction motor, voltage converter, stochastic load.

КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНКИ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

В.М. Штепа, кандидат технічних наук

О.І. Прима, кандидат історичних наук

*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

Г.М. Желновач, кандидат технічних наук

*Харківський національний автомобільно-дорожній
університет*

Розглянуто основні концептуальні елементи інформаційно-аналітичних систем, запропоновано принципи побудови інформаційно-аналітичної системи для оцінки навколишнього середовища. Наведено приклад концепції синтезу таких систем щодо аналізу впливу надзвичайних ситуацій природного та техногенного походження.

Навколишнє середовище, інформаційно-аналітична система, дані, сховища даних, OLAP.

З кожним роком питання забруднення навколишнього середовища все гостріше потребує змін у підході до його вирішення та методів протидії наслідків впливу негативних факторів на екологію. Сучасні темпи розвитку інформаційно-аналітичних систем дозволяють застосовувати методи систем підтримки прийняття рішень для все більшого спектра задач різного характеру.

Аналіз конкретного об'єкта забруднення та розробка для нього інформаційно-аналітичної системи може спроститися за рахунок застосування загальних принципів, що використовуються для розробки такого роду систем [2, 3, 5].

Мета досліджень – розгляд основних принципів розробки інформаційно-аналітичних систем для підтримки прийняття рішень на підприємствах та визначення основних складових таких систем для оцінки стану навколишнього середовища.

Матеріали та методика досліджень. Дієвість та ефективність інформаційно-аналітичних систем залежить від типу вибраних методів та моделей аналізу для конкретної сфери застосування, їх архітектури та принципів побудови. Загалом більшість інформаційно-аналітичних систем мають схожу архітектуру та складові (рис. 1).

Дані, що надходять до системи можуть бути подані у різному вигляді, мати різний формат та надходити з декількох різних джерел да-

них: датчиків, аналізів лабораторії та іншої звітності. Для ефективного використання цих даних, їх збереження та аналізу використовують сховище даних, яке являє собою спеціальний пакет для управління базою даних, що існує окремо від оперативних систем, обновлюється і структурується для термінових оперативних запитів і управлінських підсумків. За змістом та часовим горизонтом сховище даних відрізняється від оперативних систем. У ньому містяться предметно-орієнтовані, інтегровані, хронологічно впорядковані набори даних. При цьому сховище даних є незмінним у часі, а, отже, здатним підтримувати різноманітні види аналізу. Переважно такі бази даних є архівами операційних даних, відібраних для забезпечення підтримки прийняття рішень та оптимізованих для взаємодії з СППР організації [4]. На рис. 2 зображена спрощена схема формування та використання сховища даних у СППР.

Якщо необхідно зібрати дані про певний об'єкт та відокремити цю інформацію від загального сховища даних можна використати вітрини даних – тематичні бази даних, що містять конкретизовані дані.

Оперативне аналітичне оброблення (OLAP) є категорією технології програмного забезпечення, яке дало змогу аналітикам, менеджерам і виконавцям підсилити подання даних завдяки швидкому, узгодженому, інтерактивному доступу до широкого діапазону можливих зображень інформації, яка була одержана шляхом перетворення первинних даних для відображення в реальній вимірності, зрозумілій користувачам.

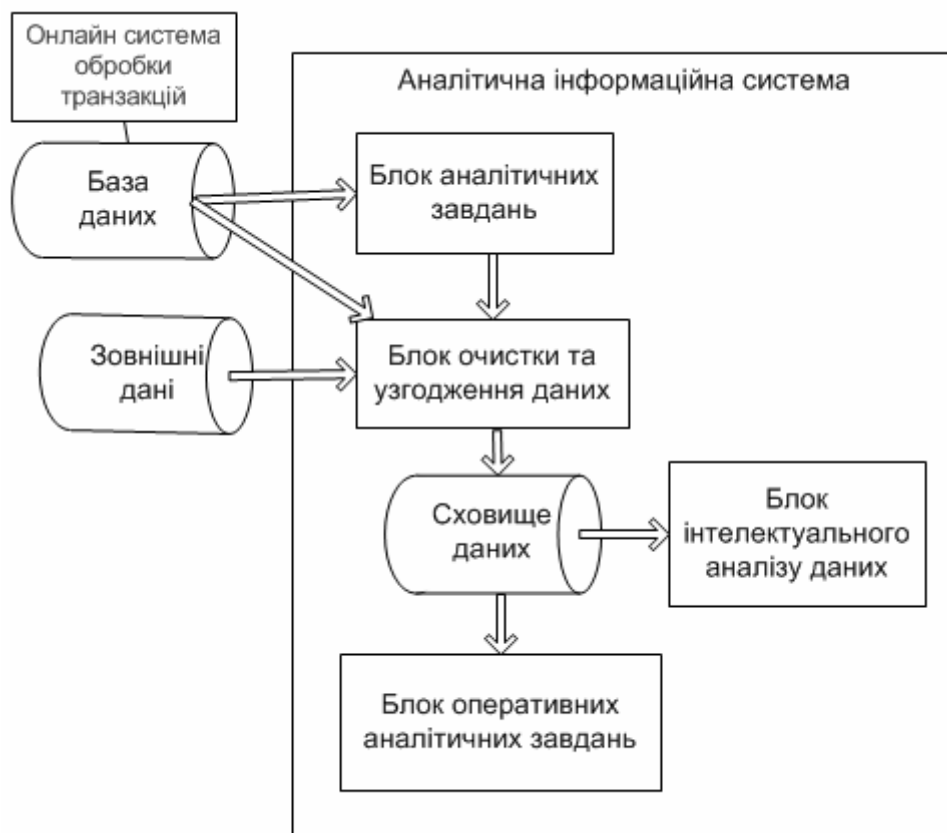


Рис.1. Загальна схема інформаційно-аналітичної системи

З практичного погляду OLAP є перспективною системою, яка проста для використання, містить спеціалізовані дані і пристосована до потреб користувачів. Ця система використовує сховища даних, а також містить велику кількість інструментальних засобів кінцевого користувача для організації доступу до даних і проведення їх аналізу.

OLAP здійснюється в багатокористувацькому клієнт/серверному режимі і уможливорює узгоджену швидку відповідь на запити, незалежно від обсягу і складності бази даних. OLAP допомагає користувачеві синтезувати інформацію підприємства завдяки порівняльному, конкретизованому перегляду даних, а також завдяки аналізу фактичних і розрахункових показників у варіантах аналізу типу «що..., якщо...?». Все це досягається за допомогою використання сервера OLAP, що є високорядним, багатокористувацьким механізмом маніпулювання даними, специфічно розробленим для того, щоб підтримувати і здійснювати операції з багатовимірними структурами даних. Багатовимірна структура упорядкована так, щоб кожний елемент даних був розміщений і забезпечений доступом на основі перетину компонентів вимірностей, які визначають певний елемент.

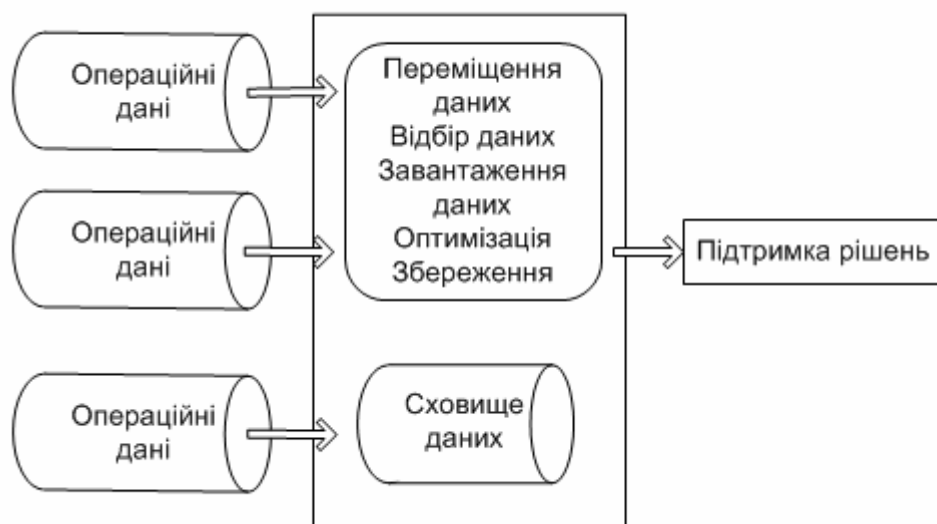


Рис. 2. Схема формування і використання сховища даних у СППР

Результати досліджень. Нині серед багатьох проблем, які спричинені антропогенною діяльністю людини, однією із основних є проблема глобальних змін клімату нашої планети. Суттєву роль у цьому процесі відіграють полігони твердих побутових відходів (ТПВ), тому проблема їх утилізації – актуальна.

Нижче наведено приклад розробки інформаційно-аналітичної системи для управління комплексом переробки інфільтраційних стоків побутово-виробничих відходів.

Полігон знешкодження інфільтраційних стоків являє собою складну систему, яка включає елементи автоматизації, компоненти меліорації, елементи хімічного аналізу стоків. Інформаційні потоки комплексу наведе-

дено на діаграмі потоків даних (рис.3). Дані про якість та стан стоків надходять до системи з датчиків вмісту солі, кислотності та хімічного складу. Інформаційно-аналітична система обробляє дані, які потім надходять до бази даних лабораторії, а потім до сховища даних комплексу.

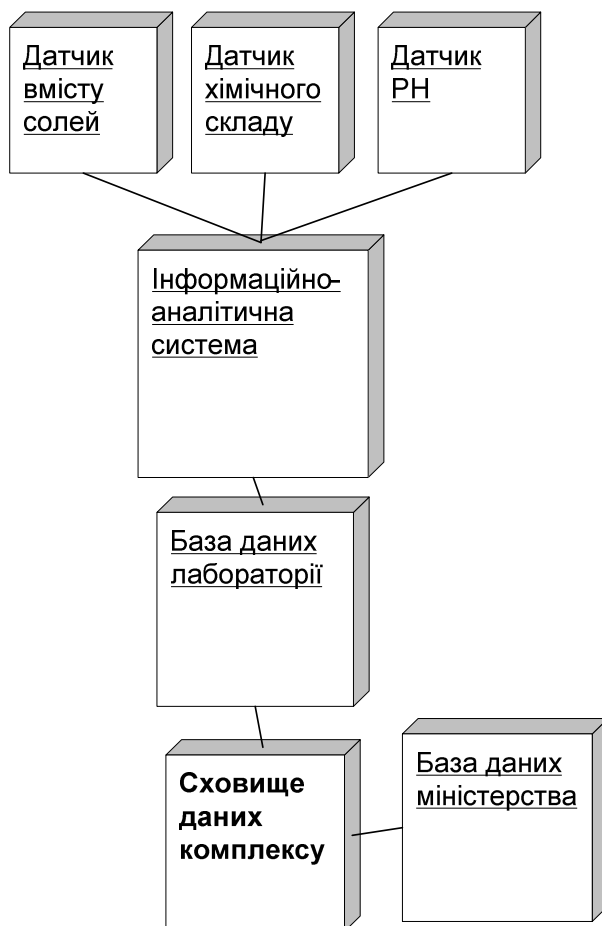


Рис. 3. Діаграма потоків даних

Основними джерелами даних у комплексі є датчики, які визначають відповідні параметри і передають їх до системи. В побудованій базі даних комплексу інформація з датчиків зберігається у відповідних відношеннях «chem», «pH», «salt».

Для синтезу бази даних було розроблено сховище даних, яке містить таблиці фактів та таблиці вимірів (рис.4). Це сховище даних побудовано за топологією «зірка». В таблицях вимірів містяться коди та значення показників, за якими буде визначатися основний критерій роботи системи, а саме час фільтрування, об'єм фільтрату та швидкість фільтрування, дата фільтрації, місце зняття даних на вході і виході. Залежно від значення цих показників будуть змінюватись значення фактів: кислотності, вмісту солей, хімічних показників: нітритів, нітратів та фосфатів.

Засоби Business Intelligence допомагають проводити аналітику даних, що містяться в сховищі даних. Одним із таких засобів є ключовий показник ефективності (KPI) – система оцінки, яка допомагає організації визначити досягнення стратегічних цілей. Використання цього засобу дає

можливість оцінити стан і допомогти у формуванні стратегії. КРІ дозволяє контролювати ділову активність у реальному часі.

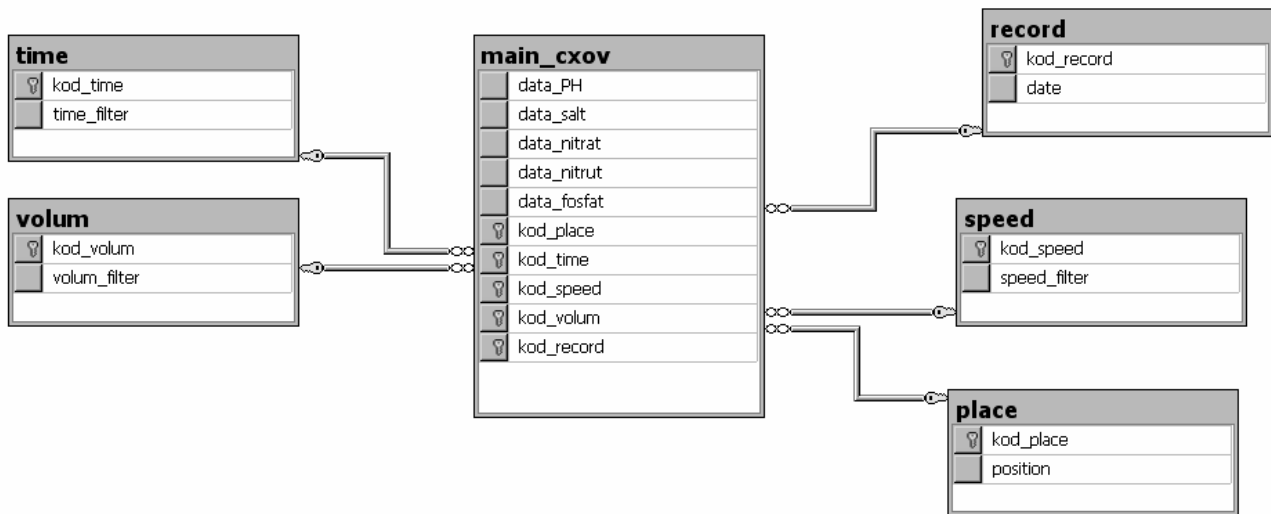


Рис.4. Структура сховища даних

Висновки

Розробка базових елементів інформаційно-аналітичних систем для оцінки стану навколишнього середовища за рахунок застосування запропонованої концепції синтезу дозволить спростити процес створення таких систем для більш вузької спеціалізації цієї сфери. Використання відповідних систем у сфері захисту навколишнього середовища допоможе покращити моніторинг та результативність прийнятих рішень.

Список літератури

1. Александров В.В. Методы построения информационно-логических систем / Александров В.В., Андреева Н.А., Кулешов С.В. – СПб.: Питер, 2005. – 109 с.
2. Архітектура систем управління біотехнічними об'єктами / Ю.О. Гунченко, В.П. Лисенко, С.А. Шворов, В.М. Штепа // Сучасна спеціальна техніка. – К.: МВС ДНДІ, 2012. – №2 (29). – С. 33-40.
3. Исаев Д.В. Аналитические информационные системы / Д.В. Исаев. – М.: Гос. ун-т; Высш. шк. экономики, 2008. – 60 с.
4. Ряба О.І. Синтез програмного забезпечення промислового мікроконтролера дозування реагентів при водопідготовці стічних вод / О.І. Ряба, В.М. Штепа // Науковий вісник НУБіП України. – 2012. – Вип. 174., ч. 1. – С. 86 – 92.
5. Ситник В.Ф. Системи підтримки прийняття рішень / В.Ф. Ситник. – К.: КНЕУ, 2004. – 50 с.

Рассмотрены основные концептуальные элементы информационно-аналитических систем, предложены принципы построения информационно-аналитической системы для оценки окружающей среды. Приведен пример концепции синтеза таких систем по анализу воздействия чрезвычайных ситуаций природного и техногенного происхождения.

Окружающая среда, информационно-аналитическая система, данные, хранилища данных, OLAP.

The basic elements of information-analytical systems proposed principles of information-analytical system for environmental assessment. Examples of the synthesis of such systems is to analyze the impact of natural and anthropogenic origin.

Environment, information-analytical system, data, data storage, OLAP.

УДК 621.327.539

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕПАРАТОРІВ МОЛОКА

О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, кандидати технічних наук

Проведено дослідження впливу відхилення напруги на кутову швидкість, технологічні та енергетичні характеристики сепараторів молока. Встановлено залежності продуктивності сепаратора молока та питомої витрати електроенергії від напруги.

Сепаратор молока, відхилення напруги, електропривод, продуктивність, питома витрата електроенергії.

Нині фактичне відхилення напруги в електромережах України у 3 – 4 рази перевищує допустиме значення. Тривалість постачання неякісної енергії складає (у найвіддаленіших споживачів) 45 % від загального часу роботи [3].

Сепаратори молока потребують незмінної кутової швидкості барабана. Проте внаслідок відхилення напруги змінюється кутова швидкість двигуна, яка в свою чергу обумовлює зміну технологічних характеристик сепаратора. Тому дослідження зміни технологічних і енергетичних характеристик сепараторів молока при відхиленні напруги має теоретичне і практичне значення.

Мета досліджень – встановлення впливу відхилення напруги на технологічні та енергетичні характеристики сепараторів молока.

Матеріали і методика досліджень. Аналіз зміни кутової швидкості електроприводів сепараторів молока та втрат енергії при відхиленні напруги проводився з використанням положень теорії електропривода, які стосуються електромеханічних властивостей асинхронних електродвигунів, приводних характеристик робочих машин і механізмів, енергетики усталених режимів електроприводів, та застосуванням математичного моделювання.

При експериментальних дослідженнях напругу на двигуні сепаратора молока СОМ-3-1000М змінювали за допомогою автотрансформатора. При цьому вимірювали частоту обертання вала тахометром і визначали продуктивність, момент статичних опорів сепаратора та питому витрату електроенергії.

The basic elements of information-analytical systems proposed principles of information-analytical system for environmental assessment. Examples of the synthesis of such systems is to analyze the impact of natural and anthropogenic origin.

Environment, information-analytical system, data, data storage, OLAP.

УДК 621.327.539

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕПАРАТОРІВ МОЛОКА

О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, кандидати технічних наук

Проведено дослідження впливу відхилення напруги на кутову швидкість, технологічні та енергетичні характеристики сепараторів молока. Встановлено залежності продуктивності сепаратора молока та питомої витрати електроенергії від напруги.

Сепаратор молока, відхилення напруги, електропривод, продуктивність, питома витрата електроенергії.

Нині фактичне відхилення напруги в електромережах України у 3 – 4 рази перевищує допустиме значення. Тривалість постачання неякісної енергії складає (у найвіддаленіших споживачів) 45 % від загального часу роботи [3].

Сепаратори молока потребують незмінної кутової швидкості барабана. Проте внаслідок відхилення напруги змінюється кутова швидкість двигуна, яка в свою чергу обумовлює зміну технологічних характеристик сепаратора. Тому дослідження зміни технологічних і енергетичних характеристик сепараторів молока при відхиленні напруги має теоретичне і практичне значення.

Мета досліджень – встановлення впливу відхилення напруги на технологічні та енергетичні характеристики сепараторів молока.

Матеріали і методика досліджень. Аналіз зміни кутової швидкості електроприводів сепараторів молока та втрат енергії при відхиленні напруги проводився з використанням положень теорії електропривода, які стосуються електромеханічних властивостей асинхронних електродвигунів, приводних характеристик робочих машин і механізмів, енергетики усталених режимів електроприводів, та застосуванням математичного моделювання.

При експериментальних дослідженнях напругу на двигуні сепаратора молока СОМ-3-1000М змінювали за допомогою автотрансформатора. При цьому вимірювали частоту обертання вала тахометром і визначали продуктивність, момент статичних опорів сепаратора та питому витрату електроенергії.

Результати досліджень. При відхиленні напруги механічна характеристика електродвигуна на робочій ділянці опишеться рівнянням [1]:

$$M_{\partial} = \beta_{\partial} U_*^2 (\omega_0 - \omega), \quad (1)$$

де M_{∂} – момент двигуна, Н·м; β_{∂} – жорсткість механічної характеристики електродвигуна, Н·м·с; ω_0 – синхронна кутова швидкість, с⁻¹; ω – задана кутова швидкість, с⁻¹; $U_* = U/U_H$ – напруга у відносних одиницях.

Механічна характеристика сепаратора молока має вентиляторний вигляд [2]:

$$M_c = M_0 + b\omega^2, \quad (2)$$

де M_0 – початковий момент, Н·м; b – коефіцієнт, Н·м·с².

В усталеному режимі роботи

$$\beta_{\partial} U_*^2 (\omega_0 - \omega) = M_0 + b\omega^2, \quad (3)$$

звідки отримаємо

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + b\omega^2}{\beta_{\partial} (\omega_0 - \omega)}}, \quad (4)$$

У відносних одиницях вираз (4) має вигляд:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + b\omega_n^2 \omega_*^2}{\beta_{\partial} (\omega_0 - \omega_n \omega_*)}}, \quad (5)$$

де $\omega_* = \omega/\omega_n$ – кутова швидкість у відносних одиницях.

Як впливає із виразу (5), кутова швидкість сепаратора молока при відхиленні напруги змінюється за складним алгоритмом.

У сепараторів молока продуктивність залежить від квадрата кутової швидкості:

$$Q = d^2 \omega^2 z \operatorname{tg} \alpha (R_o^2 - R_m^2) (\rho_n - \rho_{жс}) \eta_c / (8,6 \eta_n), \quad (6)$$

де Q – продуктивність, кг/с; d – діаметр кульки жиру, м; ω – кутова швидкість, с⁻¹; z – кількість міжтарілочних просторів у барабані; α – кут нахилу тарілки до горизонталі; R – радіус обертання, м; ρ_n – густина плазми, кг/м³; $\rho_{жс}$ – густина жиру, кг/м³; η_c – ККД сепаратора; η_n – динамічна в'язкість плазми.

Звідси випливає, що продуктивність сепараторів молока

$$Q_* = \omega_*^2. \quad (7)$$

Тоді закон зміни продуктивності сепаратора молока при зміні напруги запишеться у вигляді:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + b\omega_n^2 Q_*}{\beta_{\partial} (\omega_0 - \omega_n \sqrt{Q_*})}}. \quad (8)$$

Проведені експериментальні дослідження зміни продуктивності і моменту статичних опорів сепаратора молока СОМ-3-1000М при зміні напруги показали, що із її підвищенням продуктивність і момент статичних опорів молочного сепаратора непрямолінійно зростають (рис.1).

Відхилення напруги впливає на перехідні процеси в електроприводі сепаратора молока. Експериментальні криві перехідного процесу $n=f(t)$ пуску сепаратора молока СОМ-3-1000М при номінальній і зниженій у $\sqrt{3}$

раз напрузі показані на рис. 2. Як впливає із наведених залежностей, зниження напруги викликає несуттєве зниження частоти обертання, але значно збільшує час пуску, що призводить до перегрівання двигуна. U_*

Відхилення напруги викликає зміну енергетичних характеристик сепаратора молока, однією з яких є питома витрата електроенергії, кВт·год/кг, яка визначається як:

$$q = P_1 / Q, \quad (9)$$

де P_1 – потужність, споживана електродвигуном з мережі, кВт.

У відносних одиницях вираз (9) має вигляд:

$$q_* = \frac{P_2 + \Delta P_c + \Delta P_v}{P_{2H} + \Delta P_{cH} + \Delta P_{vH}} \cdot \frac{Q_H}{Q} = \frac{P_2 + \Delta P_{vH}(\alpha + \Delta P_v / \Delta P_{vH})}{P_{2H} + \Delta P_{vH}(\alpha + 1)} \cdot \frac{Q_H}{Q}, \quad (10)$$

де P_{2H} і P_2 – відповідно потужність на валу двигуна при номінальній і відмінній від номінальної напрузі; ΔP_{cH} і ΔP_c – постійні втрати; ΔP_{vH} і ΔP_v – змінні втрати; α – коефіцієнт втрат.

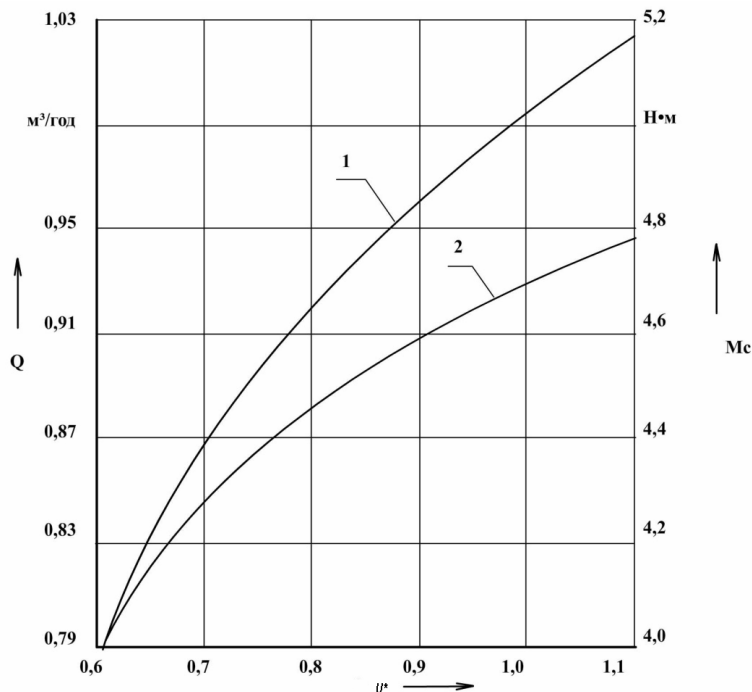


Рис.1. Залежності продуктивності (1) і моменту статичних опорів (2) сепаратора молока COM-3-1000M від напруги

Якщо знехтувати механічними втратами і втратами в сталі ротора, то постійні втрати потужності при відхиленні напруги

$$\Delta P_c = \Delta P_{cH} U_*^2. \quad (11)$$

Змінні втрати потужності в асинхронному двигуні визначаються за формулою [1]:

$$\Delta P_v = \Delta P_{v2} + \Delta P_{v1} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) M_o \omega_o s, \quad (12)$$

де ΔP_{v2} , ΔP_{v1} – змінні втрати потужності в колах ротора і статора, Вт;
 R_1 – активний опір обмотки ротора, Ом; R'_2 – опір обмотки ротора, зведений до обмотки статора, Ом; M_δ – момент двигуна, Н·м; ω_0 – синхронна кутова швидкість, с^{-1} ; s – ковзання двигуна.

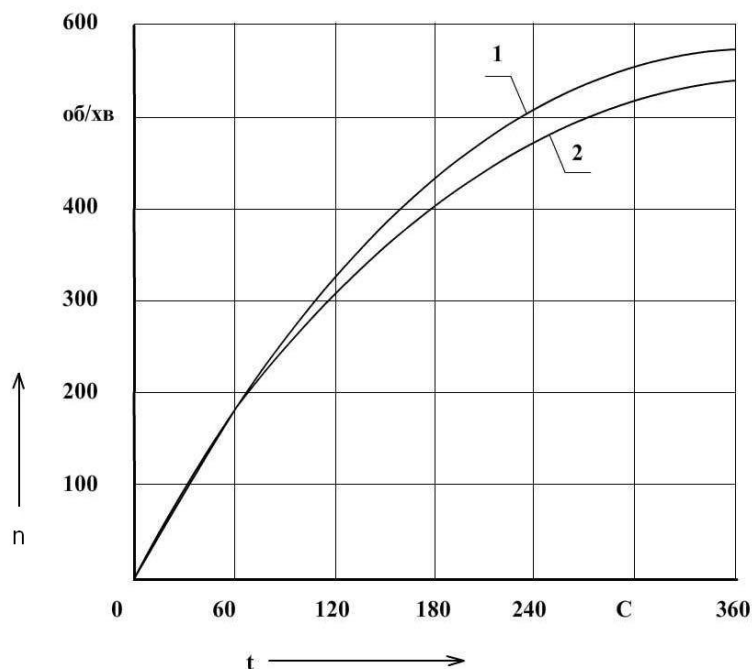


Рис. 2. Криві розгону сепаратора молока СОМ-3-1000М при номінальній (1) і зниженій у $\sqrt{3}$ раз напрузі (2)

Якщо знехтувати початковим моментом сепаратора, то згідно з формулою (1):

$$\beta_\delta U_*^2 (\omega_0 - \omega) = M_{сн} \omega_*^2 = K_3 \beta_\delta (\omega_0 - \omega_n) \omega_*^2, \quad (13)$$

де K_3 – коефіцієнт завантаження двигуна; ω_n – номінальна кутова швидкість двигуна, с^{-1} .

Тоді

$$s = \frac{K_3 s_n \omega_*^2}{U_*^2}. \quad (14)$$

Змінні втрати потужності з урахуванням (1) і (14) можна записати у вигляді:

$$\Delta P_v = \left(1 + \frac{R_1}{R'_2}\right) \beta_\delta U_*^2 \omega_0^2 s^2 = \left(1 + \frac{R_1}{R'_2}\right) \frac{\beta_\delta \omega_0^2 K_3^2 s_n^2 \omega_*^4}{U_*^4}, \quad (15)$$

або

$$\Delta P_v = \Delta P_{vн} \omega_*^4 / U_*^4, \quad (16)$$

де $\Delta P_{vн}$ – змінні втрати потужності при номінальній напрузі.

Розділивши чисельник і знаменник виразу (10) на $P_{2н}$ та враховуючи те, що

$$P_2 / P_{2н} = M_{сн} \omega_*^2 \omega / M_{сн} \omega_n = \omega_*^3, \quad (17)$$

$$\Delta P_n = P_{2n} \frac{1-\eta_n}{\eta_n} = \Delta P_{vн} (\alpha + 1), \quad (18)$$

де η_n – ККД двигуна при номінальній напрузі, отримаємо

$$q_* = \frac{\omega_*^3 + \frac{1-\eta_n}{\eta_n} \cdot \frac{(\alpha U_*^2 + \omega_*^4 / U_*^4)}{(\alpha + 1)}}{\omega_* \left(1 + \frac{1-\eta_n}{\eta_n} \right)} = \eta_n \omega_*^2 + \frac{1-\eta_n}{(\alpha + 1)} \cdot \frac{(\alpha U_*^2 + \omega_*^4 / U_*^4)}{\omega_*}. \quad (19)$$

Таким чином, зниження напруги викликає зростання питомої витрати електроенергії у сепараторів молока, а її підвищення – невелике зниження (рис. 3).

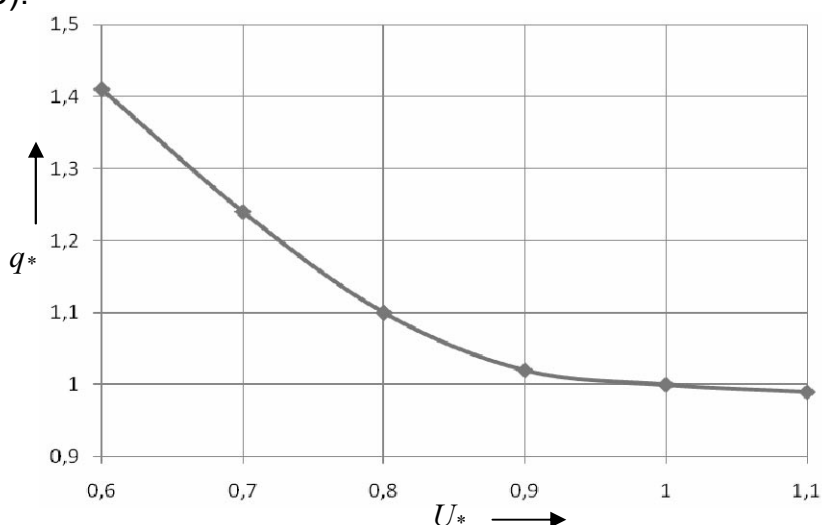


Рис. 3. Залежність питомої витрати електроенергії від напруги для сепараторів молока

Висновки

На основі проведених досліджень встановлено, що при зниженні напруги на 20 % кутова швидкість барабана знижується на 4 %, продуктивність сепаратора молока – до 9 %, а питома витрата електроенергії зростає на 10 %.

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. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / [Жулай Є.Л., Зайцев Б.В., Лавріненко Ю.М та ін.]; за ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.
3. Перова М.Б. Качество сельского электроснабжения: комплексный подход / Перова М.Б. – Вологда: Вологодский гос. техн. ун–т, 1999. – 72 с.

Проведено дослідження впливу відхилення напруги на технологічні та енергетичні характеристики сепараторів молока. Встановлено залежності продуктивності сепаратора молока та удільних витрат електроенергії від напруги.

Сепаратор молока, отклонение напряжения, электропривод, производительность, удельные затраты электроэнергии.

A study of the voltage deviation on the technological and energy characteristics of milk separators are carried out. The dependences of productivity and the unit cost of electricity of the milk separator from the voltage are established.

Milk separator, voltage deviation, electric drive, productivity e, unit cost of electricity.

УДК 004.6

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОЇ ПЛАТФОРМИ E-XTENSION В УКРАЇНІ

О.М. Ткаченко, кандидат технічних наук

Розглянуто особливості архітектури та управління проектом створення системи електронного консультування в аграрній сфері e-Xtension в Україні.

Інформаційна система, архітектура, управління проектом, електронне консультування, e-Xtension.

Одним із перспективних напрямів інформатизації аграрного сектору України є створення мережі інформаційних ресурсів, які спрямовані на різних учасників аграрного бізнесу. Національний університет біоресурсів і природокористування України ініціював створення електронної системи консультування для сільськогосподарського сектору України [1, 3]. Одним із зразків серед вже існуючих аналогічних систем була взята система e-Xtension, яка успішно працює в США.

Завданням українського проекту є створення програмної платформи для системи e-Xtension з доступом через Інтернет, у тому числі з мобільних пристроїв, яка надає консультації з усього спектра питань, що стосуються сільськогосподарського виробництва, шляхом створення інформаційних ресурсів для всіх учасників, авторизованого доступу до сховищ даних, інтелектуальних розрахункових модулів, інформаційних послуг тощо.

Мета досліджень – огляд проблематики побудови програмної платформи для Web-орієнтованої системи аграрного консультування e-Xtension, у т.ч. опис загальної архітектури, рівнів доступу до ресурсів, особливостей управління проектом.

Матеріали та методика досліджень. Методологічною основою створення програмної платформи є серія стандартів щодо розробки програмних продуктів, а на етапі імплементації – стандарти на програмний інструментарій: ДСТУ ISO/IEC 15288:2005 "Інформаційні технології. Про-

Сепаратор молока, отклонение напряжения, электропривод, производительность, удельные затраты электроэнергии.

A study of the voltage deviation on the technological and energy characteristics of milk separators are carried out. The dependences of productivity and the unit cost of electricity of the milk separator from the voltage are established.

Milk separator, voltage deviation, electric drive, productivity e, unit cost of electricity.

УДК 004.6

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОЇ ПЛАТФОРМИ E-XTENSION В УКРАЇНІ

О.М. Ткаченко, кандидат технічних наук

Розглянуто особливості архітектури та управління проектом створення системи електронного консультування в аграрній сфері e-Xtension в Україні.

Інформаційна система, архітектура, управління проектом, електронне консультування, e-Xtension.

Одним із перспективних напрямів інформатизації аграрного сектору України є створення мережі інформаційних ресурсів, які спрямовані на різних учасників аграрного бізнесу. Національний університет біоресурсів і природокористування України ініціював створення електронної системи консультування для сільськогосподарського сектору України [1, 3]. Одним із зразків серед вже існуючих аналогічних систем була взята система e-Xtension, яка успішно працює в США.

Завданням українського проекту є створення програмної платформи для системи e-Xtension з доступом через Інтернет, у тому числі з мобільних пристроїв, яка надає консультації з усього спектра питань, що стосуються сільськогосподарського виробництва, шляхом створення інформаційних ресурсів для всіх учасників, авторизованого доступу до сховищ даних, інтелектуальних розрахункових модулів, інформаційних послуг тощо.

Мета досліджень – огляд проблематики побудови програмної платформи для Web-орієнтованої системи аграрного консультування e-Xtension, у т.ч. опис загальної архітектури, рівнів доступу до ресурсів, особливостей управління проектом.

Матеріали та методика досліджень. Методологічною основою створення програмної платформи є серія стандартів щодо розробки програмних продуктів, а на етапі імплементації – стандарти на програмний інструментарій: ДСТУ ISO/IEC 15288:2005 "Інформаційні технології. Про-

цеси 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.

Електронне дорадництво в усіх сучасних формах має витoki в традиційних (докомп'ютерних) системах (таблиця).

Порівняння особливостей систем електронного консультування у США, Китаї та Філіппінах

Показник	Країна		
	Філіппіни	Китай	США
Витоки	Розпочато з 2007 р. коли запущено перший компонент – підсистему електронного навчання	Розпочато з 1998 р.	Веде історію з 1860 р.
Загальна інформація	Максимальне використання ІКТ для інтерактивних комунікацій	Використання доставки на замовлення, апробація нових бізнес-моделей, ринків	83 офіси e-Xtension у штаті Небраска, обслуговує 93 округи в державі
Особливості	Контакт-центр для фермерів з підтримкою електронного навчання, співпраця з державними установами, університетами, громадськими організаціями	Інноваційні підходи щодо стимулювання продуктивності і партнерства агросектору, політика підтримки на національному та місцевому рівнях	Виробництво та опіка у рослинництві і тваринництві, сприяння молоді, Сприяння розвитку підприємництва на місцевому рівні, дистанційна освіта
Визнання	У 2010 р. країна була серед 10 найпрогресивніших у розвитку e-Xtension	Охоплює більше 1800 округів у Китаї (понад 60% сільського населення). Краща практика (згідно з оцінкою ООН) щодо скорочення бідності	Центр e-Xtension університету штату Небраска є найуспішнішим серед аналогічних

Цільовими групами вітчизняної системи є: сільськогосподарські виробники та інші учасники аграрного бізнесу, наукові та освітні установи, викладачі і студенти, консультанти, державні та приватні дорадчі служби, сільськогосподарські асоціації, органи місцевого самоврядування, сільське населення тощо.

Українська модель системи має кілька особливостей:

- диференційований доступ до інформації та послуг на різних рівнях;

- наявність бази даних контенту та інтелектуальних розрахункових модулів;
- підсистема онлайн-консультування ("запитай експерта");
- засоби організації спільнот за тематичними напрямками;
- засоби структурованого зв'язку між користувачами;
- наявність підсистеми електронного навчання та підвищення кваліфікації;
- використання потенціалу університету щодо реалізації концепції системи.

Розробка системної архітектури платформи e-Xtension орієнтуються на шестикроковий підхід, який широко застосовується в багатьох ІТ-компаніях, зокрема, IBM, та є загальноприйнятим [2].

Buy-in: отримання підтримки на рівні керівництва та державних структур, які забезпечують фінансування проекту.

Design: опис вимог, специфікацій, опис сценаріїв поведінки користувачів та тематичних спільнот, моделювання і проектування.

Implement: розробка і впровадження системи, перевірка її роботи, документування тощо.

Marketing: запуск маркетингової кампанії з поширення інформації про систему.

Fine-tune & Scale: створення та утримання цільових груп користувачів, використання їх бачення розвитку системи, побажань.

Maintain: супровід і підтримка розробленої системи, забезпечення оновлень програмного коду і контенту, команда підтримки має працювати на постійній основі.

Враховуючи, що проект позиціонується в галузі ІКТ, його ІТ-складова зосереджена на технологічних етапах (рис.1).

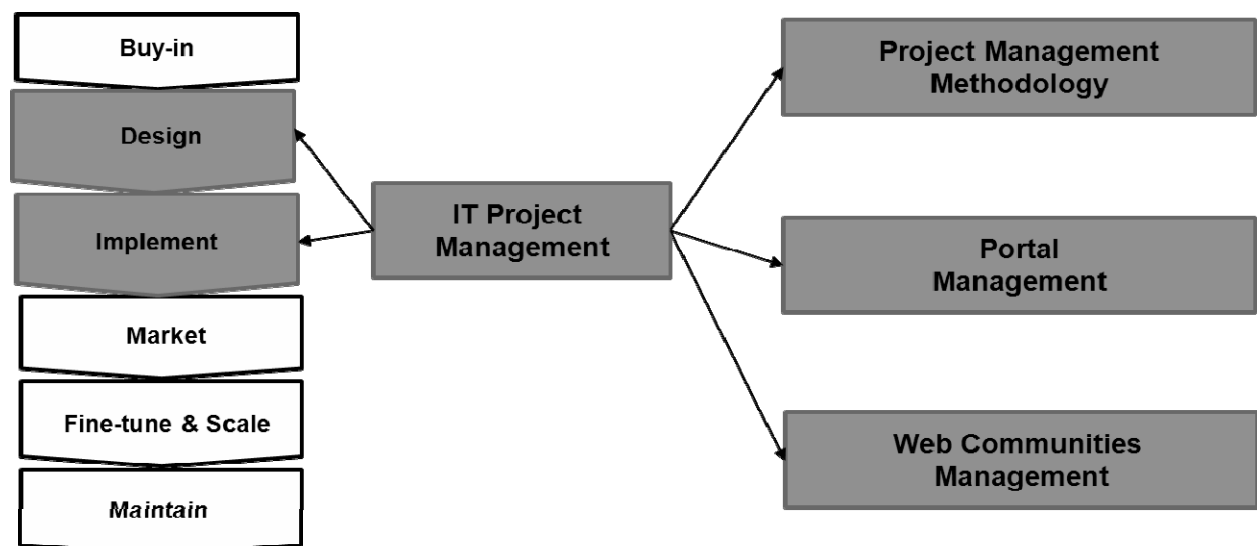


Рис. 1. Управління ІТ-проектом створення платформи e-Xtension

Архітектурно програмна платформа e-Xtension є багаторівневою, включає Web-прошарок (рис. 2).

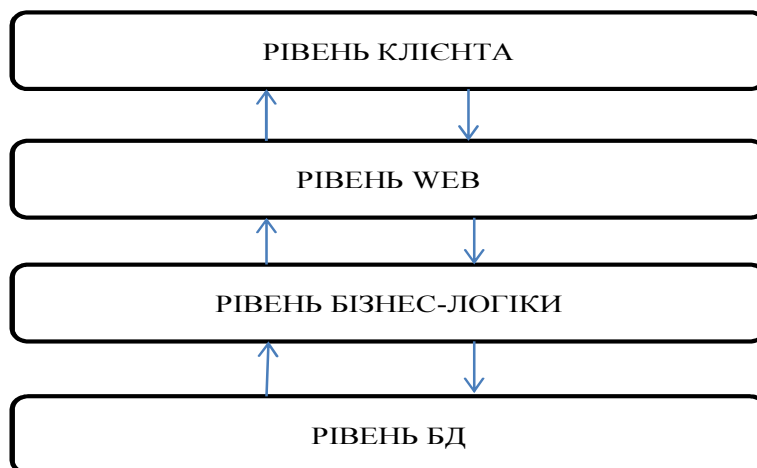


Рис. 2. Багаторівнева архітектура програмної платформи e-Xtension

Бізнес-архітектура системи передбачає різнорівневий доступ до даних і сервісів для різних категорій користувачів (рис. 3). Так, найглибший доступ до даних і сервісів матимуть зареєстровані користувачі, які мають доступ до системи на умовах підписки. Водночас, передбачено і гостьовий доступ до значної частини довідкових та навчальних матеріалів.

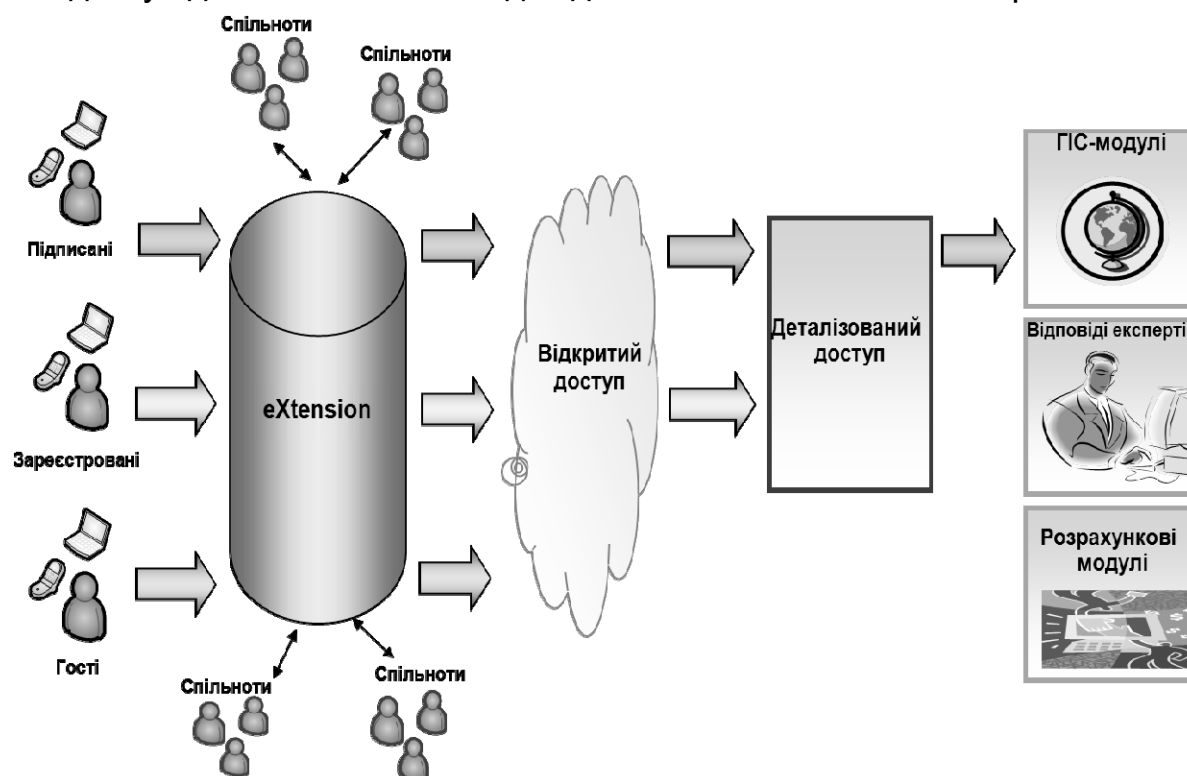


Рис. 3. Бізнес-архітектура системи e-Xtension

Враховуючи тенденції перенесення персональних обчислень на мобільні пристрої, система повинна містити відповідні модулі.

Результати досліджень. Визначено особливості вітчизняної системи e-Xtension, порівняно з аналогічними системами в інших країнах. Ці

особливості стосуються переважно функціонала для користувача. При розробці архітектури запропоновано враховувати Web-орієнтованість та диференціацію доступу до сервісів системи, а також притримуватися загальноприйнятого шестикрокового підходу. ІТ-складова управління проектом створення програмної платформи e-Xtension обумовлює визначальність кроків проектування та імплементації і включає складові: методологію управління, управління порталом, управління діяльністю тематичних спільнот користувачів.

Висновки

Системи електронного консультування в останні роки впроваджені в різних країнах світу, їх ефективність різна і залежить загалом від місцевої специфіки, насамперед – від державної політики і технологічного рівня розвитку аграрного сектору. Ці системи об'єднує просвітницька спрямованість, що відображено в підсистемах комунікацій на горизонтальному рівні, на рівні "клієнт–консультант", а також в модулях електронного навчання.

Специфікою української системи e-Xtension має стати також наявність розрахункових та ГІС-компонентів, які підвищують рівень її самодостатності.

Список літератури

1. Cotton D., Tkachenko O. e-Xtetension System in Ukraine: Features, Challenges and Prospects // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. "Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні '2013", м. Київ, 13-14 червня 2013. – К.: "Аграр Медіа Груп", 2013. – 186 с.
2. Соммервилл И. Инженерия программного обеспечения / И.Соммервилл; пер. с англ. – [6-е издание].– М.: "Издательский дом "Вильямс", 2002. – 624 с.
3. Ткаченко О.М. Інформаційно-аналітична система підтримки прийняття рішень у рослинництві як складова системи електронного дорадництва / О.М. Ткаченко. // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2012. – №10. – С.189-198.

Рассмотрены особенности архитектуры и управления проектом создания системы электронного консультирования в аграрной сфере e-Xtension в Украине.

Інформаційна система, архітектура, управління проектом, електронне консультування, e-Xtension.

The features of architecture and project management of creating an e-Xtension system of E-consultancy in agriculture in Ukraine are considered.

Information system, architecture, project management, e-consulting, e-Xtension.

РОЗРАХУНОК ДОДАТКОВИХ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В БАГАТОШАРОВИХ ОБМОТКАХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ІНДУКТОРІВ

А.О. Березюк, аспірант*

І.П. Кондратенко, доктор технічних наук

На основі чисельного методу скінченних елементів розроблено методику розрахунку додаткових втрат потужності в багат шарових обмотках індукторів з урахуванням нерівномірного розподілу компонент електромагнітного поля вздовж намотки індуктора.

Циліндричний індуктор, додаткові втрати потужності, багат шарова обмотка.

Ефективність роботи пристроїв індукційного нагріву, в основному, визначається величиною його коефіцієнта корисної дії (ККД). ККД пристроїв індукційного нагріву визначається електрофізичними властивостями та геометричними розмірами завантаження та індуктора, а саме: довжиною намотки, числом шарів, кількістю витків у шарі, зазором між витками, конфігурацією індукуючого проводу. ККД розраховується як відношення потужності, що передано в завантаження (корисної потужності) до повної потужності, яка складається з корисної потужності та потужності втрат в обмотках.

Останнє стосується лише електричного ККД. Повний ККД пристроїв індукційного нагріву також повинен включати втрати, що пов'язані з теплопередачею тепла від нагрітого завантаження на елементи конструкції індуктора та навколишнє середовище. Тут буде розглядатися лише електричний ККД, проте автори добре усвідомлюють, що повний ККД індукуючого пристрою залишається пріоритетною величиною і вибір геометричних розмірів індуктора є також оптимізаційною задачею відносно вибору товщини теплоізоляційного шару.

Тим не менше, досвід створення пристроїв індукційного нагріву, особливо таких, що передбачають нагрів до температури, за якої промисла складова теплообміну не є визначальною, показує, що ККД, перш за все, визначається втратами в обмотці індуктора.

Таким чином, зниження електричних втрат в обмотці індуктора є найдоцільнішим способом підвищення ефективності роботи пристроїв індукційного нагріву.

Мета досліджень – розробка чисельної методики розрахунку додаткових втрат потужності в багат шарових обмотках індукторів з урахуванням нерівномірного розподілу електромагнітного поля вздовж намотки індуктора.

*Науковий керівник – доктор технічних наук І.П. Кондратенко

© А.О. Березюк, І.П. Кондратенко, 2013

Матеріали та методика досліджень. Відомо, що в багатошарових обмотках індукційних установок окремі шари піддаються дії різного за величиною електромагнітного поля, що призводить до збільшення електричних втрат у внутрішніх шарах обмотки (за рахунок виникнення в них вихрових струмів) [4]. Тому, до визначення додаткових втрат потужності, як в окремих витках, так і в обмотці в цілому, необхідно підходити з урахуванням особливостей розподілу електромагнітного поля в навколишньому середовищі і, звідси, конструктивних особливостей індуктора. Зрозуміло, що ці особливості стосуються взаємної просторової орієнтації векторів напруженості змінного магнітного поля і характерних розмірів провідників обмотки індуктора.

Нижче розглянемо застосування чисельного методу скінченних елементів для обчислення додаткових втрат потужності в обмотці, який враховує особливості просторового розподілу електромагнітного поля достатньо довгого багатошарового індуктора.

Розглянемо багатошаровий циліндричний індуктор (рис. 1), довжина якого втричі перевищує його діаметр. За таких умов поле в середині індуктора розподілено рівномірно [1], що дозволяє забезпечити рівномірний нагрів завантаження. Завантаженням індуктора є феромагнітна труба.

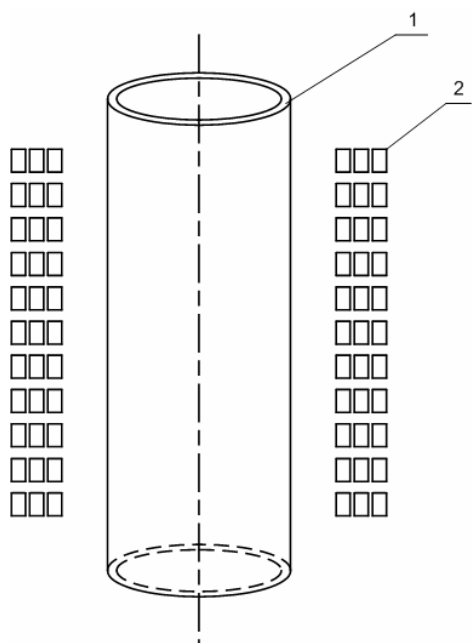


Рис. 1. Схема досліджуваної індукційної установки:

1 – завантаження індуктора;
2 – багатошарова обмотка

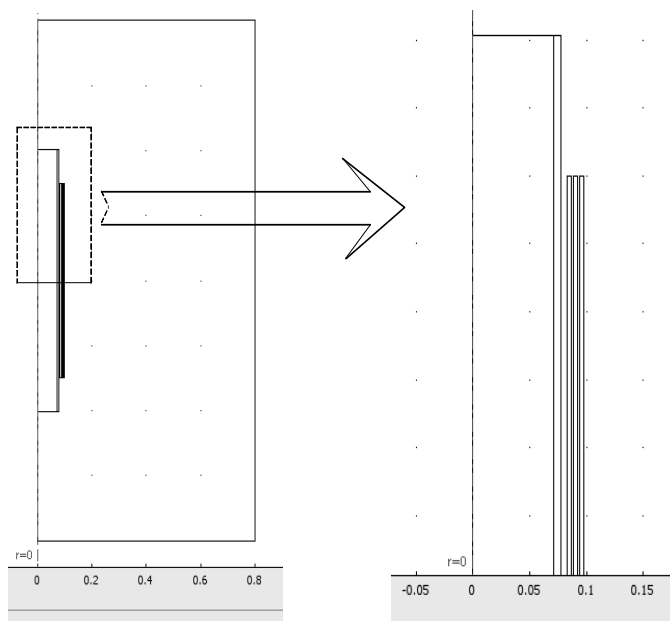


Рис. 2. Розрахункова модель багатошарового циліндричного індуктора з завантаженням у вигляді феромагнітної труби

Виконаємо моделювання електромагнітного поля для такої електромагнітної системи при збереженні рівномірного розподілу електромагнітного поля в середині індуктора. Таким чином, моделювання проводити-

меться для індуктора з такими геометричними розмірами: довжина індуктора (струмової області) $a = 0,6 \text{ м}$; висота кожного шару обмотки (витка) $h = 0,0035 \text{ м}$; кількість шарів обмотки $n = 3$; внутрішній діаметр індуктора $d = 0,165 \text{ м}$; зовнішній діаметр труби $d = 0,155 \text{ м}$, внутрішній діаметр труби $d = 0,143 \text{ м}$. Електрофізичні параметри завантаження: питома електропровідність $\sigma = 9,15 \cdot 10^6 \text{ См/м}$; магнітна проникність феромагнітного завантаження описувалася залежністю:

$$\mu = \frac{830}{1 + 0,025 B_z^9}. \quad (1)$$

Густина струму в обмотках визначалася за рекомендованою для електричних машин величиною струму в провідниках. Нехай густина струму в провіднику становитиме $2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Багатошарова (тришарова) обмотка індуктора в програмному середовищі Comsol задавалася окремими струмовими областями з нульовою електропровідністю. Густина струму в кожній області є однаковою, а області відокремлені одна від одної електроізоляційними шарами. Розрахункова модель такого індуктора наведена на рис. 2.

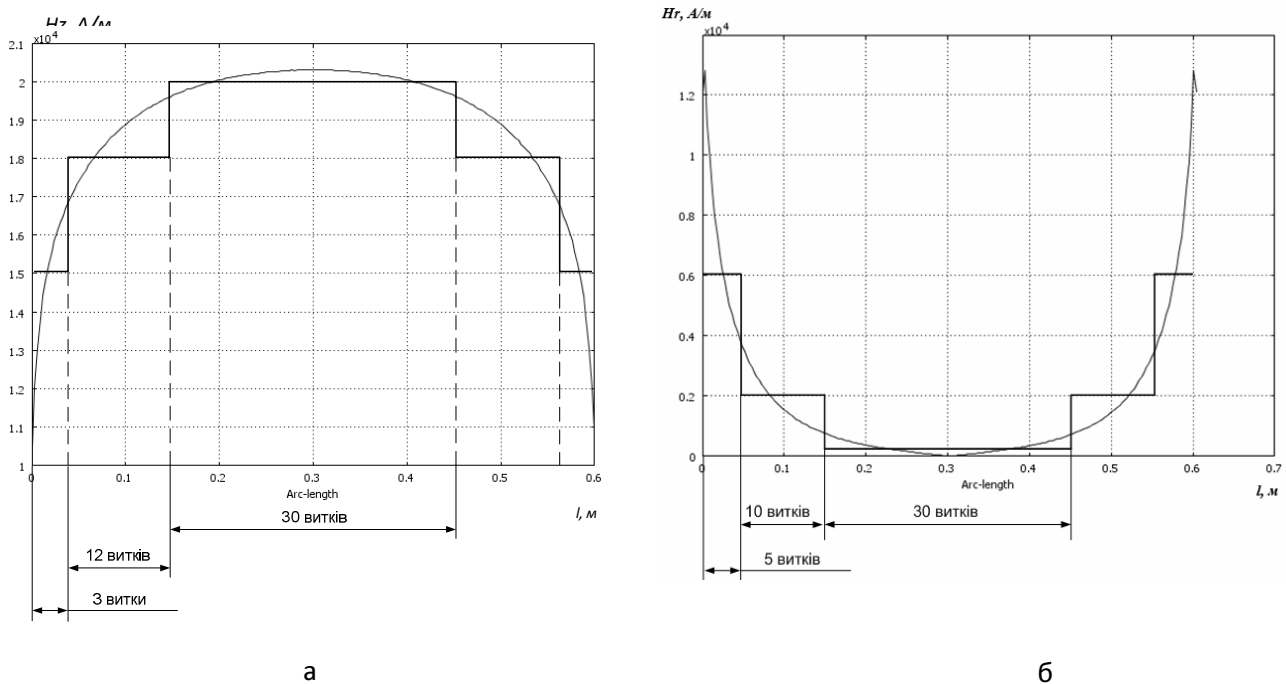


Рис. 3. Поділ струмової області на зони з постійною величиною напруженості магнітного поля у внутрішньому шарі:
а – z-складової; б – r-складової

Для коректного розв'язку електромагнітної задачі на границях розподілення областей задавалися такі умови:

- умова азимутальної симетрії відносно осі, $r = 0$;
- умова магнітної ізоляції на зовнішніх границях, $A_\varphi = 0$;

– на всіх інших границях автоматично присвоюється умова неперервності (на границях обмотки і стержня), $n(H_1 - H_2) = 0$, де H – напруженість магнітного поля, A/m ; n – вектор зовнішньої нормалі.

Таким чином, для кожного з шарів обмотки в осьовій зоні був визначений розподіл r - та z -складових напруженості магнітного поля H . За результатами розподілу складових напруженості магнітного поля струмова область кожного шару обмотки була поділена на зони, в яких величини напруженості магнітного поля приймалися сталими (рис.3). Тому подальший розв'язок задачі зводиться до знаходження втрат потужності в одиничному витку та подальшим поширенням розв'язку на інші витки відповідних зон.

Таким чином, виокремивши в кожній зоні одиничний виток (рис. 4) з відповідними електрофізичними властивостями (питома електропровідність $\sigma = 5 \cdot 10^7 \text{ См/м}$), під дією попередньо визначеної величини r - та z -складових напруженості магнітного поля в кожній зоні (див. рис. 3), за допомогою засобів інтегрування за радіусом у осесиметричній постановці (вбудованих у пакеті Comsol), можна знайти втрати потужності в ньому.

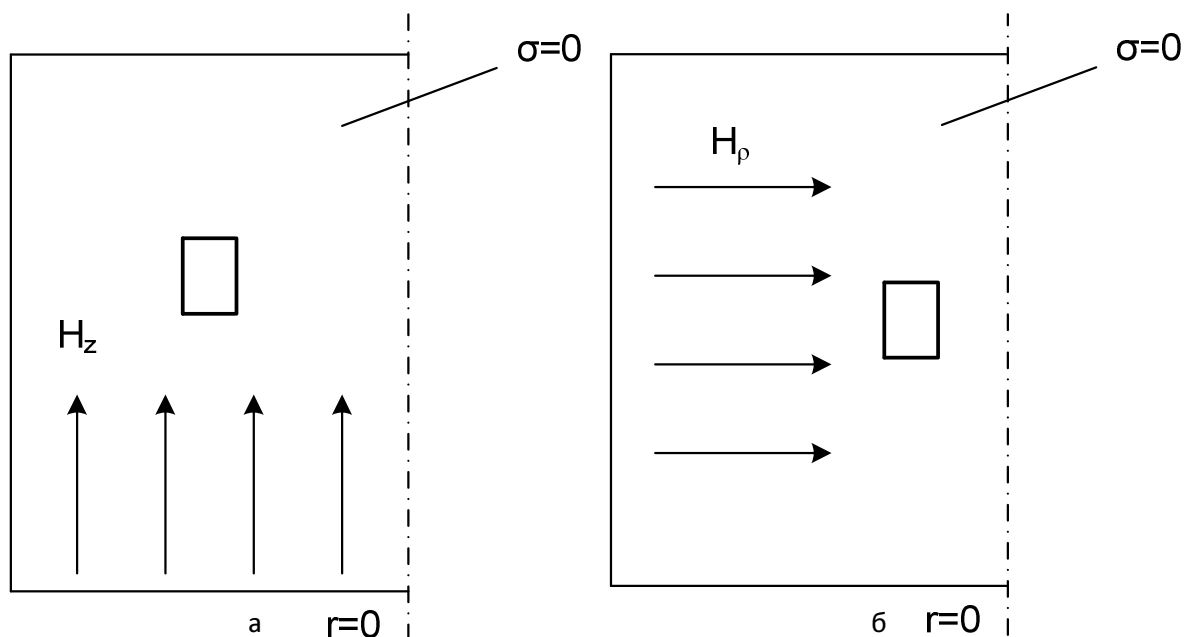


Рис.4. Виділення одиничного витка індуктора в сторонньому магнітному полі:

- а – при дії на виток r -складової напруженості магнітного поля;
б – при дії на виток z -складової напруженості магнітного поля

Для цієї задачі на межах розподілення областей задавались такі граничні умови:

- умова азимутальної симетрії відносно осі, $r = 0$;
- умова магнітної ізоляції на бокових границях, $A_\phi = 0$;
- на зовнішній границі розрахункової області задавалась умова $H_\phi = H$, де H – напруженість магнітного поля відповідної зони;

– на границях провідника автоматично присвоюється умова неперервності $n(H_1 - H_2) = 0$.

Отже, знаючи кількість витків у кожній зоні, можна знайти додаткові втрати потужності як у кожному шарі, так і в обмотці у цілому.

Результати досліджень. Таким чином, вирішивши таку комбіновану задачу, можна розрахувати додаткові втрати потужності в обмотках циліндричного індуктора з врахуванням неоднорідності розподілу ρ - та z -складових напруженості магнітного поля вздовж намотки індуктора.

Також були проведені дослідження для інших геометричних параметрів завантаження (змінювався діаметр труби та товщина стінки труби) при незмінній величині густини струму в обмотках. Встановлено, що втрати в обмотках багат шарового індуктора (в нашому випадку тришарового) не залежать від геометрії завантаження.

При порівнянні результатів чисельного моделювання з відомими виразами розрахунку додаткових втрат потужності в обмотках, наприклад трансформаторів [3] чи електричних двигунів [2], які характеризуються досить великим значенням магнітної проникності (завдяки феромагнітному осерддю), значення коефіцієнта додаткових втрат у багат шаровій обмотці індуктора, розрахованого чисельним методом, значно відрізнялося. Так, при розрахунку втрат в обмотці запропонованим чисельним методом коефіцієнт додаткових втрат становив 1,028, а коефіцієнт додаткових втрат, розрахований за виразом для трансформаторів:

$$k_d = 1 + g\beta^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 a^4 (n^2 - 0,2), \quad (2)$$

становив 1,0045. У формулі (2) $g = 1,73$ – емпіричний коефіцієнт; a – розмір провідника, перпендикулярний напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання, см; n – число провідників обмотки в напрямку, перпендикулярному напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання; ρ – питома густина матеріалу проводу, кг/м^3 .

Таку розбіжність результатів можна пояснити більш нерівномірним розподілом магнітного поля вздовж намотки індуктора у порівнянні з трансформатором, для якого характерна наявність феромагнітного осердя.

Для багат шарового циліндричного індуктора, геометричні параметри якого наведено вище, за допомогою вимірювального приладу RLC-метр серії BR2876 було проведено експериментальне дослідження щодо визначення електричного опору обмотки на частоті 50 Гц.

Встановлено, що експериментальна величина активного опору обмотки індуктора, визначена на частоті 50 Гц, становить 0,102 Ом, значення якої збігається з розрахованим за розробленою методикою визначення додаткових втрат.

Висновки

1. Запропоновано методику розрахунку додаткових втрат потужності в багат шарових обмотках циліндричних індукторів, в основу якої покладено чисельне моделювання процесу індукційного нагріву в об'ємі всієї установки та визначення розподілу складових електромагнітного по-

ля вздовж намотки багат шарового індуктора, що дозволяє визначити електрофізичні умови, в яких знаходяться витки обмотки;

2. Запропонований підхід дозволяє визначити додаткові втрати потужності в окремих групах провідників та в багат шаровій обмотці в цілому, і тим самим підвищити точність розрахунку енергетичних характеристик циліндричних індукторів.

Список літератури

1. Кондратенко І.П. Дослідження розподілу температури в завантаженні циліндричного індуктора / І.П. Кондратенко, В.П. Лисенко, Д.С. Комарчук // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК» – К., 2012. – Вип. 184, ч.1. – С.74 – 82.

2. Постников И.М. Проектирование электрических машин / И.М. Постников. – К.: Госэнергоиздат, 1960. – 910 с.

3. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: [учеб. пособие для вузов.] / П.М. Тихомиров. – [4-е изд., перераб. и доп.] – М.: Энергия, 1976. – 544 с.

4. Установки индукционного нагрева: [учеб. пособие для вузов; под ред. А.Е.Слухоцкого] / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.Б. Бамунэр. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.

На основе численного метода конечных элементов разработана методика расчета дополнительных потерь мощности в многослойных обмотках индукторов с учетом неравномерного распределения компонент электромагнитного поля вдоль намотки индуктора.

Цилиндрический индуктор, дополнительные потери мощности, многослойная обмотка.

On the basis of the numerical finite element method the method of calculation of additional power losses in the windings of the multilayer inductors with the uneven distribution of components of the electromagnetic field along the winding inductor has been developed.

Cylindrical inductor, additional power losses, multilayer winding.

УДК 631.22

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТЕПЛИЦЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАКУУМНИХ ГЕЛІОКОЛЕКТОРІВ

В.О. Лазоренко, кандидат технічних наук

Викладено результати вдосконалення системи теплопостачання теплиць з використанням традиційних джерел енергії та вакуумних геліоколекторів, а також результати дослідження її енергоефективності з використанням теплозахисних екранів і штори. Визначено коефіцієнт заміщення теплового навантаження.

© В.О. Лазоренко, 2013

ля вздовж намотки багат шарового індуктора, що дозволяє визначити електрофізичні умови, в яких знаходяться витки обмотки;

2. Запропонований підхід дозволяє визначити додаткові втрати потужності в окремих групах провідників та в багат шаровій обмотці в цілому, і тим самим підвищити точність розрахунку енергетичних характеристик циліндричних індукторів.

Список літератури

1. Кондратенко І.П. Дослідження розподілу температури в завантаженні циліндричного індуктора / І.П. Кондратенко, В.П. Лисенко, Д.С. Комарчук // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК» – К., 2012. – Вип. 184, ч.1. – С.74 – 82.

2. Постников И.М. Проектирование электрических машин / И.М. Постников. – К.: Госэнергоиздат, 1960. – 910 с.

3. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: [учеб. пособие для вузов.] / П.М. Тихомиров. – [4-е изд., перераб. и доп.] – М.: Энергия, 1976. – 544 с.

4. Установки индукционного нагрева: [учеб. пособие для вузов; под ред. А.Е.Слухоцкого] / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.Б. Бамунэр . – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.

На основе численного метода конечных элементов разработана методика расчета дополнительных потерь мощности в многослойных обмотках индукторов с учетом неравномерного распределения компонент электромагнитного поля вдоль намотки индуктора.

Цилиндрический индуктор, дополнительные потери мощности, многослойная обмотка.

On the basis of the numerical finite element method the method of calculation of additional power losses in the windings of the multilayer inductors with the uneven distribution of components of the electromagnetic field along the winding inductor has been developed.

Cylindrical inductor, additional power losses, multilayer winding.

УДК 631.22

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТЕПЛИЦЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАКУУМНИХ ГЕЛІОКОЛЕКТОРІВ

В.О. Лазоренко, кандидат технічних наук

Викладено результати вдосконалення системи теплопостачання теплиць з використанням традиційних джерел енергії та вакуумних геліоколекторів, а також результати дослідження її енергоефективності з використанням теплозахисних екранів і штори. Визначено коефіцієнт заміщення теплового навантаження.

© В.О. Лазоренко, 2013

Теплиця, вакуумний геліоколектор, теплопостачання, термічний опір, енергоефективність, коефіцієнт заміщення теплового навантаження, штора.

Головна проблема виробництва несезонних овочів – висока собівартість внаслідок значних витрат на енергоресурси. У структурі собівартості овочевої продукції закритого ґрунту питома вага енерговитрат досягає 60 %.

У період підвищення цін на енергоносії та їх непрогнозованого коливання особливо актуальним стає питання енергозбереження, яке включає в себе багато факторів, що дозволяють зменшити енерговитрати і тим самим зменшити їх долю у собівартості продукції сільськогосподарського виробництва.

При розробці сучасних технологій вирощування овочів виділяють кілька основних і допоміжних напрямів. Один з цих напрямів розглядає питання оптимізації роботи опалювально-вентиляційних систем у багатофакторному середовищі теплиць. Компромісним рішенням у цьому питанні може бути мінімізація витрат енергії при збереженні рівня прибутковості. Відповідно до норм технологічного проектування ОНТП-СХ10-81 системи інженерного забезпечення мікроклімату в теплицях повинні підтримувати температуру внутрішнього повітря від 15–18 до 26–30 °С, відносну вологість повітря від 60 до 95 %, температуру ґрунту — від 18 до 26 °С залежно від культури, що вирощується у спорудах захищеного ґрунту, і періоду її вегетації. Створити необхідну температуру (18–26 °С) на глибині 0,2–0,3 м, тобто в зоні розташування коренів, за рахунок внутрішнього теплового режиму споруди важко та економічно недоцільно, тому що це вимагало б підвищення температури повітря в теплиці і збільшення тепловтрат через огородження на 10–20 %.

При інтенсивному веденні землеробства в закритому ґрунті енерговитрати в декілька разів перевищують витрати при виробництві овочів у відкритому ґрунті. Дослідження [1,2] показали, що на витрачену одиницю зовнішньої енергії в закритому ґрунті забезпечується накопичення тільки 0,02 біологічної енергії. Отже, сучасне тепличне землеробство, яке є високоомеханізованим виробництвом, в енергетичному відношенні мало-ефективне. Теплотехнічне удосконалення культивацийних споруд проводиться нині за такими напрямками: покращення конструктивних рішень теплиць; створення більш ефективних у техніко-економічному відношенні систем обігріву; використання поновлюваних джерел енергії та вторинних енергоресурсів.

Пріоритетним напрямом, що визначає ефективність виробництва овочів закритого ґрунту в сучасних умовах, є активна енергозберігаюча політика підприємств на базі використання інтенсивних технологій вирощування овочевих культур. Цим визначається актуальність цієї теми дослідження.

Мета досліджень – вдосконалення системи теплопостачання теплиць з використанням традиційного водяного підігріву і поновлюваного –

шляхом застосування сонячних вакуумних колекторів та визначення її енергоефективності.

Матеріали та методика досліджень. Теплиці є одними з найбільших споживачів теплової енергії, тому доцільно зосередити зусилля на створенні енергоефективних систем, які не вимагають великих енергозатрат первинних паливно-енергетичних ресурсів і разом з тим можуть забезпечити теплом теплицю в холодну пору року. Доцільно використовувати сонячну енергію для підігрівання води за допомогою сонячних колекторів для технологічних та побутових потреб, а також для підігрівання теплоносія, що циркулює в системі водяного опалення та безпосереднього підігрівання середовища в спорудах захищеного ґрунту.

Налаштувати енергозберігаючу технологію їх виробництва з раціональним використанням теплоти під час комп'ютерного регулювання її витрат, що зумовлює створення надійного оптимального мікроклімату і, як наслідок, дає можливість збільшувати урожайність тепличних культур та підвищувати їх якість.

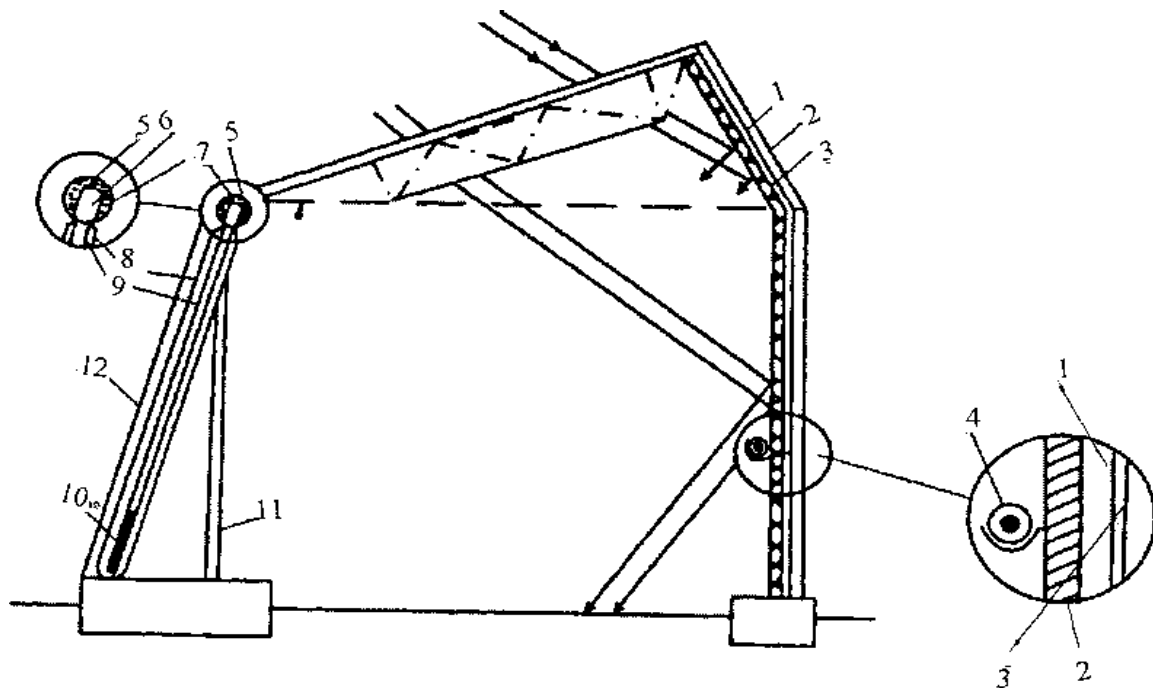
Відома теплиця [3] для вирощування розсади та тепличних культур у спорудах зі штучним кліматом. Часткове вирішення поставленого завдання досягається тим, що для ефективнішого використання сонячної енергії на південній вертикальній стороні огорожжуваних конструкцій до рівня підпокрівельної ферми встановлена геліосистема з вакуумними сонячними колекторами, з кутом нахилу відносно горизонту залежно від географічної широти місцевості, де встановлена геліосистема. Зовнішні труби сонячного колектора, виготовлені із зміцненого баросилікатного скла, є прозорими, тому сонячні промені через скло нагрівають внутрішні труби сонячного колектора, а також середовище в теплиці. Внутрішні труби виготовлені із матеріалу, що має високий коефіцієнт теплопровідності і покриті високоякісним селективним покриттям, яке забезпечує поглинання більше 90 % випромінювальної енергії сонця при мінімальному рівні рефлексії (відбивання). Ці труби заповнені частково нетоксичною органічною рідиною з температурою кипіння нижче мінус 30 °С. Між зовнішньою і внутрішньою трубами – вакуум, завдяки чому перенос теплоти конвекцією і теплопровідністю відсутній, а, отже, і втрати теплоти незалежно від температури навколишнього середовища незначні.

Недоліком відомої конструкції теплиці є те, що холодне повітря за рахунок інфільтрації проникає в теплицю через елементи з'єднань сонячних колекторів, що негативно впливає на температурний та вологісний режим у теплиці. До того ж має місце розсіяний радіаційний тепловий потік, що виникає за рахунок відбитого теплового випромінювання від теплозахисних екранів, ґрунту та інших поверхонь, спрямований у напрямку „із теплиці” через прозорі елементи вакуумних колекторів. Таким чином знижується ефективність роботи геліосистеми, що потребує додаткових затрат паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР).

Вдосконалення системи теплопостачання [4] забезпечує зменшення втрат теплоти, яка вже надійшла в теплицю за рахунок водяного опалення та сонячної радіації. Досягається це тим, що на південній вертикаль-

ній стороні огороджуючих конструкцій до рівня підпокрівельної ферми встановлена штора із світлопроникного, вітро – та вологозахисного шару, який пропускає теплове та оптичне випромінювання, з селективним покриттям на внутрішній поверхні, яке відбиває в теплицю інфрачервоне випромінювання, спрямоване „із теплиці”. При цьому утворюється тришарова огороджуюча конструкція: штора – шар повітря – вакуумний сонячний колектор, термічний опір теплопередачі якої при переносі теплоти, в тому числі радіаційного теплового потоку від ґрунту та випромінювання середовища теплиці, збільшується до 2,0–2,3 м²К/Вт. У той же час ззовні теплове та оптичне випромінювання проходить без перешкод, а приплив холодного повітря за рахунок інфільтрації зменшується практично до 0.

Загальний вигляд енергозберігаючої теплиці наведено на рисунку. Запропонована конструкція працює за програмою, яка залежить від культури і забезпечує підтримання необхідних параметрів мікроклімату протягом всього технологічного процесу вирощування рослин.



Теплиця енергозберігаюча:

- 1 – конструкції спеціальних гнутих профілів; 2 – сонцепроникний схил огороджуючої конструкції; 3 – теплозахисний екран; 4 – труби шатрового обігріву; 5 – розподільний колектор системи водяного опалення; 6 – верхня частина внутрішньої труби вакуумного геліоколектора – конденсатор; 7 – теплоносій, що циркулює в системі опалення теплиці; 8 – прозора зовнішня труба із зміцненого баросилікатного скла; 9 – внутрішня труба, виготовлена із матеріалу, що має високий коефіцієнт теплопровідності і покрита високоякісним селективним покриттям; 10 – органічна рідина, що має температуру кипіння нижче мінус 30 °С; 11 – опора; 12 – штора

Тепловий режим забезпечується комбінованою системою опалення, яка включає використання традиційних джерел енергії та поновлюваного з вакуумними сонячними колекторами. Регулювання параметрів мікроклі-

мату, витрат теплоносія, контроль поливу, мінерального живлення, електроосвітлення у розсадному відділенні, підживлення вуглекислотою здійснюється комп'ютерною системою контролю мікроклімату. Надлишок теплоти використовується для нагрівання води в акумуляторі теплоти для технологічних та побутових потреб.

При встановленні штори із світлопроникного, вітро- та вологозахисного шару з селективним покриттям на внутрішній поверхні теплове та оптичне випромінювання ззовні проходить без перешкод, а при переносі теплоти в напрямку із теплиці зростає термічний опір огорожуючої поверхні теплиці. Сумарні втрати теплоти через цю поверхню зменшуються на 7 %, а коефіцієнт заміщення теплового навантаження при поглинанні вакуумними колекторами 97 % випромінювальної енергії сонця та рівні рефлексії 3–7 % зростає від 0,58 до 0,62, що свідчить про підвищення енергоефективності систем тепlopостачання теплиць та зниження собівартості продукції.

Висновки

1. Вдосконалено систему тепlopостачання теплиць з використанням традиційного водяного підігріву і поновлюваного – сонячних вакуумних колекторів шляхом встановлення штори із світлопроникного, вітро- та вологозахисного шару з селективним покриттям на внутрішній поверхні.

2. При переносі теплоти в напрямку „із теплиці” зростає термічний опір огорожуючої поверхні теплиці до 2,0–2,3 м²К/Вт. Сумарні втрати теплоти через цю поверхню зменшуються на 7 %.

3. Визначено коефіцієнт заміщення теплового навантаження (частка сонячної енергії в покриванні теплового навантаження), який при поглинанні вакуумними колекторами 97 % випромінювальної енергії сонця та рівні рефлексії 3–7% становить 0,62, що характеризує енергетичну ефективність роботи системи тепlopостачання теплиці.

Список літератури

1. Волеваха М. М. Енергетичні ресурси клімату України / М. М. Волеваха, М. І. Гойса. – К.: Наук. думка, 1967. — 132 с.
2. Корчемний М. О., Енергозбереження в агропромисловому комплексі / Корчемний М. О., Федорейко В. М., Щербань В. А. – Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. – 984 с.
3. Пат. № 65560 Україна, МПК А01G 9/00. Геліотеплиця / Лазоренко В. О.; власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. – № u 2011006025; заявл. 9.07.2009; опубл. 12.12.2011, Бюл. №23.
4. Пат. № 70793 Україна, МПК А01G 9/00. Теплиця енергозберігаюча / Лазоренко В. О.; власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. – № u2011 14538; заявл. 7.12.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. №12.

Изложены результаты усовершенствования системы теплоснабжения теплиц с использованием традиционных источников энергии и вакуумных гелиоколлекторов, а также результаты исследований ее энергоэффективности с использованием теплозащитных экранов и штор. Определен коэффициент замещения тепловой нагрузки.

Теплица, вакуумный гелиоколлектор, теплоснабжение, термическое сопротивление, энергоэффективность, коэффициент замещения тепловой нагрузки, штора.

Results of development of the system of hotbrining of hothouses with using of vacuum geliocollector and results of investigation of their energy efficiency with using of heatcover screens for the combined aquatic and sunny heating are considered. Economic effect of applying results in industry is certain/ It is a coefficient of substitution warm loading.

Hothouse, vacuum geliocollector, hotbrining, thermal resistance, energy efficiency, coefficient of substitution warm loading, blind.

УДК 674.047

ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АТМОСФЕРНОЇ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

**О.В. Шеліманова, кандидат технічних наук
А.О. Гур'єва, студентка магістратури**

Визначено основні показники роботи атмосферної сушильної установки, зокрема час підсушування матеріалу до заданого кінцевого вологовмісту.

Вільна конвекція, тепловий баланс сушарки, швидкість сушіння, час підсушування матеріалу.

Серед найбільш енергоємних процесів сучасного виробництва особливо вирізняється процес тепловологісної обробки, який супроводжується тепло- масообміном зовнішнього середовища з матеріалом, що сушиться [1].

Висока вологість відходів тваринницьких та птахівничих господарств (45–80 %) є основною перешкодою для використання цього палива в енергетичних цілях [3]. Розробка нових високоефективних технологій сушіння таких матеріалів сприяла б кращій реалізації потенціалу біомаси і, в результаті, зменшенню залежності економіки України від імпортованого російського газу.

Основним шляхом зменшення часу сушіння та підвищення ефективності цього процесу є застосування альтернативних методів, зокрема використання природної конвекції в сушарках атмосферного типу.

Мета досліджень – визначення основних показників ефективності роботи атмосферної сушильної установки в кліматичних умовах України.

Матеріали та методика досліджень. Методика визначення теплонадходжень від сонячної радіації в атмосферній сушарці, в якості

Теплица, вакуумный гелиоколлектор, теплоснабжение, термическое сопротивление, энергоэффективность, коэффициент замещения тепловой нагрузки, штора.

Results of development of the system of hotbrining of hothouses with using of vacuum geliocollector and results of investigation of their energy efficiency with using of heatcover screens for the combined aquatic and sunny heating are considered. Economic effect of applying results in industry is certain/ It is a coefficient of substitution warm loading.

Hothouse, vacuum geliocollector, hotbrining, thermal resistance, energy efficiency, coefficient of substitution warm loading, blind.

УДК 674.047

ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АТМОСФЕРНОЇ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

**О.В. Шеліманова, кандидат технічних наук
А.О. Гур'єва, студентка магістратури**

Визначено основні показники роботи атмосферної сушильної установки, зокрема час підсушування матеріалу до заданого кінцевого вологовмісту.

Вільна конвекція, тепловий баланс сушарки, швидкість сушіння, час підсушування матеріалу.

Серед найбільш енергоємних процесів сучасного виробництва особливо вирізняється процес тепловологісної обробки, який супроводжується тепло- масообміном зовнішнього середовища з матеріалом, що сушиться [1].

Висока вологість відходів тваринницьких та птахівничих господарств (45–80 %) є основною перешкодою для використання цього палива в енергетичних цілях [3]. Розробка нових високоефективних технологій сушіння таких матеріалів сприяла б кращій реалізації потенціалу біомаси і, в результаті, зменшенню залежності економіки України від імпортованого російського газу.

Основним шляхом зменшення часу сушіння та підвищення ефективності цього процесу є застосування альтернативних методів, зокрема використання природної конвекції в сушарках атмосферного типу.

Мета досліджень – визначення основних показників ефективності роботи атмосферної сушильної установки в кліматичних умовах України.

Матеріали та методика досліджень. Методика визначення теплонадходжень від сонячної радіації в атмосферній сушарці, в якості

якої використовується односкатна теплиця, була розроблена в дослідженні [4].

Підведений до поверхні матеріалу в сушарці радіаційний потік теплоти витрачається на випаровування води, нагрів повітря в сушильному каналі та скляного шару огорожі. Тепло та масовіддача від матеріалу до повітря в сушарці може здійснюватись як природною, так і вимушеною конвекцією.

Коефіцієнт тепло- та масовіддачі в умовах природної конвекції розраховується за формулами А. В. Нестеренка [2]:

- при $\langle \text{Pr Ar} \rangle = 3 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^8$ теплообмінне число Нусельта

$$Nu_{\alpha} = 4,0 \cdot (\text{Pr Ar})^{0,108}; \quad (1)$$

- при $\langle \text{Pr Ar} \rangle = 1 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^8$ масообмінне число Нусельта

$$Nu_{\beta} = 0,6650(\text{Pr}_D \text{Ar})^{0,248}, \quad (2)$$

де Ar – число Архімеда; $\text{Pr} = 0,73$ – число Прандтля для повітря; $\text{Pr}_D = 0,75$ – дифузійне число Прандтля для переносу пари в інертному газі.

Теплофізичні характеристики у всіх безрозмірних числах визначаються за середньою температурою граничного шару.

Об'єм повітря в каналі значно обмежений, тому тепло- та масовіддача буде відбуватися при вимушеному русі повітря на вході в сушарку та виході з неї. Оскільки сушильний канал являє собою короткий дифузор з кутом розкриття 60° , то процес тепло- і масовіддачі розглядається як при поздовжньому обтіканні пластини з середньою швидкістю в дифузорі. Розрахункові формули в цьому випадку мають вигляд [2]:

при ламінарному обтіканні пластини довжиною l ($\text{Re}_l < 2 \cdot 10^5$):

$$Nu_{\alpha} = 0,664 \text{Re}_l^{0,5} \text{Pr}^{0,333}; \quad (3)$$

$$Nu_{\beta} = 0,664 \text{Re}_l^{0,5} \text{Pr}_D^{0,333}; \quad (4)$$

при турбулентному граничному шарі ($\text{Re}_l > 3 \cdot 10^5$):

$$Nu_{\alpha} = 0,02325 \text{Re}_l^{0,8} \text{Pr}^{0,333}; \quad (5)$$

$$Nu_{\beta} = 0,02325 \text{Re}_l^{0,8} \text{Pr}_D^{0,333}. \quad (6)$$

Баланс теплоти, Вт, на поверхні матеріалу в сушарці записується так:

$$Q_{p1} = Q_{12} + Q(1) + Q(2), \quad (7)$$

де $Q_{p1} = q_p F_{12}$ – радіаційний потік теплоти, що надходить на поверхню матеріалу; Q_{12} – тепловий потік радіації від матеріалу до огорожі; $Q(1) = \alpha_1 (t_{w1} - t_1) F_1$ – потік теплоти до повітря в сушильному каналі; $Q(2) = r \beta_p (p_2 - p_1) F_1$ – теплота, що витрачається на випаровування води; t_{w1} – температура поверхні матеріалу; t_1 – середня температура

повітря в сушильному каналі; r – теплота випаровування води при температурі огородження $t = t_{w1}$; p_1 – парціальний тиск водяної пари в сушильному каналі; p_2 – тиск насиченої пари при $t = t_{w1}$.

Розрахунок проводимо методом послідовних наближень. Попередньо задаємося величиною t_{w1} і визначаємо тепловий потік радіації Q_{12} , а потім і температуру огорожі t_{w2} .

Баланс теплоти, Вт, для скляної поверхні огорожі має вигляд:

$$Q_{12} + Q_n = Q(3) + Q(4), \quad (8)$$

де $Q_n = q_n F_2$ – радіаційний потік теплоти, який поглинається огорожею; $Q(3) = \alpha_3 (t_{w2} - t_1) F_2$ – потік теплоти від огорожі до повітря в сушильному каналі; $Q(4) = \alpha_4 (t_{w2} - t_1) F_2$ – потік теплоти від огорожі в навколишнє середовище; t_2 – температура навколишнього середовища; α_3 – коефіцієнт тепловіддачі від огорожі до повітря в сушильному каналі; α_4 – коефіцієнт тепловіддачі до навколишнього середовища.

Коефіцієнт тепловіддачі від огорожі в навколишнє середовище обраховуємо за формулами (10) і (12) при обтіканні пластин. За цими ж формулами визначаємо коефіцієнт тепловіддачі при вимушеній конвекції в сушильному каналі.

При природній конвекції в сушильному каналі коефіцієнт тепловіддачі визначаємо за формулою [2]:

$$Nu_\alpha = C (Gr Pr)^{n3}, \quad (9)$$

де значення емпіричних коефіцієнтів C та n визначаються залежно від значення комплексу $(Gr Pr)$.

Після обрахунку потоків теплоти $Q(3)$ та $Q(4)$ розраховуємо баланс теплоти сушарки:

$$\Delta Q = Q_{p1} + Q_n - Q(1) - Q(2) - Q(3) - Q(4). \quad (10)$$

Якщо $\Delta Q \neq 0$, то змінюємо значення температури поверхні матеріалу t_{w1} , яку спочатку визначали як середнє значення між мінімально можливою та максимальною величиною t_{w1} .

Розрахунок вважається завершеним, якщо $[t_{\min} - t_{\max}] \leq 0,005$.

Крім того, проводимо розрахунок кількості вологи, випареної з матеріалу:

$$M = \beta_p (p_2 - p_1),$$

а також швидкість сушіння матеріалу:

$$N = \frac{M}{\rho_m \delta_m}.$$

Час підсушування матеріалу, год, дорівнює:

$$\tau = \frac{\Delta U}{N},$$

де $\Delta U = U_0 - U_k$ – зміна вологовмісту матеріалу від початкового U_0 до кінцевого U_k .

Результати досліджень. Розглянемо процес підсушування матеріалу з густиною $\rho_m = 800 \text{ кг/м}^3$, товщиною шару $\delta_m = 0,1 \text{ м}$ та $U_0 = 3 \text{ кг вол./кг с.м.}$ при таких параметрах теплоносія: $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $d_1 = 10 \text{ г/кг с.п.}$ та вільній конвекції. В результаті розрахунку отримуємо:

- температура матеріалу $t_m = 36,6943^\circ\text{C}$;
- температура огорожі $t_{\text{огорі}} = 23,4071^\circ\text{C}$;
- кінцевий вологовміст матеріалу $U_k = 1 \text{ кг/кг}$;
- кількість випареної води $M = 0,2248 \text{ кг/м}^2 \text{ год}$;
- швидкість сушіння $N = 2,8098 \cdot 10^{-3} \text{ (кг вол./кг с. м)/м}^2 \text{ год}$.

Час підсушування матеріалу складає 711,8 год або близько 30 діб.

Оскільки із сушарки необхідно видаляти пари води, необхідна циркуляція теплоносія. Кратність повітрообміну в сушарці – це відношення кількості повітря, що подається в сушарку протягом години, до об'єму повітря в сушарці:

$$K_v = \frac{V_v}{V_c}, 1/\text{год}.$$

Об'єм повітря, що надходить у сушарку:

$$V_v = K_v V_c, \text{м}^3/\text{год},$$

кількість якого

$$\phi_v = \rho_1 V_v, \text{кг}/\text{год},$$

де ρ_1 – густина повітря у вхідному перерізі, кг/м^3 .

Швидкість повітря у вхідному перерізі сушильного каналу (на 1 м довжини сушарки) становить:

$$W_1 = \frac{k_v V_c}{3600 b_1} = 3,6667 \cdot 10^{-3}, \text{м/с}.$$

Швидкість повітря в середині перерізу дифузора дорівнює:

$$W_2 = \frac{W_1 b_1}{b_{cp}} = W_1 \cdot 0,303,$$

$$\text{де } b_{cp} = \frac{b_1 + b_2}{2} = 1,65 \text{ м}.$$

Швидкість повітря у вихідному перерізі сушарки:

$$W_3 = \frac{\rho_1 b_1}{\rho_2 b_3} W_1,$$

де ρ_2 – густина повітря на виході з сушарки, кг/м^3 .

Результати розрахунку впливу швидкості повітря у вхідному перерізі сушильного каналу W_1 на параметри атмосферної сушарки при середній температурі повітря в липні $t_1 = 20^\circ\text{C}$ подано в таблиці.

**Результати розрахунку процесу сушіння при різних швидкостях повітря
у вхідному перерізі сушильного каналу**

Пара- метр	$W_1, \text{м/с}$					
	1,0	0,75	0,5	0,4	0,30	0,2
t_M	40,4316	42,6332	45,9030	47,7751	50,2686	53,9154
$t_{\text{сеп}}$	23,0841	23,1950	23,3044	23,4511	23,5635	23,65401
t_2	20,4858	20,6439	20,95362	21,1899	21,3588	22,36025
d_2	10,2733	10,3640	10,5451	10,6806	10,9053	11,3541
α_1	1,0816	0,9359	0,7628	0,6814	0,5888	0,4791
Q_1	65,5066	62,6401	58,1758	55,5636	53,4632	47,0539
α_2	2,6309	2,2767	0,8563	1,6588	1,4335	1,1685
Q_2	328,8507	327,5034	325,5466	324,3695	324,6952	319,8271
α_3	0,8768	0,7595	0,62018	0,5547	0,4841	0,3924
Q_3	11,4603	10,0364	8,8248	7,2879	12,3113	4,4640
α_4	3,7120	3,7121	3,7124	3,7125	3,7154	3,7128
Q_4	52,6619	54,5580	57,4052	58,9364	95,0844	62,4060
M	0,1925	0,1923	0,1920	0,1918	0,1913	0,1908
N	$2,4066 \cdot 10^{-3}$	$2,435 \cdot 10^{-3}$	$2,3936 \cdot 10^{-3}$	$2,3970 \cdot 10^{-3}$	$2,3311 \cdot 10^{-3}$	$2,3844 \cdot 10^{-3}$
τ , год	831,616	832,1031	833,486	834,3708	836,4395	838,78
τ , діб	34,63	34,671	34,728	34,765	34,8516	34,95

Як видно з таблиці, зниження швидкості W_1 призводить до збільшення температури матеріалу та огорожі. Крім того, зростає температура повітря на виході з сушарки (t_2, d_2). Але час підсушування зростає незначно, що свідчить про можливість застосування способу атмосферного сушіння.

Висновки

Наведено детальний тепловий баланс сушарки атмосферного типу та визначено основні показники ефективності її роботи, зокрема час підсушування матеріалу від початкового вологовмісту $U_0 = 3$ кг вол./ кг с. м (або відносної вологості 75 %,) до кінцевого $U_k = 1$ кг вол./ кг с. м. (або відносної вологості 12 %).

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 / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
3. Шеліманова О.В. Експериментальний стенд для дослідження кінетики сушіння гранульованого матеріалу / О.В. Шеліманова, А.О.Гур'єва// Енергетика і автоматика. – 2012. – №2. – С.79 – 82.
4. Шеліманова О.В. Дослідження процесів переносу в атмосферній сушильній установці / О.В. Шеліманова, А.О. Гур'єва// Науковий вісник НУБіП України. –2013. – № 184, ч.1. – С.228 – 233.

Определены основные показатели работы атмосферной сушильной установки, в частности, время подсушивания материала до заданного конечного влагосодержания.

Свободная конвекция, тепловой баланс сушилки, скорость сушки, время подсушивания материала.

The basic performance's measures of the atmospheric drying set, in particular the predrying's time of the material to a predetermined final moisture content are determined.

Free convection, heat balance of drying set, drying speed, predrying's time of the material.

УДК 631.3:621.1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ВОДОНАПІРНОЇ БАШТИ

В.Є. Василенков, кандидат технічних наук

Є.В. Журавльов, студент магістратури

Наведено дослідження теплового режиму водонапірної башти в зимовий період. Розглянуто модернізацію конструкції водонапірної башти з використанням нагрівальних кабелів.

Система водопостачання, витрата води, башта Рожновського, тепловий режим.

Актуальність проблеми витікає із відомого факту, що діяльність, а саме життя людей і тварин неможливе без води. Люди і тварини можуть тижнями бути без їжі, а без води – тільки 2–3 дні. Тому, порушення водопровідної мережі з баштами Рожновського призводить до важких наслідків. Особливо небезпечно розмерзання цієї мережі для умов суворих зим останніх років для Київської області, коли мінімум від'ємної температури сягав максимуму $-25 - 32^{\circ}\text{C}$, для південно-східної частини нашої держави – більше -40°C . Відомо, що при зниженні температури нижче 4°C , об'єм води починає збільшуватися приблизно на 10 %, при замерзанні – тиск у замкнутому просторі сягає 250 МПа [1]. Під дією високого тиску відбувається розрив (розморожування) самих стійких трубопроводів і башт. Розморожена водяна система, як правило, не підлягає ремонту і вимагає повної заміни.

Незважаючи на те, що явища розморожування водяних систем давно відомі та добре відомі катастрофічні наслідки цих явищ, як показав літературно-патентний пошук, проблема захисту водопровідної мережі від розмерзання ще далека до свого задовільного практичного вирішення.

У сільському господарстві на різні технологічні потреби потрібна достатньо велика кількість води. Тому організація надійного безперебійного

Определены основные показатели работы атмосферной сушильной установки, в частности, время подсушивания материала до заданного конечного влагосодержания.

Свободная конвекция, тепловой баланс сушилки, скорость сушки, время подсушивания материала.

The basic performance's measures of the atmospheric drying set, in particular the predrying's time of the material to a predetermined final moisture content are determined.

Free convection, heat balance of drying set, drying speed, predrying's time of the material.

УДК 631.3:621.1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ВОДОНАПІРНОЇ БАШТИ

В.Є. Василенков, кандидат технічних наук

Є.В. Журавльов, студент магістратури

Наведено дослідження теплового режиму водонапірної башти в зимовий період. Розглянуто модернізацію конструкції водонапірної башти з використанням нагрівальних кабелів.

Система водопостачання, витрата води, башта Рожновського, тепловий режим.

Актуальність проблеми витікає із відомого факту, що діяльність, а саме життя людей і тварин неможливе без води. Люди і тварини можуть тижнями бути без їжі, а без води – тільки 2–3 дні. Тому, порушення водопроводної мережі з баштами Рожновського призводить до важких наслідків. Особливо небезпечно розмерзання цієї мережі для умов суворих зим останніх років для Київської області, коли мінімум від'ємної температури сягав максимуму $-25 - 32^{\circ}\text{C}$, для південно-східної частини нашої держави – більше -40°C . Відомо, що при зниженні температури нижче 4°C , об'єм води починає збільшуватися приблизно на 10 %, при замерзанні – тиск у замкнутому просторі сягає 250 МПа [1]. Під дією високого тиску відбувається розрив (розморожування) самих стійких трубопроводів і башт. Розморожена водяна система, як правило, не підлягає ремонту і вимагає повної заміни.

Незважаючи на те, що явища розморожування водяних систем давно відомі та добре відомі катастрофічні наслідки цих явищ, як показав літературно-патентний пошук, проблема захисту водопроводної мережі від розмерзання ще далека до свого задовільного практичного вирішення.

У сільському господарстві на різні технологічні потреби потрібна достатньо велика кількість води. Тому організація надійного безперебійного

водопостачання сільськогосподарських споживачів є однею з найважливіших завдань сільськогосподарського виробництва.

Нині більшість систем водопостачання на селі організовано з використанням відносно дешевих металевих водонапірних башт Рожновського. Їх істотним недоліком є обмерзання внутрішньої поверхні стінок у зимовий період року.

При цьому насамперед порушується робота систем автоматичного регулювання рівня води (датчиків рівнів), знижується корисний об'єм башти і зрештою відбувається її механічне руйнування [3]. Як показала практика застосування захисту башти від обмерзання за допомогою її теплоізоляції в деяких господарствах неефективно, оскільки вимагає значних додаткових витрат, що зводять тим самим нанівець головну перевагу башти Рожновського – її дешевизну, при цьому прискорюється корозія стінок башти при потряплянні між ними і теплоізоляцією вологи. Також важко виявити і у подальшому усунути можливі затікання. Разом з тим відомі випадки істотного підвищення стійкості водонапірної башти до обмерзання шляхом повнішого використання тепла води, що надходить зі свердловини.

Слід також зазначити, що останнім часом значно скоротилося як сільське населення, так і кількість сільськогосподарських тварин, тобто споживання води впало, а башти були спроектовані і запущені в експлуатацію раніше. У баштах почався процес застою води, при цьому втрачається якість води, а в зимовий період вода замерзає і як результат – вихід з ладу башт.

Таким чином, запобігання надмірному обмерзанню башт Рожновського нині є актуальним завданням.

Мета досліджень – вивчення температурного режиму водонапірної башти при негативних температурах навколишнього повітря..

Матеріали і методика досліджень. Використовується методика теплового потоку через циліндричну стінку, диференціальні та інтегральні методи підрахунків.

Результати досліджень. Тепловий потік через циліндричну стінку розраховуємо за виразом:

$$Q = \frac{\pi l (T_{\text{в}} - T_{\text{пов}})}{\frac{1}{\alpha_1 d_{\text{зов}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{ст}}} \ln \frac{d_{\text{зов}}}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{л}}} \ln \frac{d_{\text{вн}}}{d_{\text{вн.л}}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{вн.л}}}}, \quad (1)$$

де Q – тепловий потік, Вт; l – висота циліндра, м; $T_{\text{в}}$ – температура води в башті, °С; $T_{\text{пов}}$ – температура навколишнього повітря, °С; α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря; α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від води до крижаної стінки; $\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності сталевих стінок; $\lambda_{\text{л}}$ – коефіцієнт теплопровідності стінки льоду; $d_{\text{зов}}$ – зовнішній діаметр сталевих стінок, м; $d_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр сталевих стінок, м; $d_{\text{вн.л}}$ – внутрішній діаметр стінки льоду, м.

З іншого боку, енергію, яка повинна надходити в башту щомиті з водою зі свердловини, знайдемо за виразом:

$$Q = c\rho V\Delta T, \quad (2)$$

де c – питома теплоємність води, кДж/кг $^{\circ}$ С; ρ – густина води, кг/м 3 ; V – об'єм води, що надійшла в башту зі свердловини за 1 с, м 3 /с; ΔT – різниця температур води в башті і свердловині, $^{\circ}$ С.

Рівняння теплового балансу запишемо так:

$$-CldT = (T_1 - T_{нов})\alpha_1 S_1 dt; \quad (3)$$

$$-CldT = 2\pi\lambda_{cm}l \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{R_1}{R_2}} dt; \quad (4)$$

$$-CldT = (T_{води} - T_2)\alpha_2 S_2 dt, \quad (5)$$

де C – теплоємність маси води в циліндрі висотою 1 м, Дж/(м $\cdot$ К); dt – проміжок часу, с; T_1 – температура зовнішньої стінки, $^{\circ}$ С; T_2 – температура внутрішньої стінки, $^{\circ}$ С; dT – зміна температури води за час dt , $^{\circ}$ С; R_1 – радіус зовнішньої поверхні, м; R_2 – радіус внутрішньої поверхні, м; S_1 – площа зовнішньої поверхні стінки, м 2 ; S_2 – площа внутрішньої поверхні стінки, м 2 .

Перетворюючи рівняння (3) – (5) та інтегруючи, отримаємо:

$$t = K \ln \frac{T_{поч} - T_{нов}}{T_{кін} - T_{нов}}, \quad (6)$$

де $T_{поч}$ – початкова температура води, $^{\circ}$ С; $T_{кін}$ – кінцева температура води, $^{\circ}$ С.

$$K = -\frac{c\rho R_2^2}{2} \left(\frac{1}{\alpha_1 R_1} + \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2 R_2} \right). \quad (7)$$

За залежністю (6) можна визначити час охолодження води t у водонапірній башті від $T_{поч}$ до $T_{кін}$. На рис. 1 показано залежності, отримані за рівнянням (6) роботи [5].

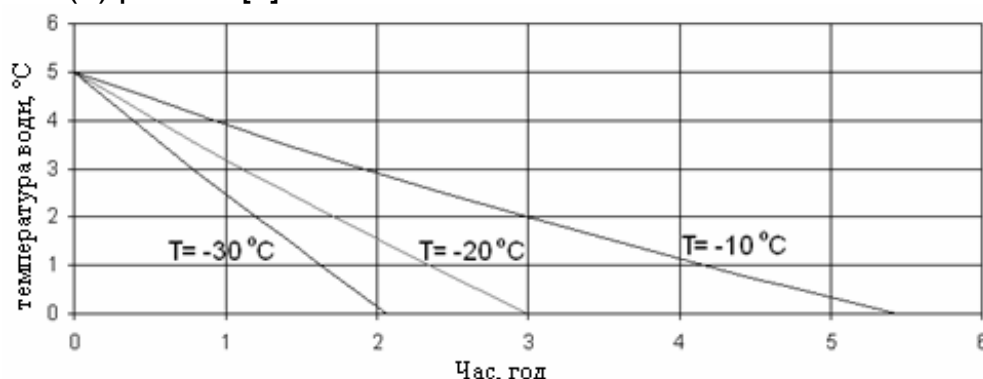


Рис. 1. Залежність температури води від часу

На рис. 2 показано отримані графіки залежності товщини льоду, що утворився на внутрішній стінці водонапірної ємкості башти, від часу.

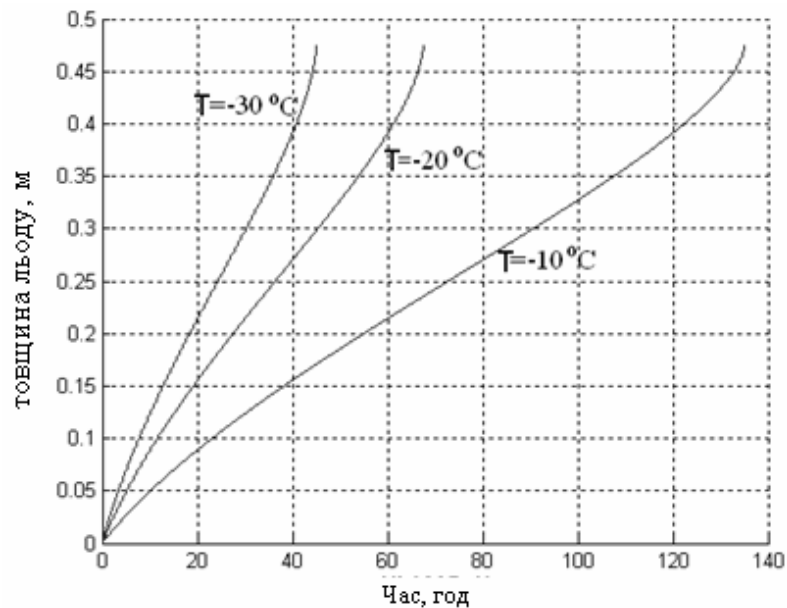


Рис. 2. Залежність товщини льоду, що утворився на внутрішній стінці водонапірної ємкості башти від часу

Запропоновано спосіб захисту водонапірної башти з нагрівальними кабелями [2]. Для досягнення цієї мети необхідно у водонапірну башту додатково за дотичною до циліндричної форми бака з внутрішнього її боку розташовувати нагрівальні кабелі температурою $65^{\circ}\text{C} - 110^{\circ}\text{C}$. Підключення кабелів здійснюється на ізоляційній панелі у верхній частині башти, із захищеною кришкою, недоступною для вологи.

Висновки

1. У результаті проведеного аналізу роботи водонапірних башт Рожновського в зимовий період року встановлено, що при температурі повітря -10°C температура в башті буде становити 5°C через 5,5 год, а товщина льоду через 140 год буде близько 45 см, а при -30°C температура в башті буде становити 5°C через 2 год, при цьому та ж сама товщина льоду буде сягати вже через 40 хв.

2. Теоретично встановлено, що інтенсивність льодоутворення значно можна зменшити, скоротивши час знаходження в ємкості башти одного і того ж об'єму води (застою) шляхом забезпечення циркуляції води в порожнині башти.

3. Підвищення її стійкості до обмерзання може бути досягнуто за рахунок модернізації конструкції водонапірної башти, а саме використання нагрівальних кабелів, що розташовані за дотичною до кола всередині башти.

4. Економічний ефект за рахунок зниження частоти відмов при використанні нагрівальних кабелів і як результат підвищення надійності водопостачання становить 5194 грн. на одну башту за цінами 2012 р.

Список літератури

1. Новиков Ю.В. Вода и жизнь на земле / Ю.В. Новиков, М.М. Сайфутдинов. – М.: Наука, 1981. – 184 с.

2. Пат. на корисну модель №74001. Водонапірна башта з нагрівальними кабелями / Василенков В.Є. – заявл. 10.04.2012; опубл. 10.10.2012. Бюл. №19.

3. Петько В.Г. Незамерзаюча водонапірна вежа / В.Г. Петько, А.Б. Рязанов // Сільський механізатор. – 2008. – № 2. – С. 32.

4. Петько В.Г. Усовершенствование конструктивных параметров водонапорных башен Рожновского для повышения стойкости к обмерзанию / В.Г. Петько, А.Б. Рязанов // Известия Оренбургского гос. агр. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 85–86.

5. Рязанов, А.Б. Исследования динамики охлаждения воды в водонапорной башне Рожновского / А.Б. Рязанов // Известия Оренбургского гос. агр. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 50–51.

Приведены исследования теплового режима водонапорной башни в зимний период. Рассмотрено модернизацию конструкции водонапорной башни с использованием нагревательных кабелей.

Система водоснабжения, расход воды, башня Рожновского, тепловой режим.

In article pyvedeny Studies thermal conditions vodonapornoy tower in the Winter period. We consider upgrading water tower designs using heating cables.

The system water's supply, Consumption of water, tower Rozhnovsky, thermal regime.

УДК 626.821.32

КІНЕМАТИЧНА СТРУКТУРА ПОТОКУ ЗА ВОДОВИПУСКНИМИ СПОРУДАМИ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ

**М.А. Палішкін, О.Т. Карпусь, кандидати технічних наук
Б.Т.Карпусь, інженер**

На основі експериментальних досліджень кінематики потоку в придонній частині каналів за водовипускними спорудами насосних станцій одержано статистичні характеристики пульсацій придонних швидкостей та дано оцінку розмиваючої властивості потоку.

Водовипускна споруда, канал, турбулентність, нижній б'єф, розмиваюча здатність потоку.

Надлишок, або просто наявність води в одних місцях та нестача в інших, де вона необхідна, є актуальною як у минулому, так і нині. За багатьма прогнозами ця проблема буде наростати. Тому, воду потрібно подавати з одних регіонів в інші. При цьому за водовипусками має місце підвищена турбуляризація потоку, що призводить до розмиву гідротехнічних споруд.

Мета досліджень – встановлення закону розподілу максимуму придонних швидкостей, проведення кореляційного та спектрального аналізу пульсацій швидкостей, оцінка розмиваючої здатності потоку.

© М.А.Палішкін, О.Т.Карпусь, Б.Т. Карпусь, 2013

2. Пат. на корисну модель №74001. Водонапірна башта з нагрівальними кабелями / Василенков В.Є. – заявл. 10.04.2012; опубл. 10.10.2012. Бюл. №19.

3. Петько В.Г. Незамерзаюча водонапірна вежа / В.Г. Петько, А.Б. Рязанов // Сільський механізатор. – 2008. – № 2. – С. 32.

4. Петько В.Г. Усовершенствование конструктивных параметров водонапорных башен Рожновского для повышения стойкости к обмерзанию / В.Г. Петько, А.Б. Рязанов // Известия Оренбургского гос. агр. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 85–86.

5. Рязанов, А.Б. Исследования динамики охлаждения воды в водонапорной башне Рожновского / А.Б. Рязанов // Известия Оренбургского гос. агр. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 50–51.

Приведены исследования теплового режима водонапорной башни в зимний период. Рассмотрено модернизацию конструкции водонапорной башни с использованием нагревательных кабелей.

Система водоснабжения, расход воды, башня Рожновского, тепловой режим.

In article pyvedeny Studies thermal conditions vodonapornoy tower in the Winter period. We consider upgrading water tower designs using heating cables.

The system water's supply, Consumption of water, tower Rozhnovsky, thermal regime.

УДК 626.821.32

КІНЕМАТИЧНА СТРУКТУРА ПОТОКУ ЗА ВОДОВИПУСКНИМИ СПОРУДАМИ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ

**М.А. Палішкін, О.Т. Карпусь, кандидати технічних наук
Б.Т.Карпусь, інженер**

На основі експериментальних досліджень кінематики потоку в придонній частині каналів за водовипускними спорудами насосних станцій одержано статистичні характеристики пульсацій придонних швидкостей та дано оцінку розмиваючої властивості потоку.

Водовипускна споруда, канал, турбулентність, нижній б'єф, розмиваюча здатність потоку.

Надлишок, або просто наявність води в одних місцях та нестача в інших, де вона необхідна, є актуальною як у минулому, так і нині. За багатьма прогнозами ця проблема буде наростати. Тому, воду потрібно подавати з одних регіонів в інші. При цьому за водовипусками має місце підвищена турбуляризація потоку, що призводить до розмиву гідротехнічних споруд.

Мета досліджень – встановлення закону розподілу максимуму придонних швидкостей, проведення кореляційного та спектрального аналізу пульсацій швидкостей, оцінка розмиваючої здатності потоку.

© М.А.Палішкін, О.Т.Карпусь, Б.Т. Карпусь, 2013

Матеріали та методика досліджень. Досліджувалися трьох-, п'яти-трубні водовипускні споруди сифонного типу та шестипрольотна водовипускна споруда з сегментними та плоскими затворами. При дослідженні водовипускних споруд сифонного типу та з повехневими затворами, крім конструктивних рішень, певна увага приділялася вивченню кінематики потоку у придонній частині за спорудами.

Дослідження проводились на просторових жорстких моделях споруд, виконаних у масштабах 1:13 та 1:25 натуральної величини. Водовипускна споруда спрягалася з відвідним каналом, що звужується перехідною частиною, центральний кут конусності якої приймається $22^{\circ} - 30^{\circ}$. Числа Рейнольдса при пропуску розрахункових витрат на моделях змінювалися від 14000 до 54000.

У дослідах на фізичних моделях вимірювалися осереднені швидкості потоку та максимальні миттєві придонні швидкості. Осереднені швидкості потоку вимірювалися мікровертушками типу Х-6М у закріплених створах, розташованих на перехідній ділянці та відвідному каналі. Відстань між створами на перехідній ділянці та каналі була 50 – 80 см. Створи для вимірювання швидкостей розміщувалися з таким розрахунком, щоб отримати детальну інформацію про величину та характер розподілу швидкостей за водовипускними спорудами. Максимальні миттєві швидкості у придонній області вимірювалися однокомпонентними тензометричними перетворювачами швидкості.

У кожному створі придонні швидкості вимірювалися у трьох – п'яти точках по ширині потоку.

Власна частота перетворювача становила 50 - 80 Гц у воді. Оскільки основна частка енергії пульсації у водних потоках зосереджена у вихорах частотою від 1 до 20 Гц, то застосований перетворювач можна вважати мало-інерційним.

Збір та обробка експериментальних даних по осереднених та максимальних придонних швидкостях здійснювалися автоматично із застосуванням вимірювально-обчислювального комплексу на базі ПЕОМ. Тарування перетворювача у потоці виконувалося на виході з тарувального конфузора, де спостерігалася течія з рівномірним розподілом швидкостей по перетину.

Під час обробки сортували дані, обраховували статистичні характеристики – дисперсію, стандарт пульсацій (турбулентності), асиметрію та ексцес; гістограми рядів та обчислювали автокореляційну функцію і спектральну щільність.

На точність обчислень статистичних характеристик впливає величина ряду, інтервал дискретності, терміни спостереження.

У дослідах довжина ряду приймалася рівною 500 значенням. Інтервал дискретності опитування пульсаційних швидкостей 0,02 с, час вимірювання пульсацій цих швидкостей 11,2 с. Термін запису значень осереднених швидкостей був прийнятий рівним 60 с.

Результати досліджень. Більшість досліджень було проведено для визначення пульсацій швидкості в нижньому б'єфі водовідвідних спо-

руд, де числа Фруда $F_r > 1$. У цьому випадку розглядалися потоки, які знаходились в спокійному стані (числа Фруда $F_r > 1$).

Для таких потоків дані про пульсаційні характеристики для застосування при розрахунку нижнього б'єсфа обмежені. При вивченні гідравлічних явищ за спорудами знання лише осереднених характеристик недостатньо для пояснення дійсної картини та розробки методики їх розрахунку. В цих випадках необхідно також вивчення пульсаційних швидкостей, аналіз турбулентних характеристик та спектра турбулентних пульсацій [11, 12]. При цьому основна задача вивчення турбулентності полягає в описі полів різних гідродинамічних величин. Оскільки в турбулентному потоці пульсація цих величин у часі та просторі має хаотичний характер, то статистичний підхід до їх опису найдоцільніший [6, 11]. При цьому, як зазначають Е.М. Мінський [6] та А.А.Таунсенд [11] проблема турбулентних потоків складна і повинна суттєво покладатися на експеримент. Турбулентний потік за спорудами є стабілізованим у гідродинамічному розумінні, тобто всі осереднені характеристики його залишаються незмінними в часі. Як відомо із статистичної гідродинаміки [7], гідродинамічні поля турбулентної течії являють собою випадкові поля в термінах, що прийняті в теорії ймовірності. В цьому випадку тимчасові функції є стаціонарними, а їх статистичні характеристики не залежать від початку підрахунку часу при випробуваннях. А для того, щоб осереднені по простору функції від значень випадкового поля призводили до тих самих результатів, що й осереднення за ймовірністю, досліджуване поле повинно бути однорідним. Між тим стосовно до полів гідродинамічних характеристик турбулентного потоку допущення щодо однорідності завжди є математичною ідеалізацією. Безумовно стаціонарності та однорідності недостатньо для сходження часових та просторових середніх до середніх статистичних значень. Останньою умовою сходження просторових та часових середніх до статистичних є умовою ергодичності.

Мати справу з ергодичними випадковими процесами дуже зручно, оскільки в такому випадку по одній реалізації достатньої тривалості можна судити про характеристики випадкового процесу. Ця обставина розширює можливості вивчення турбулентних потоків, оскільки дозволяє вважати результати вимірювань реалізацією функції надійно апроксимуючої процес. Важливим у дослідженні є встановлення характеру функції та закону її розподілу.

Для побудови графіків закону розподілу одержані у результаті експериментів статистичні ряди виміряних величин пульсаційних швидкостей були опрацьовані відповідно до рекомендацій, викладених у роботі [1].

Для випадкових функцій, що вимірюються в стабільних умовах, найрозповсюдженіший нормальний закон розподілу. Розподіл ймовірностей пульсації швидкостей у турбулентному потоці в загальному випадку не відповідає нормальному (Гаусовському) закону розподілу. У випадку однорідної та ізотропної турбулентності буде нормальна крива розподілу пульсуючої швидкості у точці.

Для турбулентного потоку із зсувом цей розподіл у загальному випадку буде асиметричним. Проте для будь-якого випадкового поля з кінцевими моментами перших двох порядків (математичним очікуванням та дисперсією) завжди можна підібрати гаусівське поле, має те ті ж самі середні значення та ту ж кореляційну функцію пульсації поля.

А.С.Монін та Я.Н.Яглом [7] зазначають, що при наближеному вивченні випадкових полів при використанні лише даних про моменти перших двох порядків, завжди можна передбачати, що досліджувані поля мають нормальний розподіл ймовірності. Часто випадкові поля гідродинамічних характеристик турбулентного потоку виявляються близькими до гаусівських полів.

Для встановлення характеру закону розподілу отримані гістограми порівнювалися з теоретичними кривими розподілу. Аналіз гістограм та нанесених на них теоретичних кривих розподілу показує, що закон розподілу пульсаційних швидкостей у придонній частині потоку наближений до нормального, але строго йому не відповідає. Це пояснюється тим, що при певних режимах роботи споруд потік неоднорідний та неізотропний.

Оцінка ступеня узгодженості одержаного закону розподілу з нормальним проведена за критерієм Пірсона. Сходження дослідних гістограм з нормальним законом спостерігалось при числах Фруда $F_r > 0,04 - 0,06$ та числах Рейнольдса $Re > 20000$. У цьому випадку за спорудами мав місце розвинутий турбулентний потік, який можна вважати локально-однорідним та ізотропним. При числах Фруда $F_r > 0,02$ та числах Рейнольдса $Re > 15000$ у потоці переважали крупні анізотропні вихрові утворення низької частоти. У цих випадках нормальний закон розподілу турбулентних пульсацій не додержується.

Виходячи з вищевикладеного, зрозуміло, чому в багатьох експериментальних дослідженнях турбулентних пульсацій швидкості в потоках з вільною поверхнею багато дослідників приймають наближено розподіленими за нормальним законом [1] та при визначенні максимальних миттєвих швидкостей застосовують «правило трьох сигм».

У наших дослідках максимальна миттєва пульсаційна швидкість наближена до 3σ . З порівняння дослідних та розрахункових значень пульсаційних швидкостей видно, що вони добре узгоджуються між собою та відрізняються один від одного в більшості випадків не більше, ніж на 10–12 % (рис.1).

Серед характеристик розподілу випадкової величини, крім математичного очікування, дисперсії D^* , стандарту σ , одним із основних є коефіцієнт асиметрії A_S та «крутизна» розподілу, що характеризується величиною ексцесу E_k [3, 7]. Якщо коефіцієнт асиметрії $A_S > 0$, то крива розподілу скошена вправо, коли $A_S < 0$, то – вліво.

Ексцес характеризує величину накопичення середнього значення швидкості певного ряду на проміжку значень. Для гостроверхих кривих $E_k > 0$, а для плосковерхих $E_k < 0$.

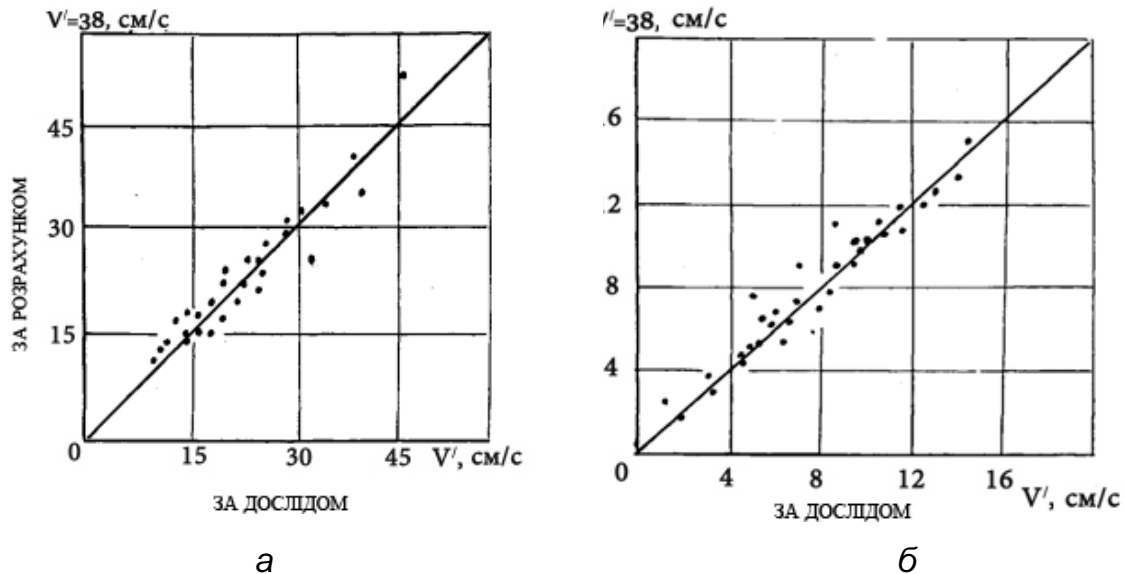


Рис.1. Порівняння дослідних значень пульсаційних швидкостей з розрахунковими:

а – за сифонним трубопроводом; б – за водовипускною спорудою з швидкодіючими затворами

Аналіз коефіцієнтів асиметрії пульсаційних придонних швидкостей показав, що додатні та від'ємні значення їх зустрічаються приблизно з однаковою частотою. При цьому на початку ділянки затухання переважає додатна асиметрія. Це ж зазначав Д.І.Кумін [5] при вивченні асиметричності кривих забезпеченості миттєвих швидкостей у нижньому б'єфі водозливів. У нашому випадку по мірі віддалення вниз за течією від початку каналу частіше зустрічаються криві розподілу з від'ємною асиметрією.

Значення ексцесу в більшості випадків від'ємні. Це означає, що ймовірність великих (за модулем) відхилень швидкості від середньої менше, ніж для нормального закону, тобто криві розподілу більш плоскові у порівнянні з нормальними.

Зазначимо, що одержані криві розподілу для створів, розташованих у кінці ділянки затухання пульсацій, де потік вирівнюється, більш близькі до закону нормального розподілу. Це в деякій мірі узгоджується з висновками Е.М.Мінського [6] та інших дослідників щодо того, що пульсація в придонному шарі турбулентного рівномірного потоку та в кінці ділянки затухання в нижньому б'єфі підпорядковується нормальному закону розподілу.

Пульсація миттєвої швидкості у стабілізованому потоці являє собою, як зазначалося вище, стаціонарний випадковий процес, однією з характеристик якого є кореляційна функція. У нашому випадку розглядається нормована на дисперсію автокореляційна функція, яку називають коефіцієнтом кореляції $R(\tau)$. Аналіз кореляційної функції може дати більш достовірну ознаку стаціонарності процесу, оскільки показує внутрішню структуру випадкових процесів та характеризує залежності між окремими значеннями випадкової функції в різні моменти часу t з інтервалом τ . Прикметою стаціонарного випадкового процесу є незалежність характеру кореляційної функції від початку терміну досліджень.

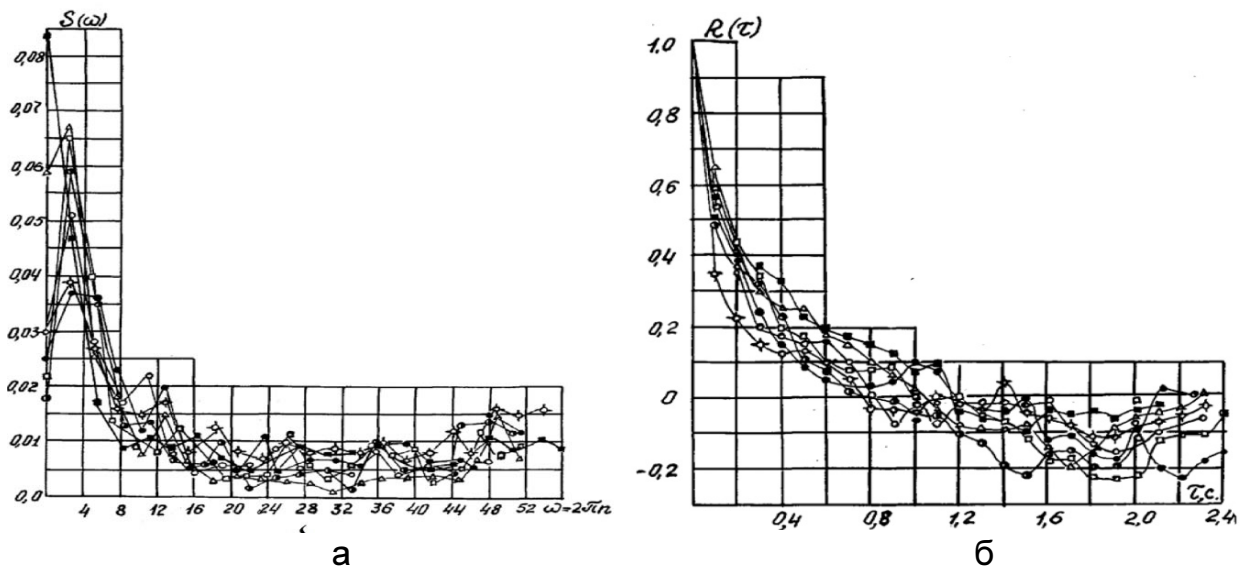


Рис. 2. Кореляційні функції (а) та спектральні щільності (б) енергії пульсацій придонної швидкості за трьохтрубною водовипускною спорудою ($Q = 5 \text{ м}^3/\text{с}$, працює середній сифон $h = 0,65 \text{ м}$):
1 – 8 – створи вимірювань. $\circ$ – 1; $\bullet$ – 2; Δ – 3; $\square$ – 4; $+$ – 5; $\odot$ – 6; $\blacksquare$ – 7

На рисунках 2 і 3 наведено автокореляційні функції для всіх розглянутих споруд. Як видно з рисунків, зміна конструкції не призводить до якісної зміни автокореляційної функції. Зауважимо, що в нашому випадку швидкісне поле за водовипускними спорудами не є однорідним та кореляційна функція повинна змінюватися як за шириною, так і довжиною.

Однак, як зазначав Таунсенд [11], для течії рідини у каналі в деякій мірі характерна однорідність турбулентного руху в напрямку середньої течії.

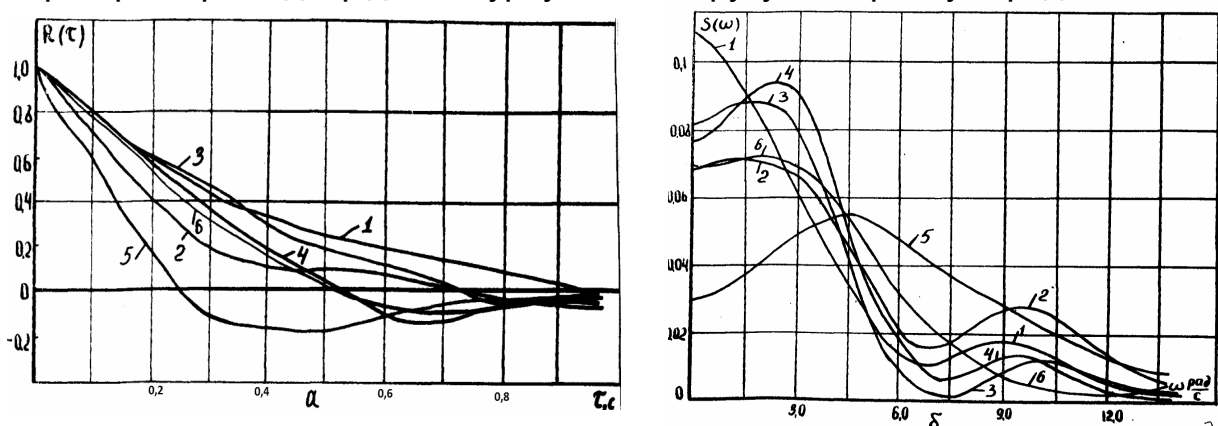


Рис. 3. Кореляційні функції пульсації поздовжньої швидкості за водовипускними спорудами із сегментними затворами:
а – $Fr = 0,0035 - 0,015$; б – $Fr = 0,058 - 0,08$; 1 – 11 – створи

Аналіз наведених графіків $R(\tau)$ показав, що в спокійному потоці мінімальна відстань від першого нуля автокореляції (мінімальний інтервал кореляції) для сифонного водовипуску 0,1- 2 с, а для водовипуску з поверхневими затворами становить 0,1- 0,5 с.

Швидке зменшення $R(\tau)$ від 1 до 0 є непрямым підтвердженням ергодичності досліджуваного процесу. Наявність від'ємних значень $R(\tau)$

вказує на те, що у структурі спокійного потоку має місце елемент періодичності як результат вихрової структури потоку. За кореляційною функцією пульсації можна судити про масштаби турбулентності, оскільки інтервал автокореляції до деякої міри є аналогом інтегрального масштабу турбу-

лентності $T_E = \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau$, що називається ейлеровим масштабом. Зна-

чення цього масштабу розглядають як наближену міру між тими величинами миттєвої швидкості, які вона приймає в послідовні інтервали часу під дією турбулентних пульсацій. У випадку, коли $v \gg v'$, просторовий масштаб турбулентності можна визначити за залежністю: $L = \bar{v} T_E$. За водовипускними спорудами при числах Фруда $Fr > 0,02$ та Рейнольдса $Re > 15000$ осереднена швидкість $\bar{v}$ велика у порівнянні з турбулентними пульсаціями, а тому залежність для просторового масштабу турбулентності можна застосовувати для кількісної оцінки розмірів турбулентних пульсацій за коефіцієнтом автокореляції $R(\tau)$. На практиці просторовий масштаб турбулентності L визначається числовим значенням добутку площі, обмеженої кривою $R(\tau)$, та осями координат і осередненої швидкості $\bar{v}$.

Великомаштабні вихори залежать від геометрії потоку та характеру зовнішніх впливів. Вони досить різні для різних течій. Ці вихори мають найбільшу амплітуду, відіграють основну роль у турбулентному потоці та сумірні з геометричними розмірами течії. Порівнюючи інтервали автокореляцій, одержаних під час дослідів, з інтервалами кореляцій для рівномірних потоків виявляється, що на ділянці затухання пульсацій швидкості за водовипускними спорудами час нульової кореляції менше, ніж у рівномірному потоці. Це є свідченням того, що в турбулентному потоці за спорудою концентрація пульсаційної енергії в області низьких частот більш висока, ніж у рівномірному потоці.

Іншим ефективним засобом опису турбулентності є метод спектрального аналізу. Спектральні функції мають більш зрозумілий фізичний смисл та застосовуються для вивчення внутрішньої структури випадкових процесів. Спектральна функція $S(\omega)$ показує, як розподіляється кінетична енергія турбулентних пульсацій за частотами ω та дає можливість оцінити масштаби збурень. Спектр стаціонарної функції є не чим іншим, ніж розподілом дисперсій за частотами.

Об'єктом досліджень є часовий (частотний спектр $S(\omega)$), одержаний шляхом перетворення Фур'є кореляційної функції $R(\tau)$.

Для повного опису вихрової структури будь-якого потоку необхідно мати тривимірні автокореляції та енергетичні спектри. В наших дослідях вимірювалися лише поздовжні складові актуальних швидкостей. Тому можемо робити висновки лише про поздовжні розміри горизонтальних вихорів.

Аналіз одержаних спектрів показав, що вихрова структура потоку за довжиною каналу стабільна. Але при зменшенні інтенсивності турбулентності за довжиною каналу періодична картина вихрового руху розпадається і

на відстані $(25-30)h_k$ вихрова структура потоку наближається до характерної для вільних ділянок каналів та річок, що відмічається також у роботі [2].

Аналізуючи графіки спектральних щільностей при різних режимах роботи відвідного каналу, встановлено, що максимум енергії в більшості випадків припадає на великомаштабні вихори з частотами до 3 – 3,5 рад/с (0,48 – 0,56 Гц). Графіки спектральних щільностей цих вихорів мають максимум у точці $\omega = 0$. Автокореляційні функції, що відповідають їм, або не досягають нуля в інтервалі τ , або досягають при $\tau \rightarrow 1$. Другий енергетичний максимум цих спектрів спостерігається на частотах 6 – 9 рад/с (0,95 – 1,43 Гц), та третій максимум, якщо він є, на частотах 12 – 15 рад/с (1,9 – 2,4 Гц). Другий енергетичний максимум за амплітудою становить $(15 - 25)\% S(\omega)_{\max}$, а третій $(3 - 10)\% S(\omega)_{\max}$ (рис.4, 5).

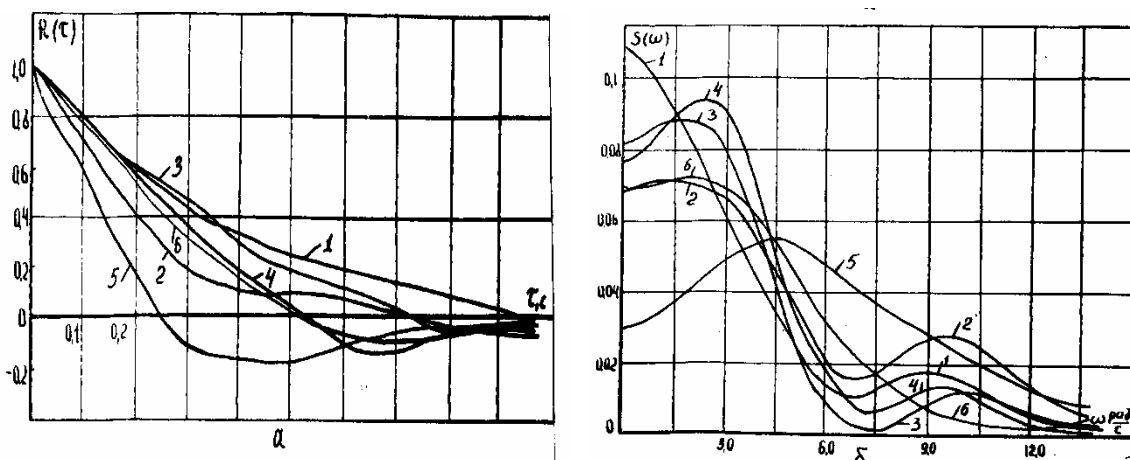


Рис. 4. Кореляційні (а) та спектральні (б) щільності енергії пульсації поздовжньої швидкості за водовипускними затворами:

1 – $F_r = 0,07 - 0,09$; 2 – $F_r = 0,04 - 0,06$; 3 – $F_r = 0,022 - 0,035$; 4 – $F_r = 0,13 - 0,17$;
5 – $F_r = 0,058 - 0,08$; 6 – $F_r = 0,02 - 0,036$

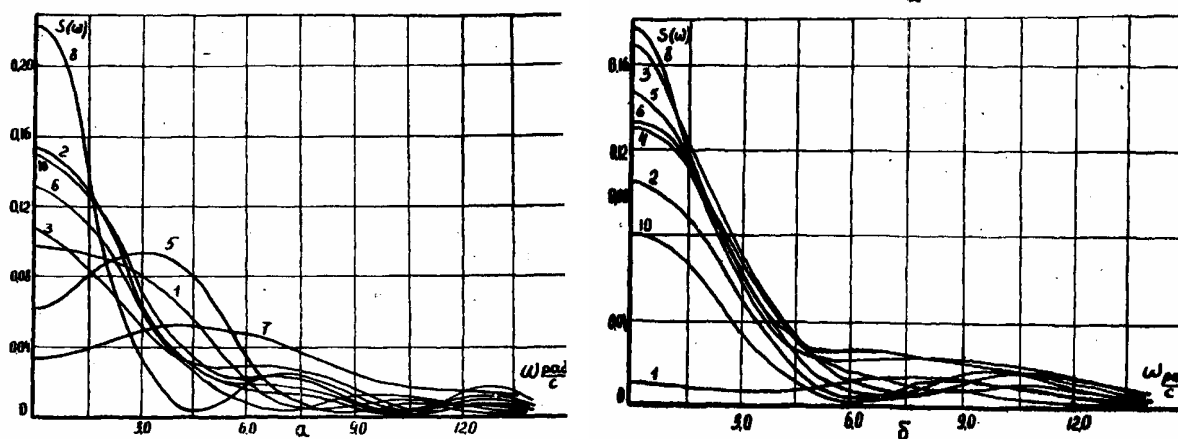


Рис. 5. Спектральні щільності пульсації поздовжньої швидкості за водовипускною спорудою з поверхневими затворами:

а – $F_r = 0,058 - 0,08$; б – $F_r = 0,0065 - 0,015$; 1– 10 – створи

Умовно назвемо наведені графіки спектральними щільностями I порядку. Спектральні щільності II порядку мають графік з чітко вираженим максимумом на частотах 1 – 6 рад/с (0,16 – 0,96 Гц), другий максимум

згладжений на частотах 8 – 11 рад/с / (1,3 – 1,6 Гц). За амплітудою другий пік складає 25 – 30 % $S(\omega)_{\max}$ (див. рис. 5).

Спектри III порядку мають розпластану форму (див. рис.4). Вони можуть мати один чи два максимуми, що мало відрізняються один від одного за амплітудою. Перший максимум спектра спостерігається на частотах 3 – 9 рад/с / (0,5 – 1,4 Гц). У випадку двох максимумів другий спостерігається на частотах 11 – 14 рад/с / (1,75 – 2,2 Гц).

Спектри зазначених порядків є енергетичними характеристиками вихрових утворень, що переважають у спокійному потоці при різних значеннях чисел Фруда Fr . Дослідами виявлено, що вихори, які описуються спектрами I порядку переважають у потоках при числах Фруда $Fr = 0,0005 - 0,08$, причому амплітуда спектра зростає зі зменшеннями чисел Фруда. Частота цих вихорів 0 – 3 рад/с (до 0,48 Гц), а період виникнення на моделі становив до 20 с.

Пульсаційна складова швидкостей v' таких потоків співрозмірна з осередненою $\bar{v}$ таких потоків. А тому за автокореляційною функцією не можна встановити розмір вихорів, оскільки вона у цьому випадку рідко досягає нульового значення.

Значення актуальних придонних швидкостей v^* у досліджуваних потоках малі. Це вказує на те, що великомасштабні низькочастотні вихори значної амплітуди не сприяють розмиву, незважаючи на те, що на них припадає основна частина кінетичної енергії потоку. Це пояснюється великим періодом виникнення та коротким періодом дії. Зі збільшенням чисел Фруда графіки спектральної щільності набувають розпластаного окреслення, енергія більш рівномірно розподіляється по широкому діапазону частот, амплітуда спектра зменшується.

При числах Фруда ($Fr=0,1-0,33$) у потоці переважають вихори, які описуються спектральними кривими II та III порядків, які мають високу частоту.

Період виникнення цих вихорів короткий, а період дії великий. При числах Фруда до $Fr=0,13 - 0,17$ 50 % спектральних кривих припадає на криві II та III порядків, амплітуда яких 0,05 – 0,08 $S(\omega)_{\max}$. При числах Фруда $Fr=0,27 - 0,33$ 30% кривих припадає на спектри III порядку, амплітуда їх спектрів зменшується до 0,03 – 0,05 $S(\omega)_{\max}$. Таким чином, чим більше швидкість потоку та числа Фруда, тим менше амплітуда спектрів та тим більший діапазон частот ними охоплюється.

Звідси витікає, що розмив русла каналу є наслідком дії вихрових полів актуальних миттєвих швидкостей високої частоти, які мають середні та дрібні масштаби відносно розмірів русла, тобто на розмив витрачається енергія мезо- та мікротурбулентності. Як відомо, графік спектральної щільності можна умовно розділити на ряд областей. Область «а» характеризується наявністю декількох значимих максимумів на деякому фоні, близькому до «білого шуму». Вихори, що належать до цієї області частот, мають найбільшу енергію. Це та частина спектра, де здійснюється передача енергії від осередненого руху до пульсаційного. У високочастотній

області «б» вирізняється інерційна підобласть, яка відображає каскадну передачу енергії по спектру частот.

З теоретичного та експериментального аналізу [4,12] відомо, що мікроструктура більшості реальних неізотропних турбулентних потоків є наближено ізотропною (локально-ізотропною). Тому, багато властивостей найповніше вивченої ізотропної турбулентності застосовані до реальної турбулентності.

У повністю розвиненому турбулентному потоці максимальну кінетичну енергію будуть мати вихори в інтервалі високих хвилових чисел, а турбулентність у цій області можна вважати статистично стаціонарною та незалежною від зовнішніх умов. Характер турбулентності в області високих хвилових чисел визначається параметрами, пов'язаними з параметрами потоку: середньою швидкістю дисипації енергії ξ та коефіцієнтом кінематичної в'язкості. Відповідно до теорії А.Н. Колмогорова [3] ця область називається універсальною рівновісною областю.

Якщо збурення, що розглядаються, у потоці значно більше колмогорівського мікомасштабу («внутрішнього» масштабу турбулентності), залишаючись при цьому значно менше деякого «зовнішнього» масштабу при достатньо великих числах Рейнольдса, то всі статистичні характеристики поля швидкостей визначаються лише одним параметром ξ . Цей інтервал масштабів називають інерційним інтервалом, в якому відбувається «каскадна» передача турбулентної енергії від збурень великих масштабів.

До збурень менших масштабів кількість переданої каскадом частот енергії чисельно рівна дисипації $\square$. В інерційному інтервалі спектр турбулентності має вигляд:

$$S(\omega) = \text{Const } \xi^{2/3} k^{-5/3}, \quad (1)$$

де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвилове число, m^{-1} ; λ – довжина хвилі, m ; ξ – швидкість дисипації турбулентної енергії.

Тоді часовий частотний спектр можна подати у вигляді:

$$S(\omega) = a \omega^{-5/3}. \quad (2)$$

Це відповідає апроксимації структурних функцій законом $2/3$.

Ж.Конт-Белло [4] зазначає, що каскадний перенос енергії спектром за законом мінус $5/3$ спостерігається в певному діапазоні чисел Рейнольдса. До такого ж висновку, зокрема, прийшли Т.Моулден та У.Форст [8], які зазначають, що існування інерційної підобласті спектра забезпечується при числах Рейнольдса не менше 10^5 .

У наших дослідах числа Рейнольдса змінювалися від 14000 до 54000, між тим нам вдалося спостерігати інерційну підобласть (рис. 6,7).

З рис.6 видно, що спектри пульсацій за сифонним водовипуском містять невеликий інтервал, протягом якого вони змінюються пропорційно частоті у степені мінус $5/3$. Цей інерційний інтервал знаходиться в межах 8 – 15 рад/с. Причому зміни за законом мінус $5/3$ спектрів, одержаних для початкових створів (на виході з кільця та на початку каналу), існують у більш вузькому інтервалі, ніж для кінцевих створів вимірювання.

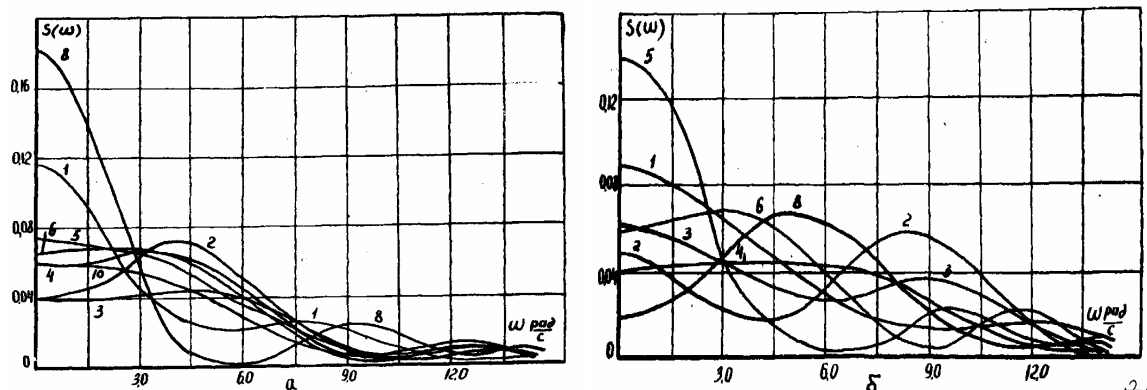


Рис. 6. Спектральні щільності пульсації поздовжньої швидкості за водо-
випускними спорудами з поверхневими затворами:
а – $F_r = 0,07 - 0,09$; б – $F_r = 0,13 - 0,17$; 1 – 10 – створи

Відхилення від закону мінус 5/3 в області низьких частот пояснюється тим, що у більш значних масштабах, які відповідають низьким частотам, турбулентність не можна вважати локально-ізотропною. На рис.7 показано зміну амплітуди спектрів $S(\omega)$, а також початкових частот інерційної підобласті за спорудами з сегментними та плоскими затворами при різних числах Фруда. В спектрах I порядку інерційна підобласть починається з частот $\omega_{in} = 0,9 - 2$ рад/с. Зі зменшенням числа Фруда зменшується параметр ω_{in} та збільшується за абсолютною величиною показник степеня у формулі (2), тобто відбувається більш швидка передача енергії по каскаду та збільшується розмір вихорів, з яких починається каскадний перенос енергії, оскільки анізотропні вихрові утворення є нестійкими та швидко роздроблюються.

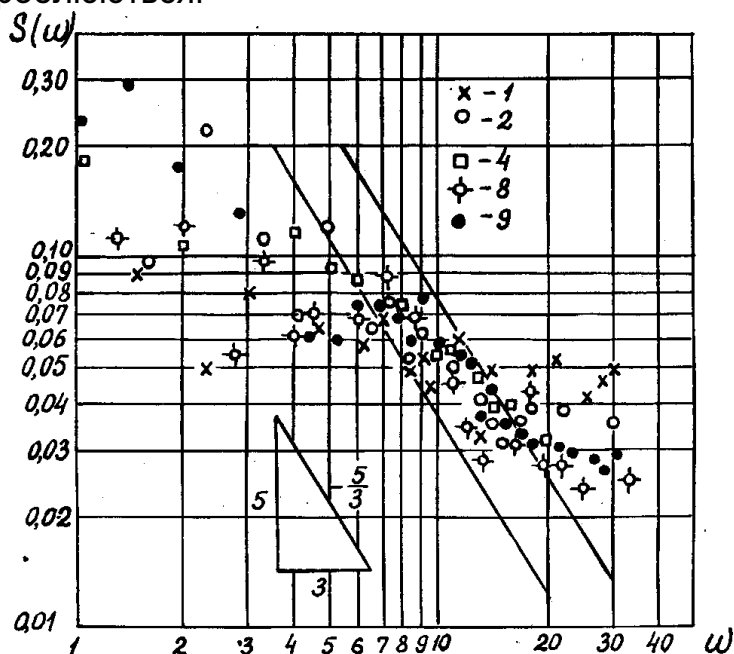


Рис.7. Енергетичні спектри пульсацій швидкості у потоці за трьохтрубною
сифонною водовипускною спорудою ($Q = 5 \text{ м}^3/\text{с}$, $h = 0,6 \text{ м}$):
1, 2, 4, 8, 9 – створи змін

У спектрах II та III порядків, що характеризують стійкі ізотропні вихрові утворення, початкова частота інерційної підобласті збільшується до $\omega_{in} = 6 - 9$ рад/с. Передача енергії по каскаду починається в середовищі дрібномасштабних високочастотних вихорів, показник степеня у формулі (2) також приймає великі за абсолютною величиною значення, що пояснюється малим масштабом вихрових утворень, в межах яких у дію вступають сили в'язкості. Внаслідок цього, чим більше числа Фруда та Рейнольдса, тим далі за частотою посувається інерційна підобласть та тим менше розмір вихорів, з яких починається каскадний перенос енергії спектром.

Це підтверджує гіпотезу, яка викладена у роботі [13], про те, що наявність у потоці стійких вихрових структур може призвести до уповільнення процесу каскадної передачі енергії спектром.

Отже, чим більш стійкі вихрові структури, тим сильніше вони впливають на зміщення інерційної підобласті спектра в зону високих частот та тим коротше стає інерційний інтервал.

Як зазначалось вище, характерною особливістю спектральних кривих I та II порядків є наявність двох чи трьох максимумів, що відображають приплив енергії в областях певних масштабів.

У зв'язку з цим В.І.Нікора [9] виділяє дві зони енергопостачання для русел з рухомим дном. Від вважає, що перша зона пов'язана з нестійкістю осередненого руху, обумовленого роздрібненням потоку грядовою поверхнею дна. Друга зона енергопостачання пов'язана з генерацією вихорів в підвалини гряд з наступним викидом їх у транзитний потік.

У наших дослідженнях на сталій моделі, як показано вище, в спектрах I та II порядків спостерігалися також дві зони додаткового енергопостачання. Очевидно наявність додаткових зон енергопостачання пояснюється не лише зворотною дією ложа русла на структуру потоку. Це явище можна пояснити складною структурою вихрових потоків. Найбільший низькочастотний вихор включає в себе більш високочастотні. Енергія за частотами розподіляється нерівномірно. А тому другий та третій максимуми спектральної кривої вказують на суперпозицію вихорів. У спектрі III порядку енергія рівномірно розподілена за частотами, що й призводить до одного згладженого виступу, як наслідок послідовного накладення дрібномасштабних вихорів.

Висновки

На основі вивчення статистичних характеристик пульсації придонної швидкості за водовипускними спорудами встановлено закон розподілу максимуму придонних швидкостей, дано кореляційні та спектральні аналізи пульсацій швидкостей, а також оцінку розмиваючої здатності потоку.

Список літератури

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 564 с.
2. Гринвальд Д.И. Турбулентность русловых потоков / Д.И.Гринвальд. – Л.: Гометеоиздат, 1974. – 166 с.

3. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса / А.Н. Колмогоров // ДАН СССР. – 1941. – Т. 30, №4. – С.38 – 46.
4. Конт-Белло Ж. Турбулентное течение в канале с параллельными стенками /Ж. Конт-Белло; пер. с франц. – М.: Мир, 1968. – 177 с.
5. Кумин Д.И. Гашение энергии и турбулентность водных потоков в нижнем бьефе водосбросов: автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук/Д.И. Кумин. – Л., 1956. – 22 с.
6. Минский Е.М. Турбулентность русловых потоков / Е.М.Минский. – Л.: Гидрометеиздат, 1952. – 164 с.
7. Монин А.С. Статистическая гидромеханика, Ч.I и II / А.С.Монин, А.М.Яглом. – М.: Наука, 1967. – 639 с.
8. Моулден Т. Турбулентность. Принципы и применение / Т.Моулден, У.Фрост; пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 536 с.
9. Никора В.И. О структуре турбулентности речных потоков с грядовым дном / В.И. Никора // Метеорология и гидрология. –1985. – №6. – С.74–83.
- 10.Обухов А.М. О распределении энергии в спектре турбулентного потока / А.М. Обухов // Известия АН СССР. –1941. –№4 – 5.
- 11.Таунсенд А.А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом / А.А. Таунсенд; пер. с англ. – М.: Иностран. лит-ра, 1959. – 400 с.
- 12.Хинце И.О. Турбулентность, её механизм и теория / И.О. Хинце; пер. с англ. – М.: Физматиздат, 1963. – 680 с.
- 13.Ortiz M.J. Puis de Elvira A. An approximmall determination of some spectral functions turbulent flor – J. mec. Theor. et appl 1984, 3 №1, p.63...68

На основе экспериментальных исследований кинематики потока в придонной части каналов за водовыпускными сооружениями насосных станций получены статистические характеристики пульсаций придонных скоростей и дана оценка размывающих свойств потока.

Водовыпускные сооружения, канал, турбулентность, нижний бьеф, размывающая способность потока.

On the basis of experimental studies of the kinematics of flow in the bottom of the canals with structures issue of water pumping stations received the statistical characteristics of the pulsations of the near-bottom velocities and evaluation of the properties of the flow, which blurs the riverbed.

Construction of the water issue, channel, turbulence, downstream, the flow properties, which blurs the channel.

ОБГРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПАЛИВНИХ УСТАНОВОК ЧЕРЕЗ ФОТОАКТИВАЦІЮ МОЛЕКУЛ-РЕАГЕНТІВ РЕАКЦІЇ ГОРІННЯ

Б.М. Ковалишин, кандидат технічних наук

Проаналізовано можливість підвищення енергоефективності паливних установок за допомогою дії на молекули-реагенти реакції горіння оптичним опроміненням. Обгрунтовано основні параметри оптичного випромінювання, що переводять молекули кисню, азоту, метану і пропану у збуджений стан.

Опромінення, енергія, частота, горіння, молекула, активація.

Основним питанням розвитку економік різних країн на сучасному етапі є зменшення енергетичної складової у вартості промислової і сільськогосподарської продукції. Це пов'язано в першу чергу із термінами вичерпання розвіданих і прогнозованих запасів традиційних вуглеводневих енергоносіїв, які вимірюються кількома десятками років [2, 6]. Продовження термінів використання вугілля, нафти, природного газу та ядерного палива важливе: по-перше – для продовження часу, потрібного на проведення досліджень з обґрунтування принципово нових способів отримання енергії; по-друге – для збільшення термінів використання вуглеводневих ресурсів у хімічній і харчовій галузях; по-третє – для зменшення негативного впливу на довкілля. Активація молекул-реагентів реакції горіння є, на наш погляд, одним із перспективних способів підвищення енергоефективності паливних установок [7], що дозволить збільшити терміни використання невідновлюваних викопних вуглеводневих енергоносіїв, що свідчить про актуальність і своєчасність розв'язання цієї проблеми.

Мета досліджень – обґрунтування способу підвищення ефективності енергогенеруючих установок через використання оптичного опромінення для активації молекул-реагентів реакції горіння газоподібних вуглеводневих палив у повітрі.

Матеріали та методика досліджень. Активація молекул, які беруть участь у хімічних реакціях, може здійснюватися різними способами. До них належать: термоактивація, фотоактивація, ультразвукова активація, активація в магнітному полі, активація в електричному полі, активація швидкими електронами, активація радіоактивними частинками та ін.

В основі процесу теплогенерування лежать окислювально-відновні екзотермічні реакції горіння. Підвищення ефективності цих реакцій є основним питанням хімічної кінетики. Ефективність протікання реакцій горіння залежить від властивостей реагентів; складу, будови та внутрішньої енергії молекул і зовнішніх чинників.

Основним законом хімічної кінетики вважають закон Арреніуса [9]. Головною умовою протікання хімічних реакцій є активованість молекул-реагентів. Закон Арреніуса характеризує можливість протікання хімічних реакцій між молекулами-реагентами і пов'язує константу швидкості хімічної реакції з енергією активації (E_A):

$$k = k_0 e^{-\frac{E_A}{RT}}, \quad (1)$$

де k_0 – передекспоненційна константа; R – газова стала, рівна 1,987 кал/град·моль; T – температура в градусах шкали Кельвіна; e – основа натуральних логарифмів.

Після логарифмування лівої і правої частин рівняння (1) отримаємо формулу:

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_A}{RT}. \quad (2)$$

Для зручності розрахунків, використовують не натуральні, а десяткові логарифми:

$$\lg k = \lg k_0 - \frac{E_A}{4,575T}, \quad (3)$$

де число 1/4,575 – коефіцієнт переведення натуральних логарифмів у десяткові, помножений на величину R .

Енергія активації визначається за формулою:

$$E_A = (\lg k_0 - \lg k) 4,575T. \quad (4)$$

За формулою (4) енергія активації молекул прямо пропорційно залежить від температури.

За нашою робочою гіпотезою для активації молекул-реагентів, крім теплової (E_{AT}), можна також використовувати енергію від інших зовнішніх чинників (E_{AZ}). Якщо ж джерела зовнішньої енергії забезпечують подачу пульсуючої енергії, частота якої відповідає резонансній частоті молекул реагентів, то можна досягти ефекту їх переведення в активний стан із суттєво меншими енергетичними затратами. Доповнивши формулу (4) ефектом дії на молекули-реагенти іншими факторами отримаємо:

$$E_A = E_{AT} - E_{AZ} = [(\lg k_0 - \lg k) 4,575T] - Wb, \quad (5)$$

де W – енергія, отримана від зовнішніх джерел, еВ; b – коефіцієнт використання молекулами-реагентами зовнішньої енергії.

Із формули (5) видно, що тепла енергія активації може бути знижена за рахунок використання інших зовнішніх джерел активації молекул.

До джерел зовнішньої енергії для активації молекул-реагентів належить, наприклад, електромагнітне випромінювання або опромінення потоком заряджених частинок. У роботі [8] описано спосіб отримання молекул із заданими властивостями хімічних зв'язків при дії на них електромагнітним випромінюванням або потоком заряджених частинок. За допомогою потоку електромагнітного та інфрачервоного лазерного випромінювання досягали ініціалізації і збільшення реакційної здатності речовин [1].

Загальна енергія молекули складається з електронної, коливальної та обертальної енергії. Як правило, рух електронів, коливання та обертання молекули вважають незалежними один від одного.

Енергія ізольованої молекули

$$E_{\text{м}} \approx E_{\text{ел}} + E_{\text{кол}} + E_{\text{об}} \quad , \quad (7)$$

де $E_{\text{ел}}$ – енергія руху електронів, еВ; $E_{\text{кол}}$ – енергія коливань ядер, еВ; $E_{\text{об}}$ – енергія, викликана періодичною зміною орієнтації молекули у просторі, еВ.

Співвідношення між трьома основними складовими енергії молекули визначається через відношення мас електронів та ядер атомів у молекулі [10]:

$$E_{\text{ел}} : E_{\text{кол}} : E_{\text{об}} = 1 : \sqrt{m/M} : m/M \quad , \quad (8)$$

де m – маса електрона; M – маса ядер атомів у молекулі.

Формули (7) і (8) не враховують енергію ядер атомів у молекулі та енергію поступального руху центра мас молекули. Це пов'язане з тим, що енергія поступального руху центра мас не має квантової природи, а енергія ядер викликає випромінювання у вигляді спектральних ліній надслабкої інтенсивності.

Оскільки співвідношення $m/M \approx 10^{-5} - 10^{-3}$, то $E_{\text{ел}} \gg E_{\text{кол}} \gg E_{\text{об}}$.

Доведено, що $E_{\text{ел}} \approx 1 - 10$ еВ, $E_{\text{кол}} \approx 10^{-2} - 10^{-1}$ та $E_{\text{об}} \approx 10^{-5} - 10^{-3}$ еВ. Тому у більшості випадків енергію молекули ототожнюють з енергією руху електронів.

При отриманні молекулами квантів енергії, більших за роботу виходу електрона, їх електрони можуть вийти з молекули, тобто проходить процес іонізації молекул [3].

При енергії квантів, меншій за енергію іонізації, але достатній для переведення електрона у збуджений стан, молекула або атом активуються. Активація молекули світлом (фотозбудження) проходить при непружному зіткненні молекули і кванта світла [4]. При достатній енергії кванта електромагнітного випромінювання електрони молекули переходять із стаціонарних енергетичних рівнів на рівні збудження. Для цього енергія падаючого кванта повинна бути достатньою для активації молекули – виконання переходу одного або кількох електронів на рівні збудження.

Результати досліджень. Обґрунтування застосування фотоактивації молекул-реагентів реакції горіння. Фотоактивація молекул – учасників хімічних реакцій полягає у дії на них квантами світла. Молекули переходять на більш високі енергетичні рівні збудження. Рівні збудження поділяються на резонансні (синглетні) і метастабільні (триплетні). Крім відмінностей у величині енергії, резонансні рівні від метастабільних відрізняються часом дисипації [5]. Для резонансних рівнів час дисипації становить $10^{-10} - 10^{-8}$ с. Метастабільні рівні мають час дисипації $10^{-4} - 10^{-2}$ с і більший. Часу перебування молекул-реагентів на резонансних рівнях найчастіше недостатньо для проходження між ними хімічних реакцій. Тому, на нашу думку, молекули-реагенти слід переводити на метастабільні рівні. Енергія квантів світла повинна бути достатня для переведення молекул на метастабільні рівні збудження.

Енергія кванта світла E_c розраховується за формулою

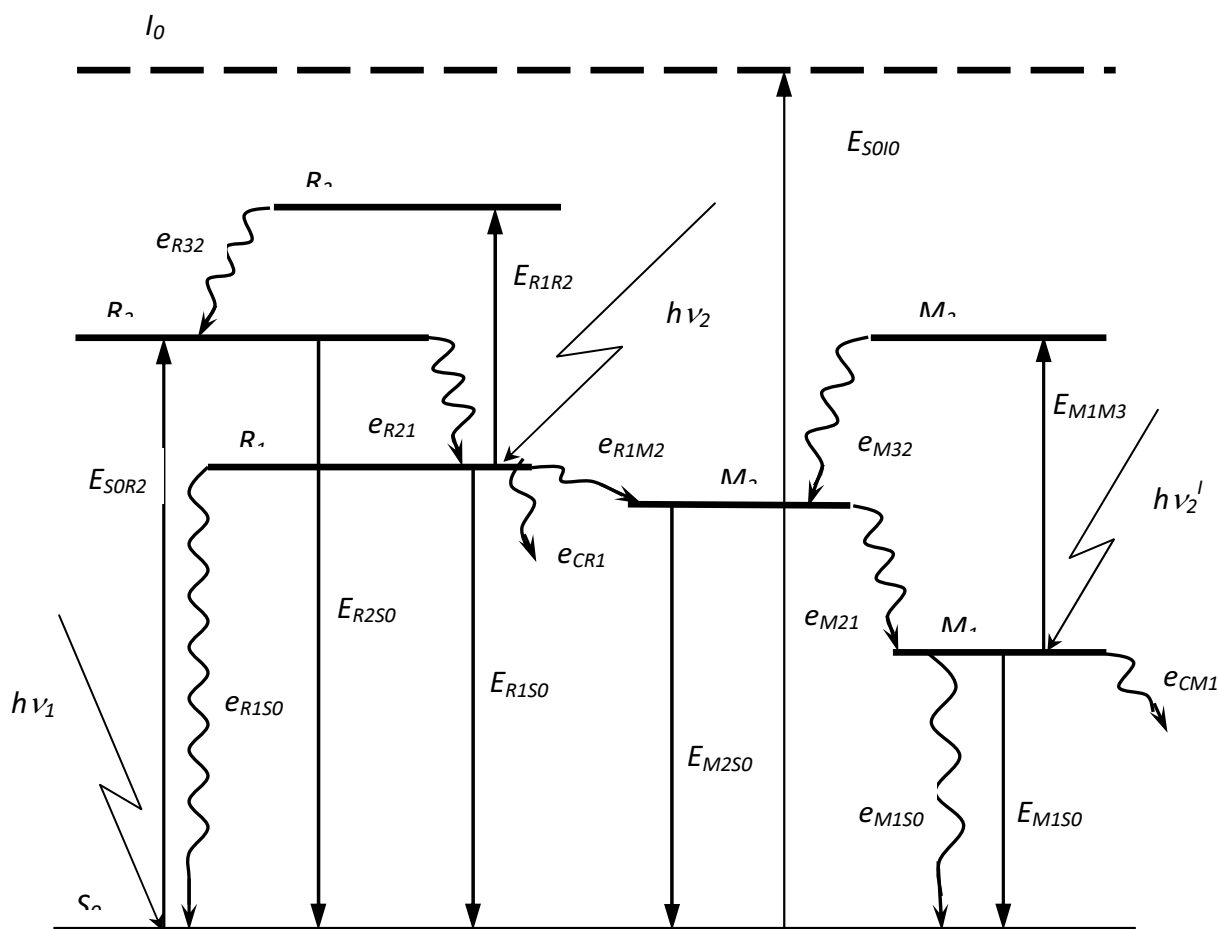
$$E_c = h_0 \nu, \quad (9)$$

де h_0 – стала Планка ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); ν – частота електромагнітної хвилі, Гц.

Можливі шляхи перетворення енергії в молекулі наведено на рисунку.

Первинна енергія надходить до молекули з квантом світлової енергії $h\nu_1$. Якщо енергія кванта рівна або більша за енергію іонізації E_{S0I0} , електрон може покинути молекулу, ставши вільним електроном і утворивши при цьому позитивний іон. При первинному акті переходу молекули на резонансний рівень R_2 витрачається енергія E_{S0R2} , яка залежить від коефіцієнта використання первинної енергії $h\nu_1$. Далі проходить дисипація молекули з переходом її на один з нижчих енергетичних рівнів кількома можливими шляхами:

- на синглетний рівень R_1 з виділенням кванта енергії e_{R21} ;
- на стабільний рівень S_0 з виділенням енергії E_{R2S0} , рівної E_{S0R2} (ідеальна дисипація);
- з R_1 на S_0 з виділенням енергії E_{R1S0} ,
- з R_1 на метастабільний рівень M_2 з виділенням кванта світла e_{R1M2} та кванта енергії e_{CR1} , що характеризує фотохімічну реакцію активованої молекули з іншою молекулою або реструктуризацію.



Діаграма енергетичних рівнів та перетворення енергії в молекулі

При енергетичній дії на молекулу двох і більше фотонів ($h\nu_2$ і $h\nu_2'$) може бути забезпечений перехід її на більш високі енергетичні рівні, відповідно, на R_3 енергією E_{R1R3} і на M_3 – енергією E_{M1M3} . Перехід молекули на нижчі енергетичні рівні може проходити з виділенням порцій енергії, відмінних від оптичної, наприклад – e_{CR1} і e_{CM1} . Ці порції енергії можуть використовуватись на фотохімічну реакцію активованої молекули з іншою молекулою або її реструктуризацію.

Використовуючи дані [11], розрахуємо частоту електромагнітного випромінювання для активації вищезазначених молекул і занесемо результати в таблицю.

Параметри електромагнітного активуючого випромінювання

Молекула	Тип енергетичного рівня	Енергія активації			Частота світла, Гц	Довжина електромагнітної хвилі, нм
		еВ	Дж/молекула	Дж/моль		
Метан	Синглетний	11,00	$17,62 \cdot 10^{-19}$	$10,60 \cdot 10^5$	$2,65 \cdot 10^{15}$	113
	Триплетний	9,00	$14,42 \cdot 10^{-19}$	$8,68 \cdot 10^5$	$2,17 \cdot 10^{15}$	138
Пропан	Синглетний	10,00	$16,02 \cdot 10^{-19}$	$9,64 \cdot 10^5$	$2,41 \cdot 10^{15}$	124
	Триплетний	7,70	$12,34 \cdot 10^{-19}$	$7,42 \cdot 10^5$	$1,86 \cdot 10^{15}$	161
Кисень	Синглетний	9,30	$15,90 \cdot 10^{-19}$	$9,57 \cdot 10^5$	$2,24 \cdot 10^{15}$	134
	Триплетний	4,50	$7,21 \cdot 10^{-19}$	$4,34 \cdot 10^5$	$1,08 \cdot 10^{15}$	278
Азот	Синглетний	13,00	$20,83 \cdot 10^{-19}$	$12,53 \cdot 10^5$	$3,13 \cdot 10^{15}$	96
	Триплетний	7,35	$11,77 \cdot 10^{-19}$	$7,08 \cdot 10^5$	$1,77 \cdot 10^{15}$	169

Як видно із отриманих результатів, переведення молекул на синглетні рівні відбувається при їх опроміненні ультрафіолетовим вакуумним випромінюванням з довжиною хвилі в межах від 96 нм для азоту до 134 нм для кисню. В нормальних умовах отримати випромінювання з такими параметрами проблематично через його поглинання молекулами, найближчими до джерела опромінення. Без спеціальної підготовки параметрів навколишнього середовища переведення вказаних молекул на синглетні рівні недостатньо ефективне.

Переведення молекул-реагентів реакції горіння на триплетні рівні можна здійснити з меншими застереженнями, оскільки діапазон довжин хвиль, у цьому випадку, знаходиться в межах 138 – 278 нм.

Висновки

1. Ефективність паливних установок на газоподібному вуглеводневому паливі підвищується при активації молекул-реагентів реакції горіння.
2. Активацію молекул-реагентів реакції горіння можна здійснювати за допомогою квантів ультрафіолетового випромінювання.
3. Переведення молекул метану, пропану, кисню та азоту на синглетні рівні збудження проводиться опроміненням з довжиною хвилі 96 – 134 нм.

4. Переведення молекул метану, пропану, кисню та азоту на триплетні рівні збудження проводиться опроміненням з довжиною хвилі 138 – 278 нм.

Список літератури

1. Багратишвили В.Н. Многофотонные процессы в молекулах в инфракрасном лазерном поле / Багратишвили В.Н., Летохов В.С., Макаров А.А.– М.: Наука, 1988.– 245 с.
2. Енергетичний менеджмент: навч. посіб. / [А.В. Праховник, В.П. Розен, О.В. Разумовський та ін.].–К.: Київ. нотна ф-ка, 1999.–184 с.
3. Зисман Г.А. Курс общей физики. Т. III / Зисман Г.А., Тодес О.М. –М.: Наука, 1972.– 500 с.
4. Каганов И.Л. Ионные приборы / И.Л.Каганов.– М.: Энергия, 1972.– 528с.
5. Капцов Н.А. Электроника / Н.А. Капцов.– М.: Гостехиздат, 1954.– 470 с.
6. Корчемний М. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. – Тернопіль: Підручники і посібники, 2001.– 976 с.
7. Пат. № 17392 Україна, МКП В01J 19/08/ Спосіб отримання молекул з заданими властивостями хімічних зв'язків/ Мельников В.М., Усачов А.В. (Україна)/ заявл. 27.12.1994; опубл. 15.04.1997. Бюл. №0.
8. Пат. №37572 Україна, МКП F23C 99/00/ Спосіб підвищення ефективності паливних установок на вуглеводневому паливі та пристрій для його реалізації/ Ковалишин Б.М. (Україна)/ заявл.28.07.2006; опубл. 10.12.2008. Бюл. №23.
9. Физическая химия / [под ред. К.С. Краснова].-М.: Высш. шк., 2001.– 512 с.
10. Фізика / Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Ільчук Г.А., Романишин Б.М. – Львів: Афіша, 2005. – 386 с.
11. http://garfield.web.cern.ch/garfield/help/garfield_41.html

Проанализирована возможность повышения энергоэффективности топливных установок посредством воздействия на молекулы реагенты реакции горения оптическим облучением. Обоснованы основные параметры оптического излучения, которые переводят молекулы кислорода, азота, метана и пропана в возбужденное состояние.

Облучение, энергия, частота, горение, молекула, активация.

The possibility of improving the fuel efficiency of plants using molecular reagents for the combustion of optical radiation. Reasonable basic parameters of optical radiation transferred molecules of oxygen, nitrogen, methane and propane in the excited state.

Irradiation, energy, frequency, burning, molecule, activation.

ОЦІНКА ВПЛИВУ РЯДУ ФАКТОРІВ НА ЕРОЗІЮ В ПОЧАТКОВІЙ ФАЗІ ДУГИ ВІДКЛЮЧЕННЯ

А. М. Мрачковський, кандидат технічних наук

Розглянуто ступінь впливу сукупності факторів (струм, час загорання дуги, зазор, полярність електродів) на електроерозійну стійкість і перехідний опір комутаційних апаратів у процесі їх експлуатації.

Досліджено вплив міжконтактного проміжку, сили струму відключення і матеріалу електродів на величину електричної ерозії контактів.

Електрична ерозія, міжконтактний проміжок, електроди, розривні контакти, енергія, катод, анод, комутуючий струм, перегрів.

Мета досліджень – вивчення впливу факторів електричної дуги відключення на ерозійну стійкість контактів і виявлення особливостей масопереносу матеріалу контактів.

Матеріали та методика досліджень. Умови експлуатації і сукупність факторів електричної дуги відключення (зазору, матеріалу і стану поверхні електродів) значно впливають на термін служби комутаційних апаратів, який становить у середньому 1–3 роки. Причиною невеликого терміну служби контакт-деталей реле є електрична ерозія з направленим масопереносом з катода на анод при комутації кіл постійного струму. На електричну ерозію впливають такі фактори, як величина струму, характер навантаження, час горіння дуги, середовище, в якому відбувається дуговий розряд, форма контакт-деталей та їх матеріал, швидкість розмикання і технологія виготовлення контакт-деталей. Вплив численних факторів на ерозію можна виразити так:

$$\Delta V_z = f(I^\alpha; t^\beta; \delta^\gamma; H^\chi \dots),$$

де I – струм, А; t – час загорання дуги, с; δ – зазор, мм; H – напруженість поля магнітного дуття, А/м; $\alpha, \beta, \gamma, \chi$ – коефіцієнти.

Результати досліджень. Для оцінки ступеня впливу того чи іншого фактора на ерозію необхідно мати результати дослідів, в яких цей параметр виступає в ролі незалежної змінної, в той час як вплив інших має бути приведений до мінімального або лишатися постійним.

Незалежними змінними в наших дослідях виступають тривалість існування дуги і комутований струм. Проте отримана картина змін $\Delta V_z = f(t)$ (рис.1) утруднює проведення оцінки ступеня їх участі, оскільки залежно від ділянки розгляду ступінь впливу різний, тому проводимо оцінку впливу факторів відповідно до тієї або іншої ділянки залежності $\Delta V_z = f(t)$.

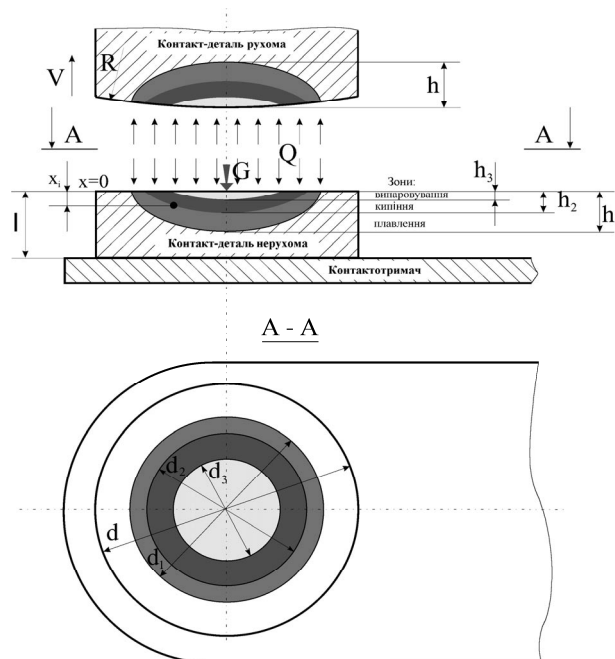


Рис. 1. Схематичне зображення глибини проплавлення h контакт-деталей при комутації струму

Вплив проміжку. При невеликих відстанях між контактами практично вся енергія, яка виділяється в процесі дугового розряду, відводиться в електроди. Це викликає розігрів металу до високих температур в опорних точках взаємодії каналу розряду з електродами, що призводить до випаровування, яке забезпечує доступ відповідної кількості нейтральних атомів у розрядний проміжок. Однак у підтриманні розряду бере участь лише незначна частина від загальної кількості «нейтралів», що надійшли. Решта дифундує в навколишнє середовище та осідає на електродах. При встановленні квазістаціонарних умов необхідна кількість «нейтралів» для підтримки довжини каналу розряду при постійності навколишніх умов буде незмінна. Зі збільшенням довжини каналу розряду необхідна кількість «нейтралів» повинна зростати непропорційно. Це пояснюється такими факторами.

По-перше, зі зростанням розміру проміжку у випадку дуги постійного струму пропорційно зростає енергія, що виділяється в міжконтактному проміжку. Енергія зі все більш зростаючим ступенем почне відводитися в навколишнє середовище і все в меншій мірі – в контакти.

По-друге, відведення енергії буде супроводжуватися зростаючою дифузією «нейтралів» у навколишнє середовище та одночасно оберненим процесом проникнення «холодних» часток навколишнього середовища в канал розряду.

По-третє, ступінь дії на канал розряду зовнішніх факторів (повітряного чи магнітного дуття) зростає.

По-четверте, зі зростанням зазору і збільшенням розміру проміжку зростає ймовірність розкиду і відхилення факельних струменів, що виходять із опорних точок на електродах, від напрямку каналу розряду.

Крім того, після встановлення квазістаціонарного стану будь-яке додаткове підведення енергії повинно призводити до непропорційного (вибухоподібного) зростання швидкості випаровування, що вказує про непропорційність впливу проміжку на ерозію.

Зростання втрат матеріалу електродів зі збільшенням проміжку може продовжуватись до певної межі. Це визначається енергетичними співвідношеннями, оскільки зі збільшенням проміжку зростає частина енергії, яка відводиться в навколишнє середовище, з іншого боку, відбувається зростання ступеня навколишнього середовища у підтримці розряду, що призводить до зростання енергії, яка виділяється в проміжку, і максимум настає в момент $\Delta V_z = f(t)$.

Таким чином, при зміні абсолютної довжини дуги, розміщеної всередині міжконтактного проміжку, витрати матеріалу електродів будуть зростати доти, поки дуга не розвиватиметься до значних розмірів і не покине електроди. У випадку нерухомих опорних точок дуги знос буде посилюватися такими гідро- і газодинамічними процесами, що призводять до значних викидів рідкої фази і залежать від потужності дуги відключення.

Вплив струму відключення. З аналізу результатів численних експериментів випливає, що ступінь впливу струму відключення має найбільший діапазон від 1,2 до 3,0.

У зв'язку зі складною закономірністю зміни ерозії в початковій фазі результати оцінки впливу струму здійснені на межі переходу відповідних ділянок. Результати аналітичної оцінки зведені до табл.1, з якої видно ще більший діапазон зміни показників ступеня від 0,36 до 3,12.

1.Значення показника ступеня α залежно від моменту існування початкової фази дуги

Групи ділянок			
I-II	II-III	III-IV	IV-V
1,31 – 1,8	0,36 – 2,02	0,36 – 2,42	1,28 – 3,12
1,38 – 1,86	1,45 – 2,59	1,54 – 2,62	1,6 – 2,66

Залежно від умов комутації обрив дуги відключення трапляється в той момент часу, який призводить до відповідних обмежень розвитку початкової фази дуги відключення. Залежно від умов комутації гасіння дуги буде проходити при різній величині проміжку (табл. 2).

2. Значення показника ступеня α залежно від тривалості існування дуги

Час t , мс										
1,0	2,0	3,0	4,0	4,5	5,5	8,5	9,5	10	13,0	17,0
1,35–	1,385	2,05–	2,48–	1,97–	0,31–	1,385	2,12–	2,34–	1,795	1,23–
1,85	–3,34	1,80	1,58	2,14	4,00	–3,4	3,09	3,09	–3,09	3,09

Отримані оцінки вказують на непостійність ступеня впливу струму комутації на ерозію. Це пояснюється зміною механізму руйнування матеріалу електродів у паровій, рідкій і крапельно-твердій фазах, тому засто-

совувати питомі величини $[cm^3/(kA \cdot s)]$ для розрахунку ерозії потрібно досить обережно.

Вплив полярності електродів на знос. У замкнутих контактах із однорідного матеріалу за рахунок тунельного ефекту відбувається перегрівання анода. Це призводить до великих розмірів зон проплавлення на аноді при розімкненні контактів, більшою участю матеріалу анода в утворенні рідкометалевого моста. Як наслідок цього виникає направлений мостовий перенос з анода на катод, що викликає зміну геометрії контактуючих поверхонь з утворенням «піків» на катоді та «кратерів» на аноді.

Експериментально були визначені співвідношення між теплофізичними постійними матеріалів контактних пар, при дотриманні яких буде спостерігатись саморегульований перенос при розімкненні контактів з малими струмами навантаження. Тобто при комутації ланцюгів із іскровою чи короткочасною дуговою формами розрядів шляхом підбору матеріалів при зіставленні контактних пар вдається знизити і зрівняти знос контактуючих елементів.

У випадку сильнострумових розрядів після руйнування моста під дією прикладеної напруги між контактами розвивається дуговий розряд. Участь матеріалу зруйнованого моста у підтримці наступного розряду дуже незначна, основна «маса» нейтральних часток надходить у канал розряду з електродів із опорних точок дуги. Оскільки в процесі розвитку дугового розряду змінюється його структура (частка електронної та іонної провідності) і розміри зон ураження на електродах, повинно змінюватись відношення потужності, яка виділяється на аноді, до потужності, що виділяється на катоді.

Відмінності в природі частинок, їх енергетичному балансі і механізмі передачі енергії призводять до відмінності процесів, які відбуваються на поверхні катода та анода.

Закономірності ерозії анода залежать від процесів, які відбуваються в прианодній області дуги, і в першу чергу від характеру взаємодії електронів з атомами анода, які знаходяться в пароподібному стані. Електрони, що надходять із позитивного стовпа дуги і прискорені в області анодного падіння, виробляють іонізацію випаруваних з анода атомів. Вивільнювані при іонізації електрони доповнюють основний струм, і їх кількість буде тим більша, чим нижче енергія іонізації атомів анода. Збільшення анодного падіння потенціалу відбувається як за рахунок зменшення потенціалу позитивного стовпа дуги, так і за рахунок більш інтенсивного зменшення позитивного і збільшення негативного об'ємних зарядів. Це супроводжується дифузними процесами, електричним полем дуги, а також анодними і катодними факельними потоками рідин, що випаровуються з електродів. Перераховані явища дозволяють зробити висновок, що електрична ерозія, а отже й енергія, яка підводиться до анода, залежать від потенціалу іонізації атомів анода.

Проте в іскрових розрядах ерозія анода зіставна з ерозією катода чи більше її. Це спостерігається в електричних розрядах, які тривають досить короткі проміжки часу, або при надзвичайно невеликих відстанях між

електродами. Через малу рухливість іонів при короткотривалій дії розряду лише невелика частина їх досягає катода і віддає йому свою енергію. Зменшення кількості іонів, що бомбардують катод, призводить до зниження його ерозії.

Таким чином, ерозія катода та анода в дуговому розряді залежить від елементарних процесів, які відбуваються в приелектродній зоні дуги і на поверхні електродів, тобто від енергії іонізації атомів і їх кількості, а також від енергії збудження метастабільних станів атомів. Оскільки теплові процеси інерційні, на співвідношення між ерозією анодного і катодного електродів суттєво буде впливати тривалість розряду. Крім того, збільшення тривалості існування розряду на одному місці призводить до зниження щільності струму в опорних точках дуги, розширенню каналу стовпа дуги і до збільшення іонної частки провідності каналу стовпа дуги. Збільшення ж числа іонів, які бомбардують катод, викликає його інтенсивне руйнування.

Крім зовнішніх факторів, на розміри і характер ерозії сильно впливає матеріал електродів. Переважна ерозія анода з переносом на катод характеризує так звану дугу «анодного» типу, і відповідно переважна ерозія катода з переносом на анод – дугу «катодного» типу. Із досліджених нами матеріалів лише на молібдені спостерігається дуга «катодного» типу, в решті випадків – дуга «анодного» типу. Цю обставину слід приймати до уваги як при зіставленні різноманітних контактних пар, так і при поясненні результатів ерозії анодного і катодного електродів.

Розглянуті процеси на електродах різних полярностей призводять до висування різноманітних вимог до теплофізичних властивостей матеріалів для забезпечення мінімуму ерозії, при чому ці вимоги залежать від режиму існування опорних точок дуги в процесі комутації.

Висновки

1. При зміні довжини дуги, розміщеної всередині міжконтактного проміжку, витрати матеріалу електродів будуть зростати доти, поки дуга не розвиватиметься до значних розмірів і не покине електроди.
2. Встановлено нелінійну залежність зміни електричної ерозії контактів від сили струму, числа комутацій та фізико-механічних властивостей контактного матеріалу.
3. Швидкість електричної ерозії непостійна, спочатку випробувань – максимальна, а при певних струмах (5–7 А) – мінімальна, що вказує на формування у поверхневому шарі матеріалу оптимальної мікроструктури з точки зору опору електричної ерозії.
4. Ерозія катода та анода в дуговому розряді залежить від енергії іонізації атомів і їх кількості, а також від енергії збудження метастабільних станів атомів.

Список літератури

1. Белкин Г.С. Влияние теплофизических свойств материала контактов на величину электрической эрозии / Г.С.Белкин. // Электричество. – 1970. – №2. – С.2.
2. Белкин Г.С. Исследование особенностей электрической эрозии металлокерамических материалов / Г.С.Белкин, М.Е.Данилов. // Электричество. – 1972. – №8. – С.45–48.
3. Жаворонков М.А. О влиянии скорости размыкания на дуговую эрозию контактов / М.А. Жаворонков. – К.: Изд-во АН УССР, 1972. – 258 с.
4. Кузнецов Р.С. Износ контактов разнородных материалов / Р.С. Кузнецов. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1986. – 544 с.
5. Омельченко В.Т. Мостиковая эрозия электрических контактов / В.Т. Омельченко. // Вестник ХПИ – 1967. – №19 (67). – С. 8–9.

Рассмотрена степень влияния совокупности факторов(ток, время возгорания дуги, зазор, полярность электродов) на электроэрозионную стойкость и переходное сопротивление коммутационных аппаратов в процессе их эксплуатации.

Исследовано влияние межконтактного промежутка, силы тока отключения и материала электродов на величину электрической эрозии контактов.

Электрическая эрозия, межконтактный промежуток, электроды, разрывные контакты, энергия, катод, анод, коммутирующий ток, перегрев.

The degree of influence of totality of factors (current, time of ignition of arc, gap, polarity of electrodes) is considered on electro-erosive firmness and transitional resistance of interconnect vehicles in the process of their exploitation.

Influence of inter pin interval, strength of current of disconnecting and material of electrodes are investigational on the size of electric erosion of contacts.

Electric erosion, between a pin interval, electrodes, bursting contacts, energy, cathode, anode, current, overheated.

УДК 621.311.21

ЭКОНОМИКА СТРОИТЕЛЬСТВА МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

***Н.А. Палишкин, кандидат технических наук
И.А. Мищенко, кандидат экономических наук***

Выполнен сравнительный анализ экономических показателей малых гидроэлектростанций разных типов. Показано, что использование типовых проектов и серийного гидроэнергетического оборудования позволяет на треть сократить затраты на строительство малых гидроэлектростанций.

Список літератури

1. Белкин Г.С. Влияние теплофизических свойств материала контактов на величину электрической эрозии / Г.С.Белкин. // Электричество. – 1970. – №2. – С.2.
2. Белкин Г.С. Исследование особенностей электрической эрозии металлокерамических материалов / Г.С.Белкин, М.Е.Данилов. // Электричество. – 1972. – №8. – С.45–48.
3. Жаворонков М.А. О влиянии скорости размыкания на дуговую эрозию контактов / М.А. Жаворонков. – К.: Изд-во АН УССР, 1972. – 258 с.
4. Кузнецов Р.С. Износ контактов разнородных материалов / Р.С. Кузнецов. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1986. – 544 с.
5. Омельченко В.Т. Мостиковая эрозия электрических контактов / В.Т. Омельченко. // Вестник ХПИ – 1967. – №19 (67). – С. 8–9.

Рассмотрена степень влияния совокупности факторов(ток, время возгорания дуги, зазор, полярность электродов) на электроэрозионную стойкость и переходное сопротивление коммутационных аппаратов в процессе их эксплуатации.

Исследовано влияние межконтактного промежутка, силы тока отключения и материала электродов на величину электрической эрозии контактов.

Электрическая эрозия, межконтактный промежуток, электроды, разрывные контакты, энергия, катод, анод, коммутирующий ток, перегрев.

The degree of influence of totality of factors (current, time of ignition of arc, gap, polarity of electrodes) is considered on electro-erosive firmness and transitional resistance of interconnect vehicles in the process of their exploitation.

Influence of inter pin interval, strength of current of disconnecting and material of electrodes are investigational on the size of electric erosion of contacts.

Electric erosion, between a pin interval, electrodes, bursting contacts, energy, cathode, anode, current, overheated.

УДК 621.311.21

ЭКОНОМИКА СТРОИТЕЛЬСТВА МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

***Н.А. Палишкин, кандидат технических наук
И.А. Мищенко, кандидат экономических наук***

Выполнен сравнительный анализ экономических показателей малых гидроэлектростанций разных типов. Показано, что использование типовых проектов и серийного гидроэнергетического оборудования позволяет на треть сократить затраты на строительство малых гидроэлектростанций.

Удельные затраты, эффективность, гидроэлектростанция, турбина, плотина, мощность.

Экономические показатели малых гидроэлектростанций (МГЭС) зависят от вида гидроузла – возводится ли новый гидроузел или модернизируется и реконструируется существующий. Большое влияние на экономические показатели МГЭС оказывает уровень стандартизации существующего гидроэнергетического оборудования – индивидуальное или серийное. В ряде случаев в качестве турбин могут использоваться насосы, выпускаемые серийно для других целей. Определенное влияние на экономические показатели МГЭС может оказать типизация проектных решений, автоматизация разработки проектной документации

Цель исследований – выявление факторов, влияющих на экономическую эффективность строительства и реконструкцию малых гидроэлектростанций.

Материалы и методика исследований. Использовались общие и специальные методы научного познания: сравнительного анализа, систематизации и обобщения.

Результаты исследований. По данным ряда зарубежных фирм (например, фирмы «Allis-Chalmers») удельные затраты для вновь сооружаемых гидроэлектростанций (ГЭС) мощностью до 10 МВт составляют 1100...1400 \$/кВт, а для ГЭС мощностью до 1 МВт – 6800...8700 \$/кВт. Для ГЭС, вводимых в составе эксплуатируемых гидроузлов, удельные затраты составляют 500...2000 \$/кВт.

В Швейцарии удельные затраты на строительство МГЭС составляют 1800...2300 \$/кВт, в Англии – до 2500 \$/кВт, в Японии – 2300...3000 \$/кВт. В США удельные показатели тепловых электрических станций (ТЭС) на органическом топливе – 1500 \$/кВт, АЭС – 2000 \$/кВт, крупных ГЭС – 1750 \$/кВт [6]. При этом стоимость 1 кВт·ч производимой электроэнергии составляет: на ГЭС мощностью до 10 МВт – 0,018...0,024 \$. Из сказанного следует, что стоимость произведённой электроэнергии на МГЭС сопоставима, а часто, и ниже стоимости электроэнергии, вырабатываемой на ТЭС.

Удельные затраты на МГЭС в Украине в 80-х годах прошлого века изменялись в зависимости от мощности – 200...1300 руб/кВт. В большинстве случаев эта величина не превышала 600...700 руб/кВт и только при особо сложных условиях строительства удельные капиталовложения превышали 1000 руб/кВт [3].

С уменьшением мощности МГЭС увеличиваются удельные капиталовложения, причём, особенно значительно при мощности гидроэлектростанции меньше 100 кВт (например, при мощности гидроэлектростанции 23... 100 кВт удельные затраты составляли 1000...3610 руб/кВт) [3].

Наиболее дорогостоящими являются русловые ГЭС. Их стоимость на 5...10 % больше приплотинных ГЭС. Наименьшие капиталовложения требуются при сооружении деривационных ГЭС, стоимость которых в среднем на 10 % ниже приплотинных.

Себестоимость электроэнергии изменялась от 0,2 до 2,6 коп/(кВт·ч). Наименьшую себестоимость имели гидроэлектростанции, мощность которых больше 1000 кВт. На действующих в настоящее время двух ГЭС мощностью 175 и 327 кВт себестоимость электроэнергии составила 1,56 коп/(кВт·ч). Для малых гидростанций характерна иная, чем для крупных ГЭС, структура затрат на строительство.

Так, затраты на технологическое оборудование малых ГЭС сопоставимы со стоимостью строительно-монтажных, а, иногда, и превышают её. Это видно из сопоставления структуры затрат на крупных и малых ГЭС по данным Международной электротехнической комиссии [2] (табл. 1).

1. Структура затрат на крупных и малых ГЭС

Мощность/напор ГЭС	Структура затрат, %		
	Строительно-монтажные работы	Оборудование	Проектирование
625 МВт/16 м	80	15	5
1,5 МВт/14 м	30–35	50–60	10–15

В случае сооружения малой ГЭС в составе готового напорного фронта и при строительстве в новом створе капиталовложения распределяются следующим образом (табл. 2).

2. Структура затрат на МГЭС при реконструкции и при новом строительстве

Гидро-узел	Структура затрат, %					
	Строительные работы	Основное гидроэнергетическое оборудование	Проектно-изыскательские работы	Непредвиденные расходы	Вспомогательное оборудование	Прочее оборудование
МГЭС в составе готового напорного фронта	15	39	20	10	11	5
МГЭС в новом створе	45	18	20	10	4	3

Структура затрат, определённая по 25 построенным в КНР малым ГЭС мощностью 150...2500 кВт (Н=4,2...612 м) выглядит так: строительные работы – 42...65 %, оборудование – 31...48 %, строительство линий электропередачи – 4...14 %.

Структура затрат на сооружение МГЭС в Финляндии, полученная на основе анализа проектных проработок 50 гидростанций, приведена в табл. 3.

В Украине затраты на малые ГЭС распределялись так: гидротехнические сооружения – 48,7 %, здания ГЭС, водозабор – 24,7 %, гидромеханическое и электрическое оборудование – 22,6 % [5].

3. Структура затрат на сооружение МГЭС в Финляндии

Мощность МГЭС, МВт	Структура затрат, %				
	Здание ГЭС	Плотина и водоводы	Механическое оборудование	Электрическое оборудование	Прочие расходы
5	19	21	29	17	14
5...10	25	22	19	17	17
Более 10	21	18	18	15	28

Технико-экономические показатели малых ГЭС улучшаются при комплексном использовании гидроузла ГЭС. По расчётам американской фирмы «Allis-Chalmers» при наличии готового напорного фронта удельные капиталовложения в ГЭС снижаются на 30...50 %. Способствует снижению затрат на малые ГЭС применение стандартных и типичных решений. Эффект от внедрения стандартизированного оборудования может составить от 10...50 % общих затрат на оборудование.

Важным фактором повышения эффективности проектирования и строительства малых ГЭС является сокращение сроков их исполнения. Благодаря широкому использованию типовых и унифицированных проектов многие иностранные фирмы обеспечивают ввод ГЭС в эксплуатацию через 12...15 мес. после получения заказа [2].

Как показывает опыт строительства малых ГЭС на Украине, проектный срок строительства в зависимости от местных условий составлял 1...2 года. Однако, в большинстве случаев, эти сроки растягивались на 3...8 лет. Кроме сокращения сроков строительства, применение типовых проектов позволяет уменьшить стоимость проекта малой ГЭС. Поэтому унификация проектных решений малых ГЭС является актуальной задачей.

В табл. 4 приведена структура затрат на МГЭС (N=500 кВт, H=18 м; готовый напорный фронт) в зависимости от вида проектирования [3].

4. Структура затрат на МГЭС по индивидуальному и типовому проектам (по данным фирмы «Allis-Chalmers»)

Статья расхода	Стоимость*	
	Индивидуальный проект	Типовой проект
Турбина	150/30	140/37
Проектирование	130/26	40/11
Мультипликатор	45/9	40/11
Затвор на входе	40/8	35/9
Гидротехнические сооружения	35/7	25/8
Прочие сооружения	100/20	95/25
Всего	500/100	375/100

* В числителе стоимость в тыс. \$, в знаменателе – в %.

Многие зарубежные фирмы считают, что использование унифицированных (типовых) проектов возможно только для малых ГЭС мощностью до 5 МВт. Строительство малых ГЭС большей мощности следует вести по индивидуальным проектам.

По данным американских специалистов стоимость строительства малых ГЭС со стандартным оборудованием увеличивается с уменьшением напора и увеличением мощности ГЭС. Этот же вывод подтверждают и данные о стоимости строительства малых ГЭС в Норвегии.

С целью снижения стоимости строительства малых ГЭС стремятся к уменьшению затрат на проектирование, строительство и эксплуатацию. Для этого зарубежные фирмы на стадии проектирования малых ГЭС широко используют типовые компоновочные решения, унифицированное энергетическое и гидромеханическое оборудование, стандартные, серийно выпускаемые промышленностью, детали и изделия.

Расчёты конструктивных размеров сооружений осуществляются с применением упрощённых методов, что позволяет при незначительном увеличении строительных объёмов существенно снизить стоимость проектно-изыскательских работ. Для снижения расходов дорогостоящих материалов (металла, цемента) предпочтение отдаётся сооружениям из грунта, камня, дерева, полимерных материалов.

При разработке проекта организации строительных работ стараются уменьшить необходимость возведения перемычек и применения сложных схем перекрытия русел рек. Строительство ведётся, как правило, «с колёс», без использования специальных производственных предприятий и баз, с применением серийных строительных машин и механизмов. Малые ГЭС проектируют полностью автоматизированными с дистанционным управлением всеми технологическими процессами, при этом количество технологических операций стараются свести к минимуму.

В конструкциях сооружений необходимо предусматривать возможность быстрой замены элементов гидромеханического и вспомогательного оборудования для их ремонта на специализированных предприятиях. Ремонт основного гидромеханического и энергетического оборудования (гидротурбин и генераторов) также производится путём замены отдельных блоков и узлов.

Турбинные гидроагрегаты для малых ГЭС производят многие фирмы США, Японии, Швеции, Австрии, Швейцарии, Франции, Финляндии, Англии и других стран [1,3,6]. Стандартизованное оборудование для малых ГЭС выпускается с широким диапазоном параметров: напоры – 1...1000 м, расходы до 75 м³/с, мощность – 2...15000 кВт, диаметры рабочего колеса турбин – 190...3000 мм. Синхронные и асинхронные генераторы производят на напряжение 380...6300 В при частоте 50 и 60 Гц. Например, в США основным производителем для малых ГЭС является фирма «Allis-Chalmers», выпускающая стандартизованные гидроагрегаты, среди которых 12 моделей мощностью 25...1000 кВт на напоры до 30 м. В номенклатуру фирмы «Эксел Джонсон Инжиниринг» (Великобритания) входят агрегаты мощностью 100...1000 кВт с радиально-осевыми, пропеллерными и ковшовыми турбинами. Оборудование, включая затворы, регуляторы, мультипликаторы, панели управления и др. поставляется как в комплекте, так и отдельными узлами.

Австрийская фирма «Фест-Альпин» производит гидроагрегаты мощностью 10...5000 кВт с горизонтальным и вертикальным валом. Фирма «Кесслер» (Германия) выпускает стандартизованное оборудование широкой номенклатуры, где представлены так называемые «трубные турбины» с горизонтальным, наклонным и вертикальным валом. Они изготавливаются в шести вариантах, 15 типоразмеров ($D_1=500\ldots3000$ мм. для напоров 1...30 м с расходом 1...75 м³/с и мощностью 50...5000 кВт). Ковшовые турбины мощностью 10...15000 кВт выпускаются на напоры 20...1000 м.

В Российской Федерации Сызранским Турбостроительным заводом при участии НПО УКТИ и ПО «Санкт-Петербургский металлический завод» разработаны эскизные проекты основных типов параметрического ряда унифицированных гидротурбин для малых ГЭС. Эти турбины по условиям работы разделены на пять групп и рассчитаны на расходы 1...30 м³/с, напор 5...150 м и мощность – 160...7000 кВт. Этот ряд включает пропеллерные, радиально-осевые турбины в горизонтальном и вертикальном исполнении. В проектах турбин предусмотрена максимальная унификация и типизация узлов и деталей, блочная и комплексная поставка с максимальной заводской готовностью. Разработан проект управления ГЭС с использованием микропроцессорной техники.

В настоящее время в Российской Федерации фирмы МАГИ, ИНСЕТ, РАНД наладили производство турбин для малых ГЭС с напорами 4...20 м и 40...180 м. Отличительной особенностью предлагаемых агрегатов является использование классической схемы гидротурбин с регулируемым направляющим аппаратом. Применение в них электромеханического привода с микропроцессорной системой управления и диагностики. Вместо гидромеханических регуляторов используются электронные средства управления, что повышает надёжность работы агрегата в автоматическом режиме.

Расчёты, выполненные институтом «Гидропроект» [4], показывают, что значения предельно допустимых капиталовложений в малые ГЭС сильно колеблются в зависимости от района из расположения, капиталовложений в заменяемую ТЭС, стоимости топлива и продолжительности использования установленной мощности. Для районов, находящихся в зоне влияния энергетических систем, диапазон значений предельно допустимых удельных капиталовложений в малые ГЭС составляют 795...1040 руб/кВт в случае 50 % вытеснения мощности и 260...500 руб/кВт при отсутствии вытеснения мощности. Указанные величины допустимых удельных капиталовложений показывают, что сооружение малых ГЭС будет достаточно эффективным в изолированных районах.

Можно отметить, что в ряде случаев малая ГЭС не может рассматриваться в качестве вытесняющей, а может рассматриваться как дублирующая. Экономическая эффективность таких ГЭС определяется экономией топлива.

Выводы

Для оценки экономической целесообразности использования энергии малых и средних рек в Украине следует проанализировать материалы по действующим и законсервированным малым ГЭС. Необходимо комплексное технико-экономическое обоснование строительства новых и реконструкции, восстановления, заброшенных МГЭС.

Список литературы

1. Карелин В.Я. Сооружения и оборудование малых ГЭС / В.Я. Карелин, В.В. Волшаник. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 186 с.
2. Малинин Н.К. Экономика малой гидроэнергетики за рубежом / Н.К. Малинин, М.Г. Тягунов // Гидротехническое строительство. – 1983. – №12. – С. 34–37.
3. Малинин Н.К. Малая гидроэнергетика за рубежом / Н.К. Малинин, М.Г. Тягунов // Гидротехническое строительство. – 1983. – №6. – С. 49–52.
4. Михайлов Л.П. Малая гидроэнергетика и перспективы её развития / Л.П. Михайлов, А.Ш. Резниковский, Б.Н. Фельдман // Гидротехническое строительство. – 1983. – №8. – С. 5–7.
5. Подгорінов А.Л. Гідроенергетичне використання малих річок / А.Л. Подгорінов, Л.С. Хилобоченко. – К.: Вид-во АН УРСР, 1959. – 195 с.
6. Фельдман Б.Н. Состояние и тенденции развития малой гидроэнергетики / Б.Н. Фельдман, Т.К. Марканова, М.И. Серёгина // Энергет. стр-во за рубежом. – 1987. – №3. – С. 14–17.

Виконано порівняльний аналіз економічних показників малих гідроелектростанцій різних типів. Показано, що використання типових проектів і серійного гідроенергетичного обладнання дозволяє на третину скоротити витрати на будівництво малих гідроелектростанцій.

Питомі витрати, ефективність, гідроелектростанція, турбіна, гребля, потужність

A comparative analysis of the economic performance of small hydroelectric power plants of various types. It is shown that the use of standard designs and series of hydropower equipment allows to reduce by one third the cost of construction of small hydro power plants.

The unit costs, efficiency, hydro power plant, turbine, dam, power.

ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНОСТІ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ В АВТОНОМНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

***А.О. Пальчик, кандидат технічних наук
Тернопільський національний педагогічний університет
ім. В. Гнатюка***

***А.Л. Яржемський, аспірант*
Національний університет біоресурсів
і природокористування України***

Досліджено закономірності вибухових концентрацій повітря і генераторного газу для усунення вибухонебезпечності в автономній системі електроживлення на основі піролізних котлів.

Генераторний газ, вибухонебезпечність, вибухова суміш.

Нині значний науковий потенціал розвинених країн світу орієнтований на розробку нових і модернізацію існуючих технологій генерації електроенергії, використання таких відновлювальних джерел, як вітровий потік, сонячна радіація, енергія біомаси та енергія геотермального потенціалу земної кори. Інтерес до цих технологій виник через вичерпність запасів викопних вуглеводнів, постійне зростання цін на енергоносії та негативну тенденцію в зміні екологічної ситуації планети. Саме низка зазначених проблем і зумовила розвиток напряму автономних систем електроживлення з джерелами розподіленої генерації (ДРГ) електроенергії [1,2,6].

Одним із найперспективніших напрямів ДРГ, який нині активно розвивається, є системи електроживлення, що працюють із використанням енергії біомаси. В цих енергетичних системах викиди вуглекислоти в атмосферу можна назвати умовно відсутніми, оскільки після генерації електричного струму CO_2 споживається біологічною складовою комплексу. При отриманні електроенергії із біомаси використовується безліч методів перетворення її в енергоносії, зокрема анаеробної ферментації, піролізу та переетерифікації рослинних масел.

З точки зору розробки автономної системи електроживлення найперспективним є метод піролізу деревини, оскільки в порівнянні з іншими він має незначну кількість технологічних етапів, без труднощів піддається автоматизації, а деревина є легкодоступною сировиною. Варіант такої системи електроживлення наведено у роботі [3], її алгоритм керування – у роботі [4], а в роботі [5] розкрито питання підвищення пожежовибухонебезпечності енергетичної установки. Проте в роботах [3–6] не було розкрито питання вибухової концентрації генераторного газу, що може виникнути в піролізній установці. Для вирішення цього питання проведено експери-

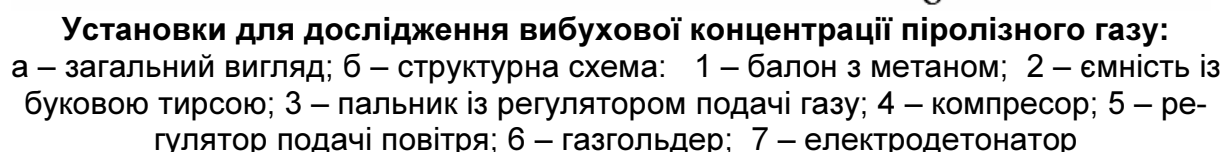
*Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В.В. Козирський

© А.О. Пальчик, А.Л. Яржемський, 2013

Мета досліджень – аналіз залежностей вибухових концентрацій вмісту повітря в суміші з газогенераторним газом для удосконалення алгоритмів керування автономної системи електроживлення та підвищення її вибухобезпечності.

Результати досліджень. Згідно з роботою [5] запропоновано алгоритм керування системою електроживлення, який передбачає примусову вентиляцію піролізної установки перед початком роботи. Ця операція зумовлена необхідністю контролю газового складу в піролізному котлі з метою уникнення вибухової або пожежної ситуації.

Фізична модель газогенератора складається із газового балона, пального ємності для генерації газу та газгольдера із електричним запальником (рисунок). У цій моделі букова тирса підігрівалася до 600 °С в ємності об'ємом 1 дм³ при подачі повітря із швидкістю 0,1 дм³/хв, яку забезпечував компресор. Згенерований газ потрапляв у газгольдер, оскільки піролізний газ складається із азоту N₂ : 50,9 % чадного газу CO: 27,0 водню H₂ : 14,0 % діоксиду вуглецю CO₂ : 4,5 % метану CH₄ : 3,0 % та кисню O₂ : 0,6%. У мокрому газгольдері замість води вивкористано олію з метою уникнення розчинення діоксиду вуглецю.



259

мент, коли газ вибухав, він виштовхував олію із газгольдера, після цього фіксувалося співвідношення генераторного газу та повітря. В результаті проведених дослідів було отримано верхню та нижню межу вибухової концентрації генераторного газу відносно повітря, яка становила 1/3 та 2/3.

Проведений дослід підтвердив припущення про необхідність попереднього примусового вентилявання піролізного котла перед початком роботи, висунуте в роботі [5]. Проте в структуру системи слід включити датчик метану, за допомогою якого контрольно-вимірювальний модуль при старті піролізної установки проводив контроль присутності залишкового газу.

Висновки

Досліджено залежності вибухових концентрацій вмісту повітря в суміші з газогенераторним газом, яке становило 1/3 та 2/3 відповідно, що дозволило удосконалити алгоритми керування автономної системи електроживлення та підвищити її вибухобезпечність.

Список літератури

1. Каплун В.В. Особливості оцінки економічної ефективності гетероструктурних автономних систем електроживлення / Каплун В.В. // Вісник Хмельницького нац. ун-ту . – 2007. – Т.2, б – №6. – С.200 – 204.

2. Каплун В.В. Проблеми створення автономних систем електроживлення у технологічних процесах сільськогосподарського виробництва / В.В. Каплун // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2006. – №2 (17). – С.3–8.

3. Козирський В.В. Автономна система електроживлення з використанням генераторного газу [Електронний ресурс] / В.В. Козирський, А.Л. Яржемський, М.М. Михальчук // Енергетика і автоматика. – 2010. – № 4. – Режим доступу до журн.: http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/eia/2010_2/10kvvpqg.pdf

4. Козирський В.В. Алгоритм роботи автономної системи електроживлення з використанням генераторного газу / В.В. Козирський, О.В. Гай, А.Л. Яржемський // Науковий вісник НУБіП України. – 2011. – №166, ч.3. – С.158 – 162.

5. Козирський В.В. Зниження пожежо-вибухонебезпечності в автономній системі електроживлення з використанням генераторного газу / В.В. Козирський, А.В. Жильцов, А.Л. Яржемський // Науковий вісник НУБіП України. – 2012. – №174, ч.2. – С.184 – 189

6. Козирський В.В. Проблеми створення систем безперервного електроживлення з використанням автономних електростанцій малої потужності / В.В. Козирський, В.В. Каплун // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2005. – №5 (14). – С. 3 – 9.

7. Пат. 95430, МПК H02J 9/00, F02B 43/08, F02B 63/00, F02B 69/00, F02D 28/00. Автономна система електроживлення з використанням генераторного газу / Козирський В.В., Каплун В.В., Жильцов А.В., Яржемський А.Л., Петренко А.В.; заявник і патентовласник: НУБіП України; заявл. 06.12.2010. опубл. 25.07.2011. Бюл.№14.

Исследованы закономерности взрывчатых концентраций воздуха и генераторного газа для устранения взрывоопасности в автономной системе электропитания на основе пиролизных котлов.

Генераторный газ, взрывобезопасность, взрывная смесь.

Regularities explosive concentrations of air and gas generator to eliminate explosion in the autonomous power supply system based on pyrolysis boilers.

Producer gas, explosion, explosive mixture.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА ЗАСОБАМИ МОДЕЛЮВАННЯ

*Р.І. Загородній, аспірант **

*Тернопільський національний педагогічний університет
ім. В.Гнатюка*

Наведено опис математичної моделі процесів, що проходять у камері горіння твердопаливного котла. Обґрунтовано шляхи подальших досліджень з використанням методів імітаційного та фізичного моделювання.

Математичне моделювання, горіння палива, тверде біопаливо, закони збереження маси компонентів суміші.

Енергоощадність технології спалювання у котлах значною мірою залежить від виду палива, яке використовується. Оскільки нині перспективним в усьому світі є використання біопалива, тому актуальними є дослідження процесу спалювання з метою визначення шляхів забезпечення його ефективності.

Слід зазначити, що біомаса має певні особливості, які відрізняють її від традиційних енергоресурсів. Крім того, деякі з характеристик твердого біопалива, такі як щільність, розміри часток, вологість, за допомогою подрібнення та ущільнення можуть бути змінені. Тому, в процесі експлуатації теплогенераторів з метою підвищення енергоефективності горіння твердого біопалива потрібно враховувати вказані характеристики.

Математичний опис технології спалювання твердого біопалива повинен враховувати взаємозв'язок фізико-хімічних та електро-фізичних властивостей процесу. Тому актуальним є моделювання технології спалювання з метою аналізу їх характеристик.

Мета досліджень – розробка математичної моделі процесу спалювання твердого біопалива, що відображає реальні фізико-хімічні процеси, що протікають при горінні.

Матеріали та методика досліджень. В основу процесу моделювання покладено математичні описи фізико-хімічних процесів спалювання твердого палива в камерах горіння котлів у статичному режимі, що найповніше представлені в роботах професора В.В.Померанцева [4]. Дослідження динамічних особливостей процесів горіння палива базувались на наукових працях В.В. Крашенинникова, П. Профоса і В.І. Бабія [1].

Результати досліджень. Горіння твердого палива протікає за наявності таких фізико-хімічних процесів:

- рух компонентів паливної суміші в камері горіння;

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В.С. Федорейко

© Р.І. Загородній, 2013

- наявність турбулентної та молекулярної дифузії вихідних речовин і продуктів реакції;
- теплообмін у газових потоках продуктів згорання і димових газах;
- конвективний теплообмін палаючих часток із газовим середовищем;
- процеси нагріву частинок, сублімації летючих, перенесення і горіння їх у газовому об'ємі.

У зв'язку зі складністю аеродинамічних і фізико-хімічних процесів і їх значної залежності від трьох просторових координат, при створенні математичної моделі прийнято ряд припущень, а саме:

- горіння летючих речовин і догорання продуктів неповного згорання відбувається у газовому середовищі;
- реагування протікає на поверхні вуглецевих частинок сферичної форми однакових розмірів;
- конвективним переносом теплоти з системи та дифузною теплопровідністю можна знехтувати.

Із врахуванням прийнятих припущень опис процесів горіння твердого палива базується на законах збереження маси, енергії та кількості руху, що є наслідками першого і другого законів термодинаміки.

Загальна система рівнянь законів збереження маси для компонентів суміші, що описує процеси горіння, яка включає також питомі потужності зміни мас компонентів, має вигляд (1–3):

$$\frac{\partial(\rho_j)}{\partial t} = -\text{div}(\rho_j \times v_j) + m_j; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_j \times e_j)}{\partial t} = -\text{div} J_e; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_j \times v_j)}{\partial t} = -\text{div}(\rho_j \times v_j \times v_j + P); \quad (3)$$

де ρ_j – щільність потоку маси, що переноситься, i -го компонента в елементарному об'ємі, кг/м³; v_j – швидкість центра мас елементарного об'єму, м/с; e – повна енергія на одиницю маси i -го компонента, Дж/кг; J_e – повний питомо-масовий потік енергії, Вт/м²; P – тензор тисків на елементарний об'єм, Па; m_j – питома потужність зміни маси j -го компонента, (кг/с)/м³.

Рішення цієї системи рівнянь у загальному вигляді є неможливим, тому було здійснено перехід до одновимірної моделі із зосередженими параметрами.

При цьому система рівнянь (1–3) приймає такий вигляд:

$$\frac{d(M_j)}{dt} = D_j'(t) + m_j dV; \quad (4)$$

$$\frac{d(M_j \times i_j)}{dt} = D_j'(t) i_j - D_j''(t) i_j + m_j \cdot dV \cdot Q_j^p; \quad (5)$$

$$\frac{d(M_j \times v_j)}{dt} = P^i F^i - P^{ii} F^{ii}, \quad (6)$$

де D_j' і D_j'' – витрата j -го компонента суміші на вході і на виході модельованої системи, кг/с; M_j – маса j -го компонента в об'ємі, кг; dV –

об'єм модельованої елементарної області, м^3 ; i_j' і i_j'' – ентальпія j -го компонента суміші на вході і на виході модельованої системи, Дж/кг; Q_j^p – теплота згоряння j -го компонента, Дж/кг.

У результаті загальна система рівнянь, що описує процеси спалювання твердого палива, матиме вигляд:

$$\frac{d(M_j)}{dt} = D_j'(t) - D_j''(t) - \frac{dG_j}{dt} M_{\text{пош}j} F_{\text{пош}j}; \quad (7)$$

$$\frac{d(M_j \times i_j)}{dt} = D_j'(t) i_j' - D_j''(t) i_j'' - \frac{dG_j}{dt} M_{\text{пош}j} F_{\text{пош}j} Q_j^p; \quad (8)$$

$$\frac{d(M_j \times v_j)}{dt} = P' F' - P'' F''. \quad (9)$$

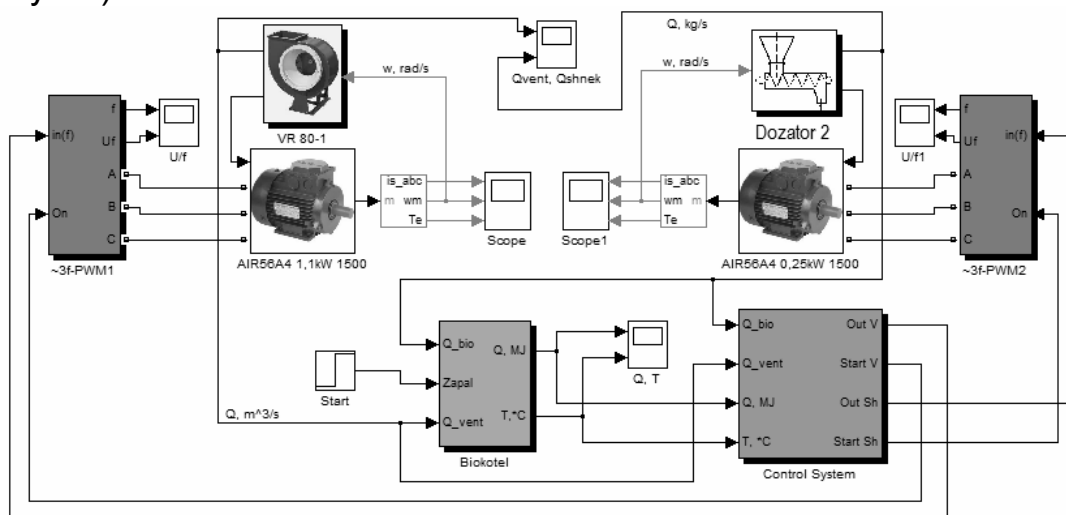
Наведена система рівнянь повинна бути доповнена рівнянням швидкості горіння компонентів вихідної суміші G_j , необхідним для розрахунку зміни маси:

$$\frac{dG_j}{dt} = C_j k_{O_j} e^{\frac{E_j}{R \times T}} = C_j k_j \quad (10)$$

та рівнянням для розрахунку концентрацій оксидів азоту у продуктах згоряння у зоні горіння:

$$\frac{dC_{NO}}{dt} = \frac{2K_O k_1}{\sqrt{C_{O_2}}} \cdot \frac{1}{K^2} (C_{(NO)}^2 - C_{NO}^2). \quad (11)$$

Аналіз наведеної системи рівнянь, що описує процес горіння твердого біопалива дозволяє стверджувати про необхідність подальших досліджень для встановлення значень вхідних та керуючих параметрів і взаємозв'язків між ними. Тому доцільним є проведення експериментальних досліджень на фізичній та імітаційній моделі твердопаливного котла (рисунок).



Імітаційна модель твердопаливного котла

Підсистема «Biokotel» (див. рисунок), яка входить у наведену імітаційну модель повинна відображати процеси, що представлені в залежностях (1)–(6).

Таким чином, у подальших дослідженнях необхідно проаналізувати динаміку процесу горіння на основі розроблених моделей з метою забез-

печення енергоощадності процесу приготування твердобіопаливної суміші для теплогенераторів.

Висновки

Наведена система диференціальних рівнянь, що описує процес спалювання твердого біопалива, враховує закони збереження маси для компонентів суміші, швидкість горіння та розрахунок концентрації оксидів азоту у продуктах згорання у зоні спалювання.

Подальші дослідження повинні проводитися на основі імітаційного та фізичного моделювання, яке дозволить проаналізувати динаміку процесу горіння.

Список літератури

1. Бабий В.И. Горение угольной пыли и расчёт пылеугольного факела / В. И. Бабий, Ю. Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
2. Зельдович Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Наука, 1976. – 686 с.
3. Левит Г.Т. Пылеприготовление на тепловых электростанциях / Г.Т. Левит. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 384 с.
4. Основы практической теории горения: учеб. пособие для вузов / под ред. В. В. Померанцева. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 312 с.
5. Семёнов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности / Н.Н. Семёнов. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 686 с.

Приведено описання математическої моделі процесів, протікаючих в камері горіння твердотопливного котла. Обосновані шляхи подальших досліджень з використанням методів імітаційного та фізичного моделювання.

Математическое моделирование, горение топлива, твердое биотопливо, законы сохранения массы компонентов смеси.

The paper describes a mathematical model of the processes occurring in the combustion chamber solid fuel boiler. The ways of further studies using techniques of simulation and physical modeling.

Mathematical modeling, fuel combustion, solid biofuels, the laws of conservation of mass of the mixture components.

ПОРІВНЯННЯ РІЗНИХ СХЕМ КОГЕНЕРАЦІЙНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ЗА НАЯВНОСТІ ЗВ'ЯЗКУ З ЄДИНОЮ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖЕЮ

І.В.Феофілов, старший викладач

Проаналізовано існуючі та можливі схеми енергопостачання на базі когенераційної технології з точки зору економії первинного палива, визначення вартості та строку окупності обладнання.

Когенераційна установка, енергопостачання на базі когенераційної технології, режими узгодження постачальника і споживача енергій, коефіцієнт економії палива, строк окупності.

Нині когенерація є однією з найперспективніших технологій, що дозволяє використовувати енергію первинного палива з найбільшою ефективністю. Коефіцієнт корисної дії (ККД) сучасних когенераційних установок (КГУ) досягає 90–92 %. Така висока ефективність когенераційного обладнання пояснюється виробленням відразу двох видів енергії: спочатку – виробляється електрична енергія, а потім – теплова енергія за рахунок утилізації тепла палива, що не було використано в основному процесі. Для різних типів КГУ при однаковому сумарному ККД співвідношення вироблених електричної та теплової енергії суттєво відрізняються: від 1:1–1,2 для КГУ на основі поршневих ДВЗ до 1:10–12 для надбудови котельних установок електрогенеруючим обладнанням [1]. Максимальну ефективність мають КГУ з найбільшим виробленням електроенергії, тобто ті енергетичні установки, що дозволяють найповніше використати ексергетичний потенціал первинного палива. Таким чином, з точки зору економії первинних енергоресурсів, найефективнішими виявляються КГУ на основі поршневих ДВЗ [2]. Тому, при аналізі когенераційного енергопостачання будемо розглядати саме такі КГУ.

Необхідними умовами ефективного енергопостачання об'єкта від КГУ є максимальне використання вироблених енергій і найповніший збіг енергогенеруючих потужностей КГУ та енергетичних потреб споживача. Проте останнє практично не відбувається. Сезонні та добові коливання енергетичного споживання, відмінності в енергетичних потребах споживача у різні пори року, а також непов'язаний між собою характер коливання електричних і теплових навантажень не дозволяють, у більшості випадків, узгодити одночасно електричні і теплові потужності КГУ та енергетичні потреби споживача. *За наявності зв'язку з єдиною електромережею існують такі основні типи узгодження [3]:*

- *за тепловим навантаженням: теплова потужність КГУ у будь-який момент часу дорівнює тепловому навантаженню споживача. Елект-*

рична енергія, якщо вона надлишкова – продається до єдиної електромережі, якщо її недостатньо – купується з електромережі;

- *за електричним навантаженням*: електрична потужність КГУ дорівнює електричному навантаженню споживача. Теплова енергія, якщо її більше, ніж це потрібно споживачеві, – скидається в навколишнє середовище, якщо менше – використовуються додаткові теплові потужності у вигляді допалювання палива в котлі-утилізаторі або допоміжному котлі;

- *змішані режими узгодження*: залежно від тарифів на електроенергію в певні дні і години в деякі періоди часу застосовуються режими узгодження за електричним навантаженням, в інші періоди часу – за тепловим навантаженням.

Зважаючи на те, що надлишкову електричну енергію, вироблену в КГУ, в силу прийнятого в Україні закону про когенерацію [4], можна направити до єдиної електромережі, а надлишкова теплова енергія, що вироблена в КГУ, – викидається в навколишнє середовище і втрачається, найперспективнішим вважають узгодження потужностей КГУ та споживача саме за тепловою енергією. При такому виді узгодження потужності КГУ регулюються так, що вироблена нею теплова енергія відповідає тепловим потребам споживача. Що стосується електричної енергії, то зв'язок КГУ з єдиною електромережею дозволяє вирішити питання як надлишкової, так і недостатньої для споживача електроенергії. В таких умовах регулювання потужностей знову стають у нагоді КГУ на базі поршневих ДВЗ, які дозволяють регулювати потужність КГУ в істотних межах (30–100 % від максимальної потужності) без суттєвого зменшення ККД вироблення енергоносіїв [5]. Таким чином, добові коливання енергетичних потреб споживача можуть бути задоволені за рахунок регулювання потужності КГУ. Але, разом з тим, потреби споживача в тепловій енергії в опалювальний і неопалювальний період суттєво відрізняються – за деякими даними [6] у 4–6 разів. Для об'єктів агропромислового комплексу споживання теплової енергії в опалювальний період збільшується у 3–4 рази в порівнянні з неопалювальним періодом при практично незмінному електроспоживанні протягом всього року. Для задоволення теплових потреб споживача в опалювальний період регулювання потужностей КГУ вже недостатньо. Тому, в існуючих схемах енергопостачання на базі КГУ (рис.1), коли потужності КГУ підбираються за енергетичними потребами споживача в неопалювальний період, нарощування теплопостачання в опалювальний період відбувається за рахунок додаткових теплових потужностей.

Крім описаної схеми енергопостачання на основі КГУ, можлива схема енергопостачання (рис.2), в якій КГУ складається з декількох агрегатів. Дроблення енергетичних потужностей КГУ дозволяє забезпечити цілорічне постачання споживача енергоносіями, виробленими за когенераційною технологією, в порівнянні з варіантом I. Крім цього, така схема енергопостачання підвищує надійність роботи КГУ [3] та дозволяє проводити регламентні ремонтні роботи окремих агрегатів у неопалювальний період без зупинки всієї КГУ.

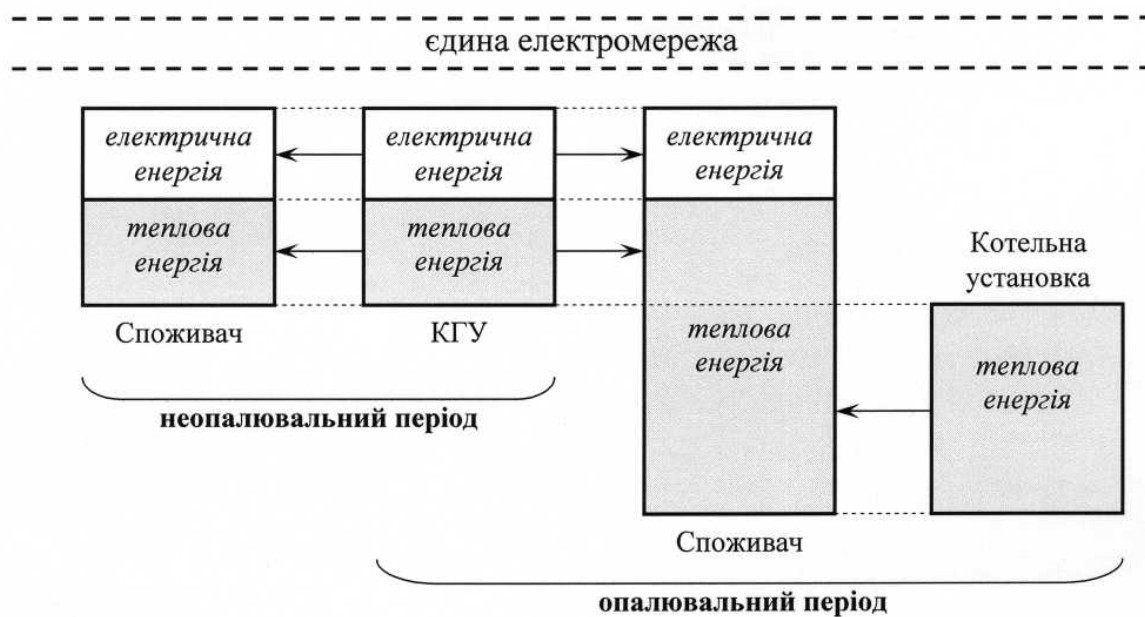


Рис.1. Схема енергопостачання на базі КГУ (І варіант)

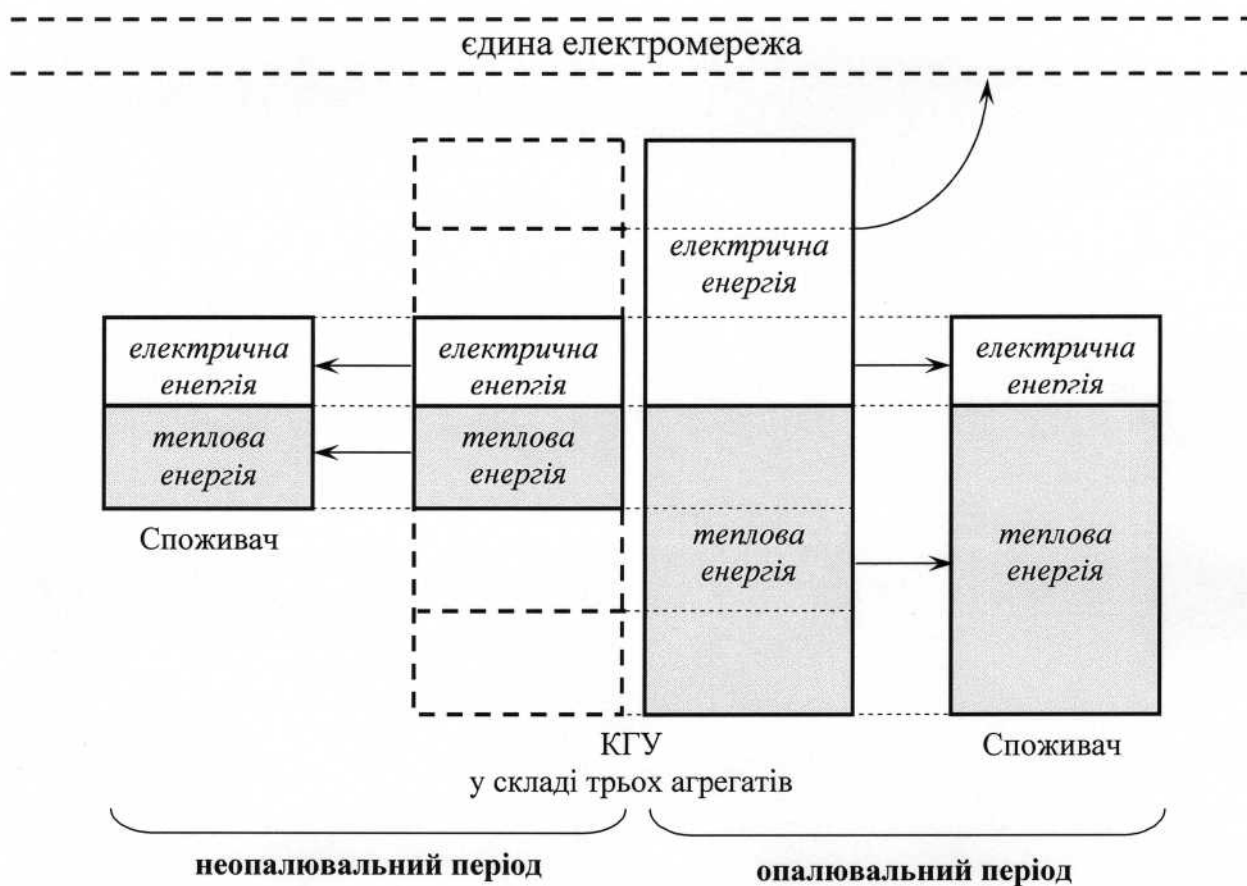


Рис.2. Схема енергопостачання на базі КГУ (ІІ варіант)

Можливі інші схеми реалізації когенераційного енергопостачання в умовах дроблення енергетичних потужностей КГУ (рис.3 і рис.4). У таких схемах збільшуються витрати первинного палива, а також втрати тепла в навколишнє середовище в неопалювальний період, але при цьому збільшується кількість електроенергії, що віддається до єдиної електромережі.

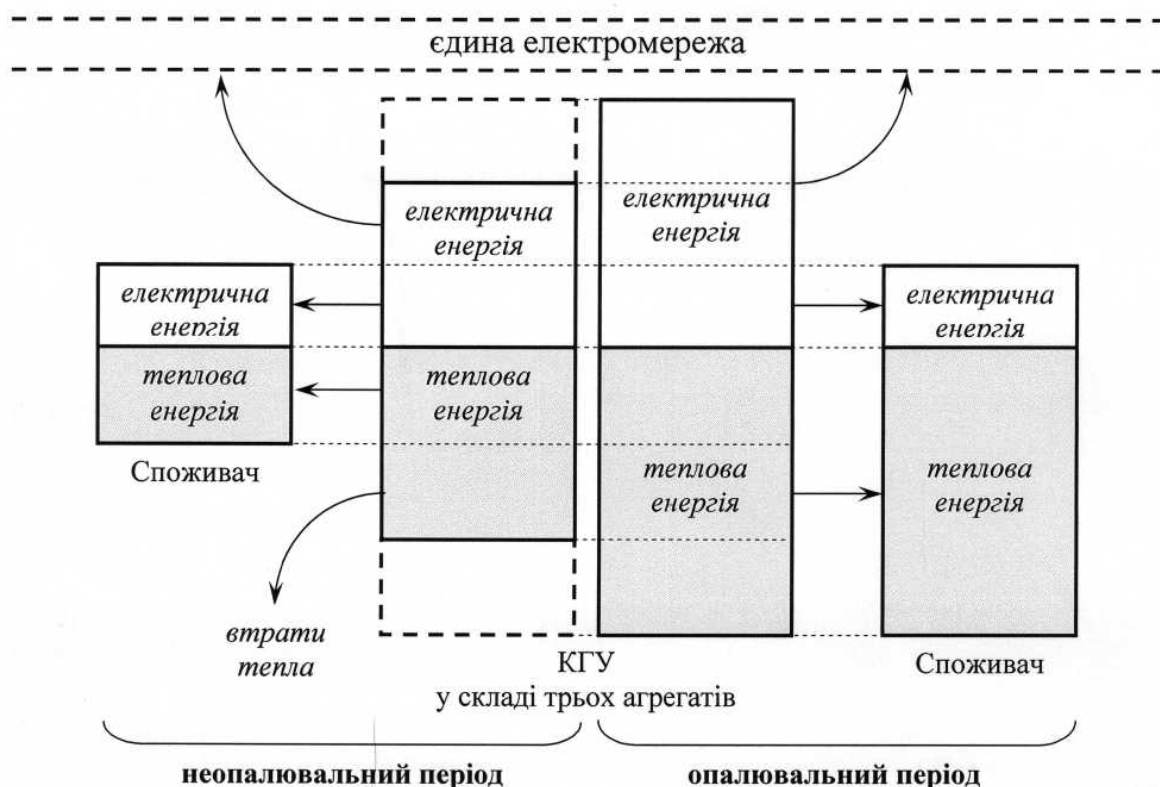


Рис.3. Схема енергопостачання на базі КГУ (III варіант)

Мета досліджень – порівняння ефективності різних схем когенераційного енергопостачання за наявності зв'язку з єдиною електромережею.

Матеріали та методика досліджень. У роботі наведено порівняльний аналіз існуючих і можливих схем когенераційного енергопостачання.

Основною умовою порівняння різних схем енергопостачання є задоволення потреб споживача в електричній та тепловій енергії у повному обсязі. Для порівняння схем енергопостачання вибираємо об'єкт з енергоспоживанням, наведеним у табл. 1, що характерно для невеликих тваринницьких господарств АПК України в Київській області. Паливом, що використовується, є природний газ.

1. Енергоспоживання об'єкта, що розраховується

Період року	Тривалість t , діб	Споживання тепла Q_T^{cp} , кВт	Споживання електроенергії Q_e^{cp} , кВт
Опалювальний	187	600	240
Неопалювальний	178	200	240

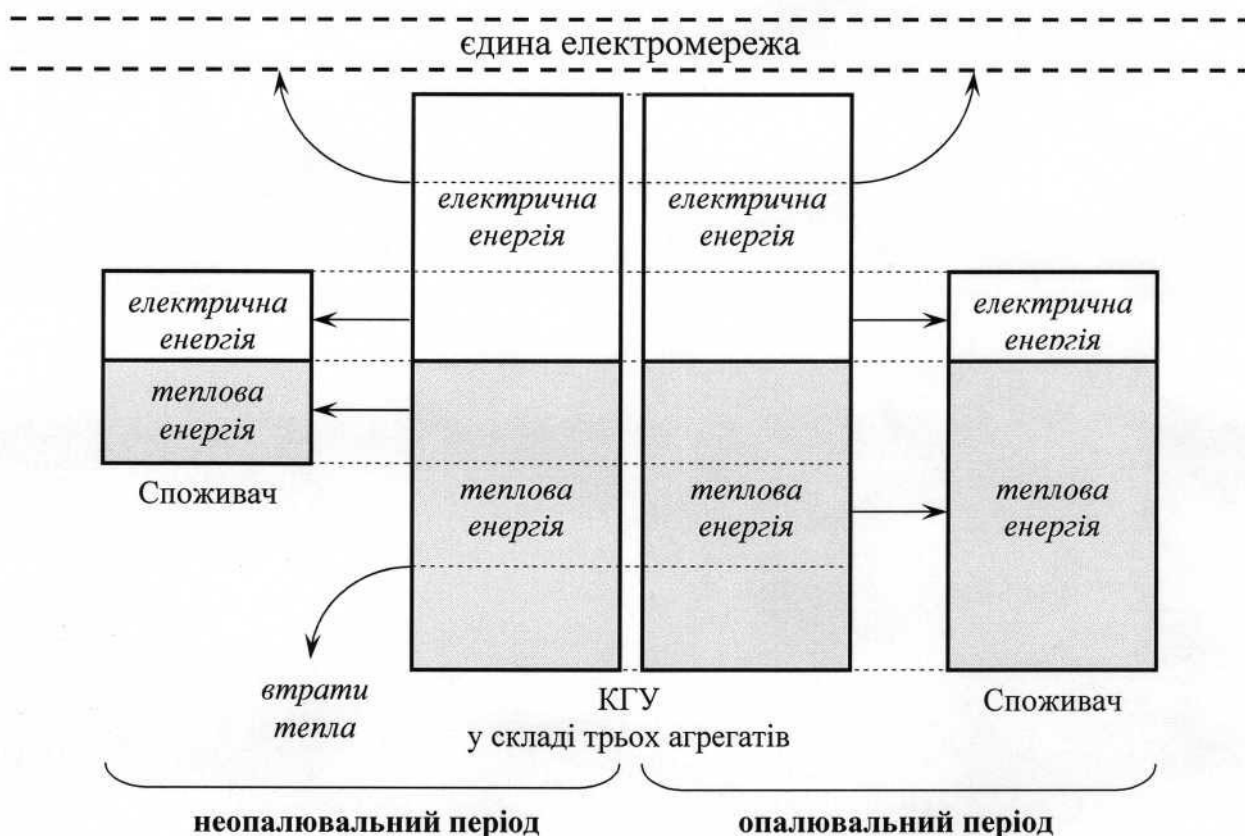


Рис.4. Схема енергопостачання на базі КГУ (IV варіант)

Сумарний ККД агрегатів КГУ дорівнює $\eta_{\Sigma}^{КГУ} = 0,92$. Співвідношення вироблених КГУ теплової та електричної енергії становить 1,19, що обумовлює значення електричного та теплового ККД КГУ: $\eta_e^{КГУ} = 0,42$ та $\eta_T^{КГУ} = 0,5$, відповідно. Узгодження споживача та КГУ відбувається за тепловою енергією.

Результати досліджень. Для визначення коефіцієнта економії палива ε , що характеризує, яку частину палива, витрачену за традиційною технологією на енергопостачання об'єкта, можна економити, застосовуючи когенераційну технологію, використовуємо рівняння, наведені в [5]. У загальному вигляді формула може бути записана у вигляді:

$$\varepsilon = \frac{Q_n^{окр} - \left(Q_n^{КГУ} \mp \frac{\Delta Q_e}{\eta_{ТЕС}} + \frac{\Delta Q_T}{\eta_{\kappa}} \right)}{Q_n^{окр}}, \quad (1)$$

де $Q_n^{окр} = B^{окр} Q_H^p$ – кількість тепла палива, що витрачена в одиницю часу за традиційною технологією, кВт; $B^{окр}$ – кількість палива, витраченого в одиницю часу за традиційною технологією, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_H^p = 35700 \text{ кДж}/\text{м}^3$ – нижча теплота згоряння природного газу; $Q_n^{КГУ} = B^{КГУ} Q_H^p$ – кількість тепла палива, що витрачається в одиницю часу за когенераційною технологією, кВт; $B^{КГУ}$ – кількість палива, витраченого в одиницю часу за когенерацій-

ною технологією, $\text{м}^3/\text{с}$; ΔQ_e – електричні потужності, що віддаються до (отримуються з) єдиної електромережі, кВт; $\eta_{TEC} = 0,32$ – ККД теплової електростанції – агрегату, за допомогою якого виробляється електрична енергія при традиційній схемі енергопостачання; ΔQ_T – кількість додаткових теплових потужностей, кВт; $\eta_k = 0,8$ – ККД котельної установки – агрегату, за допомогою якого виробляється тепла енергія при традиційній схемі енергопостачання.

Перед виразом $\Delta Q_e / \eta_{TEC}$ ставимо знак «–», якщо електрична енергія віддається, а знак «+», якщо електрична енергія отримується з єдиної електромережі.

Кількість тепла палива, що витрачена за традиційною технологією $Q_n^{окр}$, визначаємо, виходячи з теплових та електричних потужностей споживача:

$$Q_n^{окр} = \frac{Q_T^{cn}}{\eta_k} + \frac{Q_e^{cn}}{\eta_{TEC}}. \quad (2)$$

Кількість тепла палива, що витрачена за когенераційною технологією $Q_n^{КГУ}$, визначаємо, виходячи з теплових або електричних потужностей КГУ і кількості агрегатів у складі КГУ:

$$Q_n^{КГУ} = n \frac{Q_T^{КГУ}}{\eta_T^{КГУ}} \quad \text{або} \quad Q_n^{КГУ} = n \frac{Q_e^{КГУ}}{\eta_e^{КГУ}}, \quad (3)$$

де n – кількість агрегатів у складі КГУ; $Q_T^{КГУ}$ та $Q_e^{КГУ}$ – тепла та електрична потужність одиничного агрегату КГУ; $\eta_T^{КГУ}$ – тепловий ККД КГУ; $\eta_e^{КГУ}$ – електричний ККД КГУ.

Витрати палива при енергопостачанні за традиційною технологією:

$$B^{окр} = B_1^{окр} + B_2^{окр} = \frac{86400 \tau_1 Q_{n1}^{окр}}{Q_n^p} + \frac{86400 \tau_2 Q_{n2}^{окр}}{Q_n^p}, \quad (4)$$

де $B_1^{окр}$ та $B_2^{окр}$ – витрати палива при енергопостачанні за традиційною технологією в опалювальний та неопалювальний період, м^3 ; $Q_{n1}^{окр}$ та $Q_{n2}^{окр}$ – тепло палива, витраченого в одиницю часу за традиційною технологією в опалювальний та неопалювальний період, кВт; τ_1 та τ_2 – тривалість опалювального та неопалювального періоду, дб.

Витрати палива при енергопостачанні за когенераційною технологією:

$$B^{КГУ} = B_1^{КГУ} + B_2^{КГУ} = \frac{86400 \tau_1 (Q_{n1}^{КГУ} + Q_n^{КГУ})}{Q_n^p} + \frac{86400 \tau_2 Q_{n2}^{КГУ}}{Q_n^p}, \quad (5)$$

де $Q_n^{КГУ} = \Delta Q_T / \eta_k$ – тепло палива, витраченого в одиницю часу в котельній установці, кВт; $Q_{n1}^{КГУ}$ та $Q_{n2}^{КГУ}$ – тепло палива, витраченого в КГУ в одиницю часу в опалювальний та неопалювальний період, кВт; $B_1^{КГУ}$ та $B_2^{КГУ}$ – витрати палива при енергопостачанні за когенераційною технологією в опалювальний та неопалювальний період, м^3 .

Річна економія палива E при переході з традиційної на когенераційну схему енергопостачання складається з економії палива в опалювальний E_1 і неопалювальний E_2 періоди року ($\text{м}^3/\text{рік}$):

$$E = E_1 + E_2, \quad (6)$$

де $E_1 = B_1^{окр} \varepsilon_o$; $E_2 = B_2^{окр} \varepsilon_n$; ε_o та ε_n – коефіцієнт економії палива в опалювальний та неопалювальний періоди року.

Враховуючи вартість одиниці палива w , можна визначити річну економію коштів при енергопостачанні об'єкта за рахунок використання КГУ:

$$W_{\varepsilon} = wE. \quad (7)$$

Вартість палива постійно змінюється і має загальну тенденцію до зростання. Для порівняння схем когенераційного енергопостачання достатньо зупинитись на певному значенні w . Наприклад, вартість 1 м^3 природного газу на території України в травні 2013 року дорівнювала $w \approx 3,2$ грн/м³ [7]. Треба зауважити, що зі зростанням ціни на паливо, збільшується річна економія коштів від використання КГУ та зменшується строк окупності КГУ.

Питома вартість 1 кВт електричної потужності КГУ становить 300–800 дол. США (рис.5) [8].

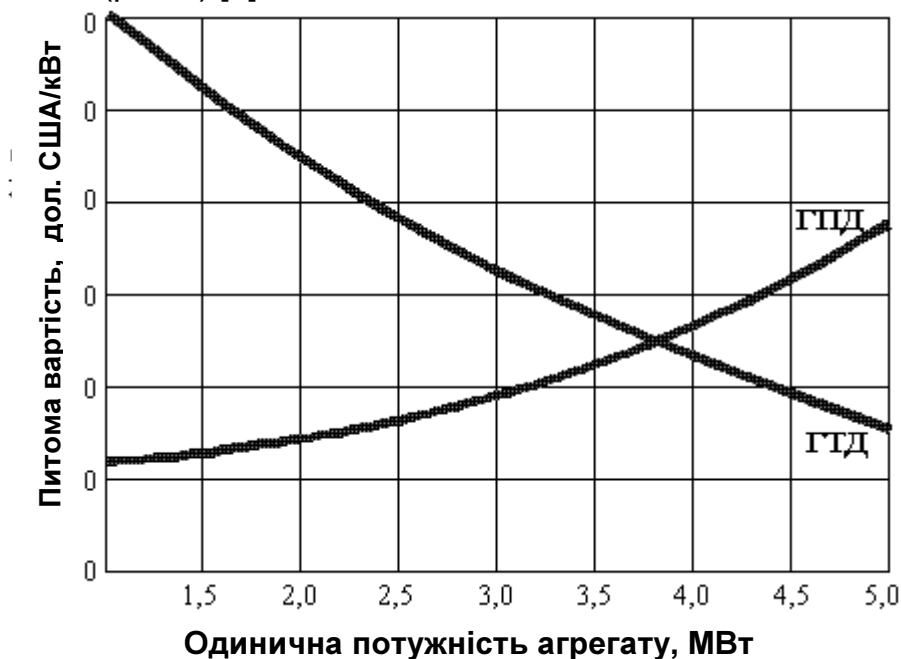


Рис.5. Питома вартість поршневої та турбінної КГУ

Вартість КГУ на основі поршневого ДВЗ при одиничних потужностях менше 1 МВт становить близько 320 дол. США за 1 кВт електричної потужності, що дозволяє визначити вартість КГУ у всіх варіантах когенераційного енергопостачання.

Треба зауважити, що в I варіанті енергопостачання, крім КГУ в опалювальний період, використовується КУ, потужність якої 400 кВт. Враховуючи вартість 1 кВт теплової потужності, що становить близько 500 грн/кВт, вартість КУ $W^{KY} \approx 200\,000$ грн, яку треба додати до вартості самої КГУ.

Строк окупності КГУ (у роках) можна розрахувати за формулою:

$$T = \frac{(W^{KГУ} + W^{KY})k}{W_{\varepsilon}}, \quad (8)$$

де $k \approx 1,1$ – коефіцієнт, що враховує заробітну платню персоналу та інші щорічні витрати при обслуговуванні обладнання.

Результати отриманих розрахунків наведені у вигляді табл. 2.

2. Порівняння варіантів когенераційного енергопостачання

Параметри		Варіант когенераційного енергопостачання							
		I		II		III		IV	
Період року		неоп.	опал.	неоп.	опал.	неоп.	опал.	неоп.	опал.
Потужності КГУ	теплова $Q_T^{КГУ}$, кВт	200	200	200	600	400	600	600	600
	електрична $Q_n^{КГУ}$, кВт	168	168	168	504	336	504	504	504
Додаткові теплові потужності КУ ΔQ_T , кВт		-	400	-	-	-	-	-	-
Теплота палива, витрачен. в КУ $Q_n^{КУ}$, кВт		-	500	-	-	-	-	-	-
Взято з (віддано до) єдиної електромережі ΔQ_e , кВт		72	72	72	(264)	(96)	(264)	(264)	(264)
Теплота палива, витрачен. в КГУ $Q_n^{КГУ}$, кВт		400	400	400	1 200	800	1 200	1 200	1 200
Коеф. економії палива ε		0,375	0,25	0,375	0,75	0,5	0,75	0,625	0,75
Фактичні витрати палива $B^{КГУ}$, тис. м ³		172,3	407,3	172,3	543,0	344,6	543,0	516,9	543,0
		579,6		715,3		887,6		1 059,9	
Теплота палива, витрачена за традиц. техн. $Q_n^{окр}$, кВт		1 000	1 500	1 000	1 500	1 000	1 500	1 000	1 500
Витрати палива за традиц. технологією $B^{окр}$, тис. м ³		430,8	678,9	430,8	678,9	430,8	678,9	430,8	678,9
		1109,7		1109,7		1109,7		1109,7	
Економія палива E , тис. м ³		161,6	169,7	161,6	509,2	215,4	509,2	269,3	509,2
		331,3		670,8		724,6		778,5	
Річна економія коштів W_e , тис. грн.		1 060,16		2 146,56		2 318,72		2 491,2	
Економія коштів на один. витр. палива W_e/B , грн./м ³		1,83		3,0		2,61		2,35	
Вартість обладнання $(W^{КГУ} + W^{КУ})$, тис. грн.		630,08		1 290,24		1 290,24		1 290,24	
Строк окупності T , рік		0,654		0,661		0,556		0,518	

Висновки:

1. Незважаючи на збільшення потужності КГУ у варіантах когенераційного енергопостачання II, III та IV в порівнянні з варіантом I і, відповідно, збільшення вартості КГУ, строк окупності у всіх варіантах приблизно однаковий і становить 6,5–8 міс.

2. Річна економія коштів від використання когенераційною технології у варіантах II, III та IV більше, ніж у варіанті I у 2–2,3 раза, що дозволяє отримувати більші доходи після закінчення строку окупності когенераційного обладнання.

3. Вартість обладнання у варіантах II, III та IV є однаковою, але фактичні витрати первинного палива збільшуються: у III варіанті 124 %, а у IV – 148 % від витрат за II варіантом. Річна економія коштів зростає меншими темпами: у III варіанті 108 %, а у IV – 116 % від економії за II варіантом.

4. Найбільшу економію коштів на одиницю фактично витраченого первинного палива отримуємо у II варіанті когенераційного енергопостачання: $\approx 3 \text{ грн/м}^3$, що у 1,5 раза більше, ніж в I варіанті. При вартості первинного палива $3,2 \text{ грн/м}^3$ фактичні затрати при використанні когенераційного енергопостачання за II варіантом, з урахуванням відданої до єдиної електромережі електроенергії, становлять $\approx 0,2 \text{ грн/м}^3$.

Список літератури

1. Клименко В.Н. Когенерационные системы с тепловыми двигателями: справочное пособие: [в 3 ч.] Ч. 1: Общие вопросы когенерационных технологий/Клименко В.Н., Мазур А.И., Сабашук П.П. – К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2008. – 560 с.

2. Феофілов І.В. Підвищення ефективності когенераційної установки на основі двигуна внутрішнього згоряння за рахунок зволоження повітря / І.В. Феофілов // Науковий вісник НУБіП України. – 2013. - №185, ч.1.– С.161-71.

3. Феофілов І.В. Підвищення ефективності роботи когенераційної установки на основі дроблення її енергетичних потужностей / І.В.Феофілов // Науковий вісник НУБіП України. – 2012. - №174, ч.1. – С.75-80.

4. Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу» від 5 квітня 2005 року №2509-IV // Вісник Верховної Ради України (ВВР). – 2005. – №20. – С.278.

5. Горобець В.Г. Когенераційні установки та їх використання в агропромисловому комплексі/ В.Г. Горобець, І.В. Феофілов. – К.:ЦП «Компринт», 2012. – 294 с.

6. Баласанян Г.А. Эффективность перспективных интегрированных систем энергозабезпечення на базі установок когенерації малої потужності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук/ Г.А. Баласанян. – Одеса, 2007. – 36 с.

7. Фактична ціна реалізації для газу природного (Середня митна вартість імпортного природного газу, що склалася у процесі його митного оформлення під час ввезення на територію України (травень 2013). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.me.gov.ua/control/uk/publish/article?art_id=209457&cat_id=133291

8. Горозий В.М. Исследование схем выдачи мощности когенерационных газовых электрических станций / В.М. Горозий. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/eltf/gorozii/diss/index.htm>

Проанализированы существующие и возможные схемы энергоснабжения на базе когенерационной технологии с точки зрения экономии первичного топлива, определения стоимости и срока окупаемости оборудования.

Когенерационная установка, энергоснабжение на базе когенерационной технологии, режимы согласования поставщика и потребителя энергий, коэффициент экономии топлива, срок окупаемости.

The existent and possible charts of energy supply on a base of cogeneration technology are analysed from point of economy of primary fuel, determination of cost and term of recoupment of equipment.

Cogeneration plant, energy supply on a base of cogeneration technology, modes of concordance of supplier and user of energies, coefficient of economy of fuel, term of recoupment.

УДК 004.4'242:629.311/.314

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛЯЮЧОЇ СИСТЕМИ З ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

О.І. Примак, кандидат історичних наук

Здійснено поетапне моделювання інформаційно-управляючої системи з вантажних перевезень. На основі цього побудовано діаграми FDD, послідовності, потоків даних, прецедентів, класів.

Інформаційне забезпечення, база даних, моделювання, мова UML, діаграма, інформаційна система, вантажні перевезення.

Основна тенденція розвитку підприємств, що займаються вантажними перевезеннями полягає у переході від паперового до електронного обліку, що в свою чергу, надасть можливість швидкого доступу до інформації та вибору оптимальних маршрутів транспортування.

Мета досліджень – аналіз проблемної області, пов'язаної з інформаційно-управляючою системою з вантажних перевезень. На основі аналізу провести моделювання роботи системи.

Матеріали та методика досліджень. Побудова діаграм здійснюється в середовищі Visio 2007 з використанням мови UML, інформаційне забезпечення реалізовано в СУБД реляційного типу Microsoft SQL 2008, програмне забезпечення розроблено на мові програмування C++ в середовищі Embacadero RAD Studio 2010.

Результати досліджень. Динамічний розвиток ринків вантажних перевезень та серйозне посилення конкуренції вимагає від їх учасників вжити всіх необхідних заходів щодо підвищення рівня власної конкурентоспроможності. Хоча існує чимало шляхів для цього, проте одним із основних, на думку автора, є запровадження дієвої інформаційної системи

Проанализированы существующие и возможные схемы энергоснабжения на базе когенерационной технологии с точки зрения экономии первичного топлива, определения стоимости и срока окупаемости оборудования.

Когенерационная установка, энергоснабжение на базе когенерационной технологии, режимы согласования поставщика и потребителя энергий, коэффициент экономии топлива, срок окупаемости.

The existent and possible charts of energy supply on a base of cogeneration technology are analysed from point of economy of primary fuel, determination of cost and term of recoupment of equipment.

Cogeneration plant, energy supply on a base of cogeneration technology, modes of concordance of supplier and user of energies, coefficient of economy of fuel, term of recoupment.

УДК 004.4'242:629.311/.314

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛЯЮЧОЇ СИСТЕМИ З ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

О.І. Примак, кандидат історичних наук

Здійснено поетапне моделювання інформаційно-управляючої системи з вантажних перевезень. На основі цього побудовано діаграми FDD, послідовності, потоків даних, прецедентів, класів.

Інформаційне забезпечення, база даних, моделювання, мова UML, діаграма, інформаційна система, вантажні перевезення.

Основна тенденція розвитку підприємств, що займаються вантажними перевезеннями полягає у переході від паперового до електронного обліку, що в свою чергу, надасть можливість швидкого доступу до інформації та вибору оптимальних маршрутів транспортування.

Мета досліджень – аналіз проблемної області, пов'язаної з інформаційно-управляючою системою з вантажних перевезень. На основі аналізу провести моделювання роботи системи.

Матеріали та методика досліджень. Побудова діаграм здійснюється в середовищі Visio 2007 з використанням мови UML, інформаційне забезпечення реалізовано в СУБД реляційного типу Microsoft SQL 2008, програмне забезпечення розроблено на мові програмування C++ в середовищі Embacadero RAD Studio 2010.

Результати досліджень. Динамічний розвиток ринків вантажних перевезень та серйозне посилення конкуренції вимагає від їх учасників вжити всіх необхідних заходів щодо підвищення рівня власної конкурентоспроможності. Хоча існує чимало шляхів для цього, проте одним із основних, на думку автора, є запровадження дієвої інформаційної системи

вантажного перевізника. Проте спочатку необхідно розробити концепцію інформатизації вантажного перевізника, яка була б орієнтована, як на створення дієвої інформаційної системи, так і на можливість подальшого вдосконалення цієї системи з використанням інформаційних технологій.

У статті була поставлена задача розробити автоматизоване робоче місце працівника, що займається вантажними перевезеннями. Для вирішення цієї задачі необхідно провести всебічний аналіз системи, на базі якого побудувати моделі, які б демонстрували роботу системи з різних точок зору.

Парадигма об'єктно-орієнтованого моделювання пропонує певний набір діаграм, які формуються за чергою.

Для зображення розроблених процесів майбутньої системи автоматизації управління вантажних перевезень використовується FDD діаграма (рис. 1). Вона має вигляд блок-схеми і зображує ієрархію процесів, де процес автоматизації перевезень вантажів включає в себе оформлення запитів, транспортування та оформлення звітів. У свою чергу, оформлення запитів складається з таких процесів: оформлення запитів на перевезення, оформлення запитів на отримання вантажу зі складу і складування вантажів. Процес транспортування поділяється на: отримання вантажів і супроводжуючих документів до них, складування вантажу за прибуттям до місця призначення.



Рис. 1. FDD діаграма

На другому етапі було побудовано діаграму послідовності (рис. 2). На цій діаграмі подано три лінії життя: «Оператор», «Склад», «Клієнт».

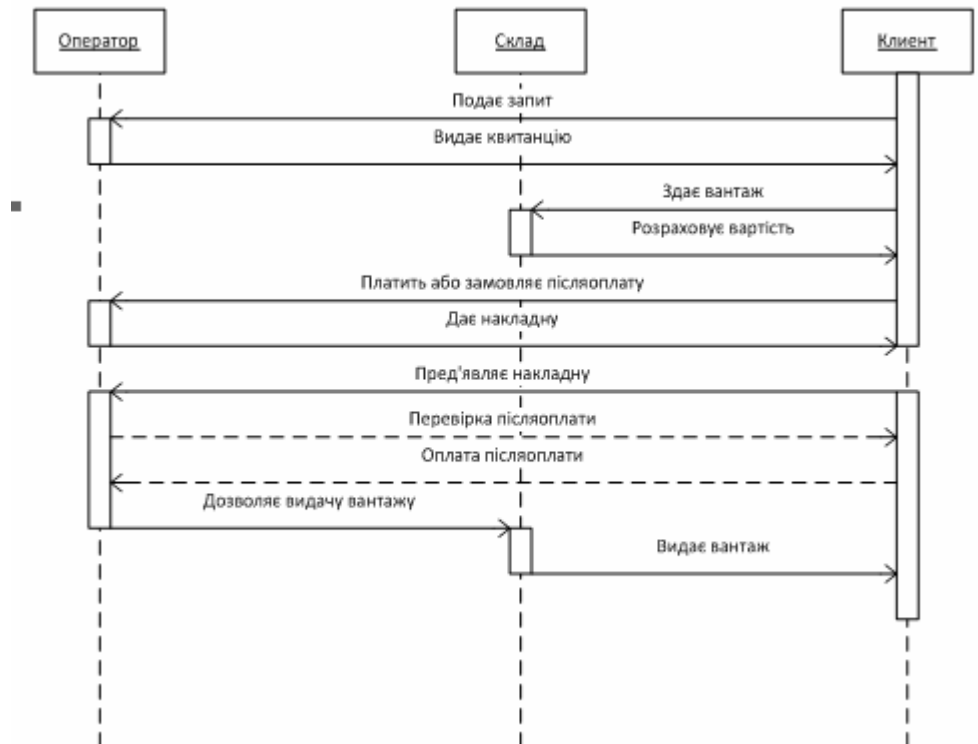


Рис. 2. Діаграма послідовності

На третьому етапі відбувається побудова діаграми прецедентів – це UML діаграма за допомогою якої в графічному вигляді можна зобразити вимоги до розроблюваної системи (рис. 3).

Діаграма прецедентів – це вихідна концептуальна модель проектованої системи. Ця діаграма описує принцип роботи методом зображення дійових осіб, що беруть участь безпосередньо у цьому процесі, та прецедентів, тобто дій або завдань, виконуваних акторами. На діаграмі показано три актори: «Робітник складу», «Оператор» і «Клієнт» та присвоєно їм потрібні для автоматизації процесу необхідні прецеденти, такі як подання заявок, оброблення заявок, складування вантажів, розрахунок вартості послуг, оплата послуг тощо.

Актори системи	Прецеденти системи
Робітник складу	Приймає і видає вантаж
Оператор	Обробляє запити
Оператор	Розраховує вартість
Оператор	Приймає оплату
Клієнт	Формує запит
Клієнт	Оплачує послуги
Клієнт	Здає та отримує вантаж
Робітник складу	Контролює складування вантажів

Наступний етап об'єктного моделювання – побудова діаграми класів (рис.4), яка відображає статичну структуру та показує класи системи, їх атрибути, методи і залежності між класами.

Діаграма потоків даних – графічний засіб для зображення інформаційного потоку і перетворень, яким піддаються дані при русі від входу до виходу системи (рис. 5). Діаграма може використовуватися для представлення програмного виробу на будь-якому рівні абстракції.

Важливу специфічну роль в моделі грає спеціальний вид DFD - контекстна діаграма, що моделює систему загалом. Контекстна діаграма відображає інтерфейс системи із зовнішнім світом, а саме, інформаційні потоки між системою і зовнішніми сутностями, з якими вона повинна бути пов'язана.

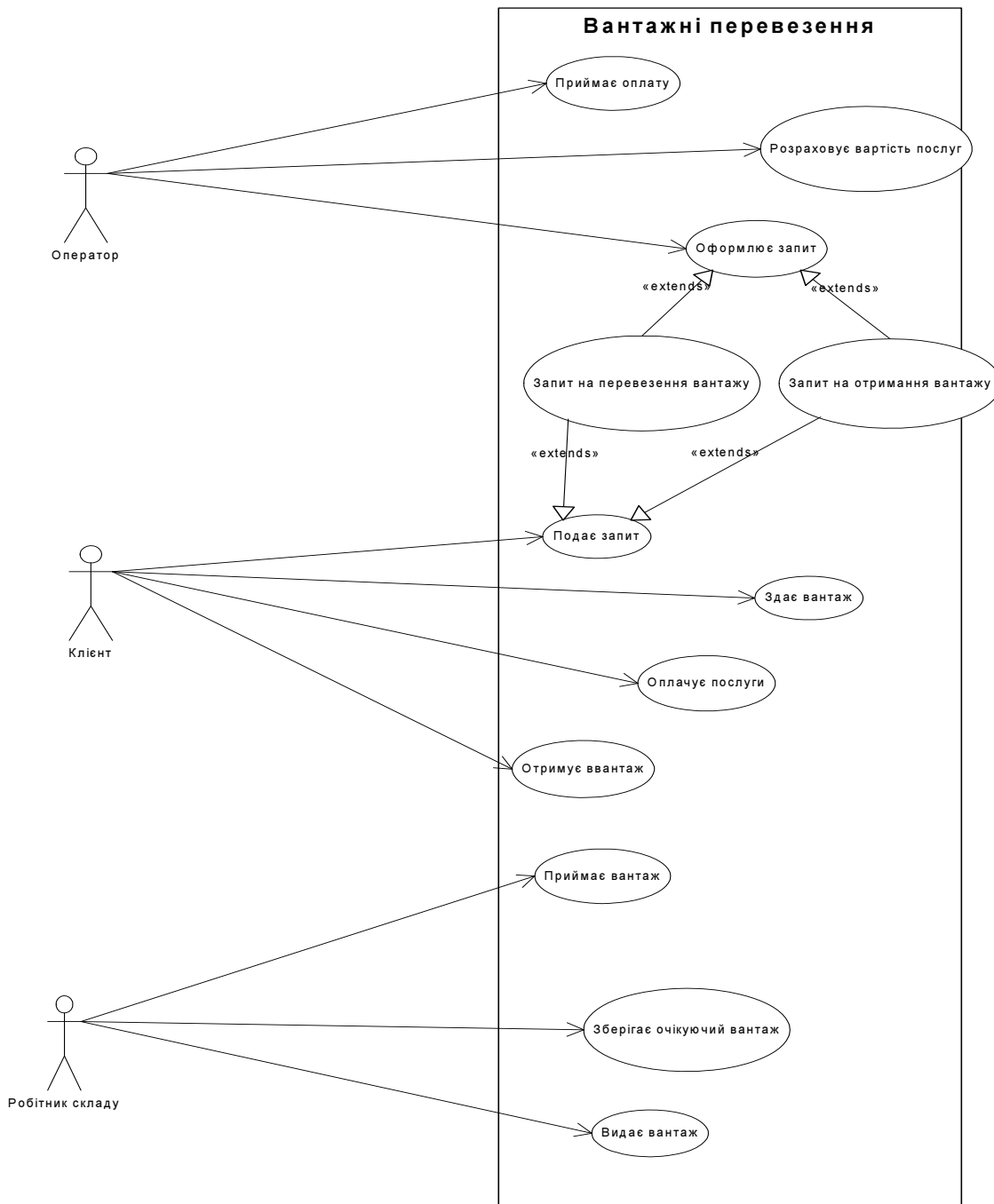


Рис.3. Діаграма прецедентів

Діаграма ідентифікує ці зовнішні сутності, а також, як правило, єдиний процес, що відображає головну мету або природу системи наскільки це можливо.

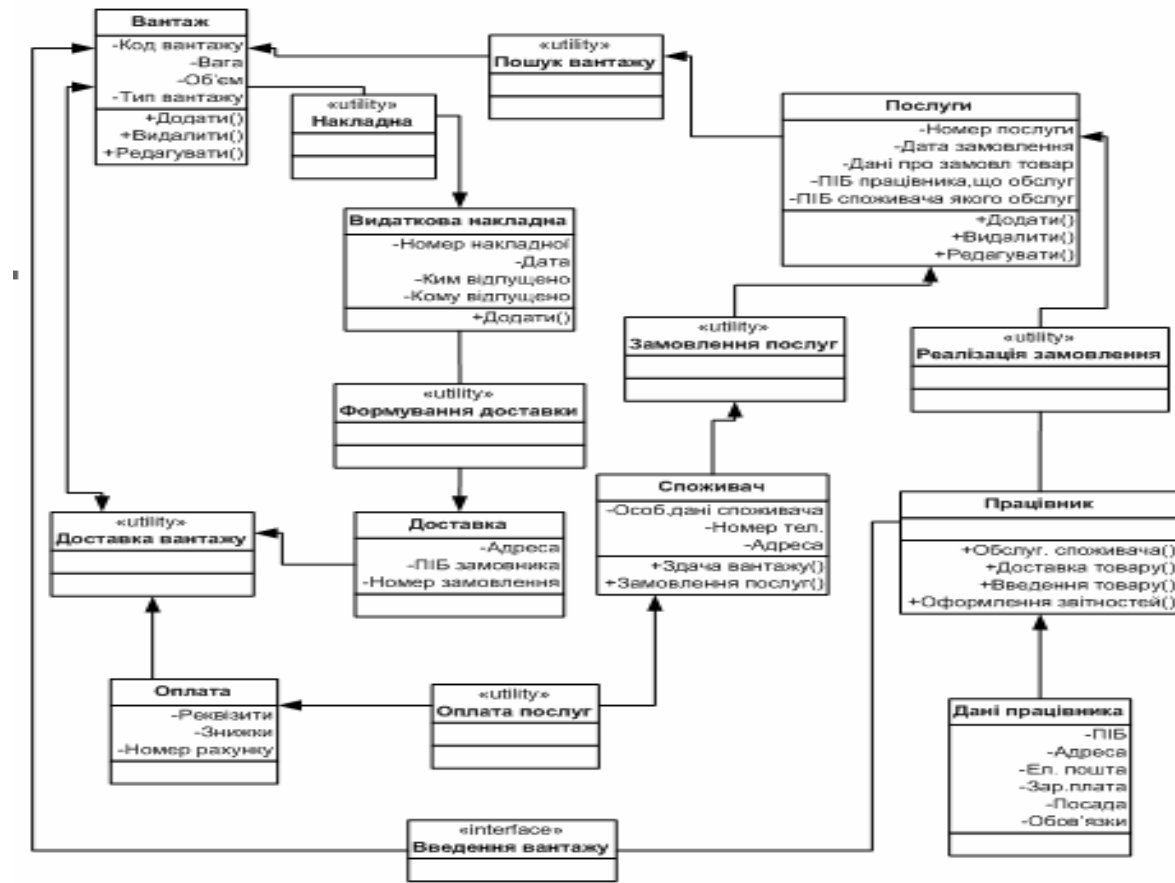


Рис. 4. Діаграма класів

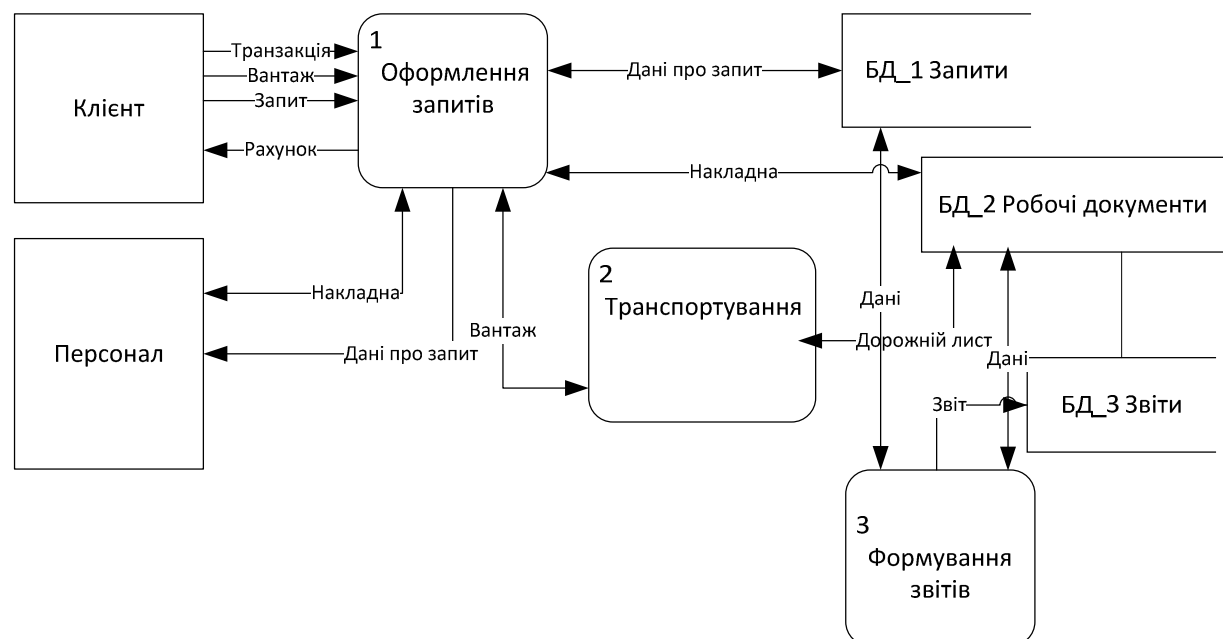


Рис. 5. Діаграма потоків даних

Висновки

На основі аналізу було проведено моделювання роботи системи, що проектується. Побудовані моделі показують роботу системи з різних точок зору та є основою для розробки інформаційного та програмного забезпечення.

Список літератури

1. Буч Г. UML / Буч Г., Якобсон А., Рамбо Дж. – М.: Питер, 2006. – 736 с.
2. Грейді Б. Мова UML. Керівництво користувача / Грейді Б., Рамбо Д., Джекобсон А. – М.: ДМК Пресс, Пітер, 2004. – 432 с.
3. Крег Л. Застосування UML 2.0 і шаблонів проектування / Крег Л. – М.: Вільямс, 2006. – 736 с.
4. Чері С. Логическое программирование и базы данных / Чері С., Готлоб Г., Танке Л. – М.: Мир, 1992. – 274 с.

Осуществлено поетапное моделирование информационно-управляющей системы по грузовым перевозкам. На основе этого были построены диаграммы FDD, последовательности, потоков данных, прецедентов, классов.

Информационное обеспечение, база данных, моделирование, язык UML, диаграмма, информационная система, грузовые перевозки.

Carried out stepwise modeling management information system for freight. On what basis were the diagrams of FDD, the sequence of data streams precedents classes.

Provision of information, database, modeling, language UML, diagram, information system, freight transportation.

УДК 681.5.07

АЛГОРИТМИ ПОБУДОВИ ОБЛАСТЕЙ ДОПУСКІВ ДЛЯ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ

Л.А.Панталієнко, кандидат фізико-математичних наук

Наведено результати чисельного розрахунку областей допусків на параметри для лінійних параметричних систем зі змінною структурою. Розглянуто постановки задач розрахунку допусків, що охоплюються алгоритмами практичної стійкості.

Допуски на параметри, стійкість, критерії оцінки, системи зі змінною структурою.

При проектуванні структурно-заданих систем керування часто виникає необхідність оцінити область допусків на параметри, що забезпечували б функціонування реального динамічного об'єкта [1 – 3]. Зокрема як

Висновки

На основі аналізу було проведено моделювання роботи системи, що проектується. Побудовані моделі показують роботу системи з різних точок зору та є основою для розробки інформаційного та програмного забезпечення.

Список літератури

1. Буч Г. UML / Буч Г., Якобсон А., Рамбо Дж. – М.: Питер, 2006. – 736 с.
2. Грейді Б. Мова UML. Керівництво користувача / Грейді Б., Рамбо Д., Джекобсон А. – М.: ДМК Пресс, Пітер, 2004. – 432 с.
3. Крег Л. Застосування UML 2.0 і шаблонів проектування / Крег Л. – М.: Вільямс, 2006. – 736 с.
4. Чері С. Логическое программирование и базы данных / Чері С., Готлоб Г., Танке Л. – М.: Мир, 1992. – 274 с.

Осуществлено поетапное моделирование информационно-управляющей системы по грузовым перевозкам. На основе этого были построены диаграммы FDD, последовательности, потоков данных, прецедентов, классов.

Информационное обеспечение, база данных, моделирование, язык UML, диаграмма, информационная система, грузовые перевозки.

Carried out stepwise modeling management information system for freight. On what basis were the diagrams of FDD, the sequence of data streams precedents classes.

Provision of information, database, modeling, language UML, diagram, information system, freight transportation.

УДК 681.5.07

АЛГОРИТМИ ПОБУДОВИ ОБЛАСТЕЙ ДОПУСКІВ ДЛЯ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ

Л.А.Панталієнко, кандидат фізико-математичних наук

Наведено результати чисельного розрахунку областей допусків на параметри для лінійних параметричних систем зі змінною структурою. Розглянуто постановки задач розрахунку допусків, що охоплюються алгоритмами практичної стійкості.

Допуски на параметри, стійкість, критерії оцінки, системи зі змінною структурою.

При проектуванні структурно-заданих систем керування часто виникає необхідність оцінити область допусків на параметри, що забезпечували б функціонування реального динамічного об'єкта [1 – 3]. Зокрема як

параметри можна розглядати початкові умови або ж інші величини, що характеризують особливості досліджуваної системи. Так, для систем зі змінною структурою [4] як параметри розглядають точки перемкнення – це моменти часу, що визначають зміну одного рівняння іншим. У рамках цього напрямку пропонується побудову областей допусків для лінійних систем здійснювати за допомогою алгоритмів практичної стійкості [2].

Мета досліджень – розробка конструктивних алгоритмів побудови областей допусків на параметри для лінійних систем зі змінною структурою методами практичної стійкості.

Матеріали і методика досліджень. У роботі застосовуються математичні методи аналізу практичної стійкості та чутливості, що ґрунтуються на методі функцій Ляпунова. На відміну від класичних постановок, дослідження стійкості здійснюється на скінченному проміжку часу, а динамічні обмеження на розкид станів параметричної системи конкретизуються.

Розглянемо лінійну систему зі змінною структурою:

$$\frac{dx}{dt} = A^{(i)}(t)x + G^{(i)}(t)\alpha, \quad t \in [t_{i-1}, t_i], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

де $A^{(i)}(t)$, $G^{(i)}(t)$, $t \in [t_{i-1}, t_i]$, $i = 1, 2, \dots, N$ – матриці з інтегровними елементами вимірності $n \times n$ та $n \times m$ відповідно, а початкові умови є фіксованими: $x(t_0) = x_0$.

Нехай $\bar{\alpha}$, $\bar{x} = x(t, \bar{\alpha})$ – розрахункові значення вектора параметрів і траєкторії системи (1). Тоді для векторів розкиду $y = x - \bar{x}$, $\beta = \alpha - \bar{\alpha}$, одержимо систему:

$$\frac{dy}{dt} = A^{(i)}(t)y + G^{(i)}(t)\beta, \quad t \in [t_{i-1}, t_i], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

але з нульовими початковими умовами $y(t_0) = 0$.

Задача оцінки допусків на параметри формулюється так: визначити множину допустимих параметрів $G^{(\beta)}$ так, щоб траєкторії системи (2) належали множині допустимих станів Φ_t , $t \in [t_0, T]$.

Означення. Будемо казати, що системи (2) має $\{G^{(\beta)}, \Phi_t, t_0, T\}$ – оцінку допусків на параметри β , якщо $y(t, \beta) \in \Phi_t$, $t \in [t_0, T]$ для будь-яких $\beta \in G^{(\beta)}$.

У наведеній конкретизації задача оцінювання множини $G^{(\beta)}$ повністю вкладається у постановки задач практичної стійкості параметричних систем зі змінною структурою [2]. Так, для фіксованих початкових умов, задача оцінки допусків на параметри являє собою задачу $\{G_0^x, G_0^\alpha, \Phi_t, t_0, T\}$ – стійкості у просторі векторів розкиду y , β , оскільки множина G_0^x складається з однієї нульової точки.

Якщо задати множину $G^{(\beta)}$ структурно у формі еліпсоїда $G^{(\beta)} = \{\beta : \beta^* G \beta \leq c^2\}$, а динамічні обмеження взяти лінійними

$$\Phi_t = \Gamma_t = \{y : |l_s^*(t)y| \leq 1, s = 1, 2, \dots, N\}, \quad t \in [t_0, T], \quad (3)$$

якість допусків буде визначатися $\{c, G, \Gamma_t, t_0, T\}$ – оцінкою.

Критерій 1. Для $\{c, G, \Gamma_t, t_0, T\}$ — оцінки на параметри β системи (2) необхідно і достатньо, щоб виконувалась нерівність

$$c^2 \leq \min_{i=1,2,\dots,N} \min_{t \in [t_{i-1}, t_i]} \min_{s=1,2,\dots,N} \frac{1}{l_s^*(t) R^{(i)}(t) B^{-1} R^{(i)*}(t) l_s(t)},$$

$$t \in [t_{i-1}, t_i], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad s = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

Тут

$R^{(i)}(t) = X^{(i)}(t, t_{i-1}) X^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2}) \dots X^{(2)}(t_2, t_1) \tilde{G}^{(1)}(t_1) + X^{(i)}(t, t_{i-1}) X^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2}) \dots$
 $X^{(3)}(t_3, t_2) \tilde{G}^{(2)}(t_2) + \dots + X^{(i)}(t, t_{i-1}) \tilde{G}^{(i-1)}(t_{i-1}) + \tilde{G}^{(i)}(t), \quad \tilde{G}^{(i)}(t) = \int_{t_{i-1}}^t X^{(i)}(t, \tau) G^{(i)}(\tau) d\tau;$
 $t \in [t_{i-1}, t_i], \quad i = 1, 2, \dots, N.$ Фундаментальна матриця розв'язків $X^{(i)}(t, t_{i-1})$ однорідної системи (1), нормована за моментом t_{i-1} , визначається за таким матричним рівнянням:

$$\frac{dX^{(i)}(t, t_{i-1})}{dt} = A^{(i)}(t) X^{(i)}(t, t_{i-1}), \quad X(t_{i-1}, t_{i-1}) = E, \quad t \in [t_{i-1}, t_i]. \quad (5)$$

Підкреслимо, що у співвідношеннях (3) $l_s(t)$, $s = 1, 2, \dots, N$ — задані вектори вимірності n з кусково-неперервними елементами.

Для випадку нелінійних обмежень на вектор розкиду y

$$\Phi_t = \Psi_t = \{y: \psi(y, t) \leq 1\}, \quad t \in [t_0, T], \quad (6)$$

де $\psi(x, t)$ — неперервно-диференційовні по x , t скалярні функції, якість допусків буде визначатися $\{c, G, \Psi_t, t_0, T\}$ — оцінкою.

Критерій 2. Для $\{c, G, \Psi_t, t_0, T\}$ — оцінки на параметри β системи (2) необхідно та достатньо, щоб виконувалась нерівність

$$c^2 \leq \min_{i=1,2,\dots,N} \min_{t \in [t_{i-1}, t_i]} \min_{y \in \Psi'_t} \frac{[g^*(\bar{y}, t) \bar{y}]^p}{g^*(\bar{y}, t) R^{(i)}(t) B^{-1} R^{(i)*}(t) g(\bar{y}, t)},$$

$$g^*(\bar{y}, t) \bar{y} > 0, \quad \bar{y} \in \Psi'_t, \quad t \in [t_{i-1}, t_i], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

де $g^*(\bar{y}, t) = \text{grad}_{\bar{y}}^* \psi(\bar{y}, t)$, $\bar{y} \in \Psi'_t$, Ψ'_t — межа опуклої замкненої множини Ψ_t , $t \in [t_0, T]$.

Крім того, у наведеному критерії за змінною t умова диференційовності для функції $\psi(x, t)$ може, взагалі кажучи, і не виконуватись у точках перемкнення t_i , $i = 1, 2, \dots, N$.

Для лінійного відносно α типу початкових умов: $x_0(\alpha) = X_0 \alpha$, де X_0 — відома матриця вимірності $n \times m$, критерії оцінки допусків (4), (7) набувають відповідно вигляду:

$$c^2 \leq \min_{i=1,2,\dots,N} \min_{t \in [t_{i-1}, t_i]} \min_{s=1,2,\dots,N} \frac{1}{l_s^*(t) \tilde{R}^{(i)}(t) B^{-1} \tilde{R}^{(i)*}(t) l_s(t)},$$

$$t \in [t_{i-1}, t_i], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad s = 1, 2, \dots, N;$$

$$c^2 \leq \min_{i=1,2,\dots,N} \min_{t \in [t_{i-1}, t_i]} \min_{y \in \Psi'_t} \frac{[g^*(\bar{y}, t) \bar{y}]^p}{g^*(\bar{y}, t) \tilde{R}^{(i)}(t) B^{-1} \tilde{R}^{(i)*}(t) g(\bar{y}, t)},$$

$$g^*(\bar{y}, t) \bar{y} > 0, \quad \bar{y} \in \Psi'_t, \quad t \in [t_{i-1}, t_i], \quad i = 1, 2, \dots, N;$$

причому $\tilde{R}^{(i)}(t) = X^{(i)}(t, t_{i-1}) X^{(i-1)}(t_{i-1}, t_{i-2}) \dots X^{(1)}(t_1, t_0) X_0 + R^{(i)}(t)$.

Якщо рух об'єкта описується системою (1) при $t \neq t_i$, а у точках перемкнення t_i , $i = 1, 2, \dots, N$ підпорядкований умові

$$x(t_i + 0) = C^{(i)} x(t_i - 0), \quad i = 1, 2, \dots, N_1 - 1, \quad (8)$$

залежно від типу обмежень Φ_i , $t \in [t_0, T]$, мають місце такі оцінки:

$$c^2 \leq \min_{i=1,2,\dots,N_1} \min_{t \in [t_{i-1}, t_i]} \min_{s=1,2,\dots,N} \frac{1}{l_s^*(t) \bar{R}^{(i)}(t) B^{-1} \bar{R}^{(i)*}(t) l_s(t)}, \quad (9)$$

$$t \in [t_{i-1}, t_i), \quad i = 1, 2, \dots, N_1, \quad s = 1, 2, \dots, N;$$

$$c^2 \leq \min_{i=1,2,\dots,N_1} \min_{t \in [t_{i-1}, t_i]} \min_{y \in \Psi'_i} \frac{[g^*(\bar{y}, t) \bar{y}]^2}{g^*(\bar{y}, t) \bar{R}^{(i)}(t) B^{-1} \bar{R}^{(i)*}(t) g(\bar{y}, t)}, \quad (10)$$

$$g^*(\bar{y}, t) \bar{y} > 0, \quad \bar{y} \in \Psi'_i, \quad t \in [t_{i-1}, t_i), \quad i = 1, 2, \dots, N_1.$$

Тут

$$\begin{aligned} \bar{R}^{(i)}(t) = & X^{(i)}(t, t_{i-1} + 0) C^{(i-1)} X^{(i-1)}(t_{i-1} - 0, t_{i-2} + 0) C^{(i-2)} X^{(i-2)}(t_{i-2} - 0, t_{i-3} + 0) \dots C^{(1)} \\ & X^{(1)}(t_1 - 0, t_0) X_0 + X^{(i)}(t, t_{i-1} + 0) C^{(i-1)} X^{(i-1)}(t_{i-1} - 0, t_{i-2} + 0) C^{(i-2)} X^{(i-2)}(t_{i-2} - 0, t_{i-3} + 0) \dots \\ & X^{(2)}(t_2 - 0, t_1 + 0) C^{(1)} \tilde{G}^{(1)}(t_1 - 0) + X^{(i)}(t, t_{i-1} + 0) C^{(i-1)} X^{(i-1)}(t_{i-1} - 0, t_{i-2} + 0) C^{(i-2)} \\ & X^{(i-2)}(t_{i-2} - 0, t_{i-3} + 0) \dots X^{(3)}(t_3 - 0, t_2 + 0) C^{(2)} \tilde{G}^{(2)}(t_2 - 0) + X^{(i)}(t, t_{i-1} + 0) C^{(i-1)} \\ & X^{(i-1)}(t_{i-1} - 0, t_{i-2} + 0) \dots X^{(4)}(t_4 - 0, t_3 + 0) C^{(3)} \tilde{G}^{(3)}(t_3 - 0) + X^{(i)}(t, t_{i-1} + 0) C^{(i-1)} \\ & \tilde{G}^{(i-1)}(t_{i-1} - 0) + \tilde{G}^{(i)}(t), \quad t \in [t_{i-1}, t_i), \quad i = 1, 2, \dots, N_1. \end{aligned}$$

Зокрема, якщо початкові умови системи з розривними координатами є фіксованими, потрібно перший доданок у виразі $\bar{R}^{(i)}(t)$ прирівняти до нуля та скористатися оцінками (9), (10).

На підставі наведених досліджень можна проводити оцінювання області допусків у випадку нелінійності як самої системи, так і відповідних початкових умов.

Результати досліджень. Для лінійних параметричних систем зі змінною структурою доведено критерії оцінки області допусків на параметри у заданих структурах. Розглянуто постановки задач розрахунку допусків для фіксованих і лінійних початкових умов при конкретних типах динамічних обмежень.

Висновки

На підставі критеріїв практичної стійкості для параметричних систем зі змінною структурою розроблено алгоритми оцінки областей допусків параметрів, зв'язаних з підвищенням ефективності 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. Оцінювання областей стійкості параметричних систем зі змінною структурою / Л.А. Панталієнко // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2013. – Вип. 184, ч.1. – С. 269–273.

3. Розенвассер Е.Н. Чувствительность систем управления / Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов.— М.: Наука, 1981. — 464 с.

4. 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 допусков на параметры для линейных параметрических систем с переменной структурой. Рассмотрены постановки задач расчета допусков, которые включаются в алгоритмы практической устойчивости.

Допуски на параметры, устойчивость, критерии оценки, системы с переменной структурой.

The results of numerical calculation of tolerance on the parameters for parametric linear systems with variable structure. Considered problem statement calculating tolerances covered algorithms practical stability.

Tolerances on parameters, stability, evaluation criteria, systems with variable structure.

УДК 519.21

УМОВИ ВИНИКНЕННЯ РОЗВ'ЯЗКІВ СЛАБОЗБУРЕНИХ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ (ВИПАДОК $k = -2$)

Р.Ф. Овчар, кандидат фізико-математичних наук

Запропоновано і доведено теорему для отримання достатніх умов існування розв'язків слабозбурених лінійних неоднорідних крайових задач з імпульсною дією у випадку, коли умова $P_{B_0} = 0$, $P_{B_0} P_{Q_2} = 0$ не виконується.

Слабозбурена лінійна неоднорідна крайова задача, однорідна крайова задача з імпульсною дією, ортопроектор, ряд, псевдо-обернена матриця.

Актуальність цієї теми обумовлена, перш за все, важливістю практичного застосування теорії крайових задач у теорії нелінійних коливань, теорії стійкості руху, теорії управління, ряді геофізичних задач. З іншого боку, отримані в статті нові результати суттєво доповнюють дослідження по теорії нелінійних коливань для слабозбурених крайових задач.

Мета досліджень — знаходження достатніх умов існування розв'язків лінійних неоднорідних імпульсних крайових задач з малими збуреннями у випадку, коли породжуюча крайова задача з імпульсною дією не має розв'язків при довільних правих частинах.

3. Розенвассер Е.Н. Чувствительность систем управления / Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов.— М.: Наука, 1981. — 464 с.

4. 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 допусков на параметры для линейных параметрических систем с переменной структурой. Рассмотрены постановки задач расчета допусков, которые включаются в алгоритмы практической устойчивости.

Допуски на параметры, устойчивость, критерии оценки, системы с переменной структурой.

The results of numerical calculation of tolerance on the parameters for parametric linear systems with variable structure. Considered problem statement calculating tolerances covered algorithms practical stability.

Tolerances on parameters, stability, evaluation criteria, systems with variable structure.

УДК 519.21

УМОВИ ВИНИКНЕННЯ РОЗВ'ЯЗКІВ СЛАБОЗБУРЕНИХ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ (ВИПАДОК $k = -2$)

Р.Ф. Овчар, кандидат фізико-математичних наук

Запропоновано і доведено теорему для отримання достатніх умов існування розв'язків слабозбурених лінійних неоднорідних крайових задач з імпульсною дією у випадку, коли умова $P_{B_0} = 0$, $P_{B_0} P_{Q_2} = 0$ не виконується.

Слабозбурена лінійна неоднорідна крайова задача, однорідна крайова задача з імпульсною дією, ортопроектор, ряд, псевдо-обернена матриця.

Актуальність цієї теми обумовлена, перш за все, важливістю практичного застосування теорії крайових задач у теорії нелінійних коливань, теорії стійкості руху, теорії управління, ряді геофізичних задач. З іншого боку, отримані в статті нові результати суттєво доповнюють дослідження по теорії нелінійних коливань для слабозбурених крайових задач.

Мета досліджень — знаходження достатніх умов існування розв'язків лінійних неоднорідних імпульсних крайових задач з малими збуреннями у випадку, коли породжуюча крайова задача з імпульсною дією не має розв'язків при довільних правих частинах.

Матеріали та методика досліджень. При дослідженні розв'язків поставленої задачі використано методи теорії збурень, розроблені в працях А.М.Ляпунова та його послідовників, асимптотичні методи нелінійної механіки, розроблені в працях М.М.Крилова, М.М.Боголюбова, Ю.О.Митропольського та А.М.Самойленка.

Результати досліджень. Введемо такі позначення: $Q = lX(\cdot) - (m \times n)$ – вимірна матриця; $Q^* = Q^T - (n \times m)$ – вимірна матриця; $P_{Q^*} - (m \times n)$ – вимірна матриця (ортопроектор), яка проектує $\mathbb{R}^m$ на $N(Q^*)$, $P_{Q^*}: \mathbb{R}^m \rightarrow N(Q^*)$; $P_{Q_d^*} - (d \times m)$ – вимірна матриця, рядки якої є повною системою d лінійно незалежних рядків матриці P_{Q^*} ; Q^+ – єдина псевдообернена за Муром-Пенроузом до $Q (n \times m)$ – вимірна матриця; $P_{B_0} - (r \times r)$ – вимірна матриця (ортопроектор), яка проектує $\mathbb{R}^r$ на нуль-простір $N(B)$ $(d \times r)$ – вимірної матриці B_0 , $P_{B_0}: \mathbb{R}^r \rightarrow N(B_0)$; $P_{B_0^*} - (d \times d)$ – вимірна матриця (ортопроектор), яка проектує $\mathbb{R}^d$ на нуль-простір $N(B_0^*)$ $(r \times d)$ – вимірної матриці $B_0^* = B_0^T$, $P_{B_0^*}: \mathbb{R}^d \rightarrow N(B_0^*)$.

Якщо умова $P_{B_0} = 0$, $P_{B_0^*} P_{Q_d^*} = 0$ не виконується, то для отримання достатніх умов існування розв'язків крайової задачі

$$\begin{cases} \dot{z} = A(t)z + \varepsilon A_1(t)z + f(t), & t \neq \tau_i; \\ \Delta z|_{t=\tau_i} - S_i z = \alpha_i + \varepsilon A_{1i} z(\tau_i - 0); \\ lz = \alpha + \varepsilon l_1 z \end{cases} \quad (1)$$

при довільних неоднорідностях $f(t) \in C([a, b] \setminus \{\tau_i\}_I)$, $\alpha_i \in \mathbb{R}^n$ і $\alpha \in \mathbb{R}^m$ приходимо до теореми, яка узагальнює відповідний результат для крайових задач без імпульсів з [1].

Теорема. Нехай $\text{rank } Q = n_1 < n$ і критерій розв'язності

$$P_{Q_d^*} \left\{ \alpha - l \int_a^b K(\cdot, \tau) f(\tau) d\tau - l \sum_{i=1}^p \bar{K}(\cdot, \tau_i) \alpha_i \right\} = 0, d = m - n_1$$

не виконується. Іншими словами, припустимо, що породжуюча крайова задача, яка отримується з (1) при $\varepsilon = 0$:

$$\begin{cases} \dot{z} = A(t)z + f(t), & t \neq \tau_i; \\ \Delta z|_{t=\tau_i} - S_i z = \alpha_i; \\ lz = \alpha \end{cases} \quad (2)$$

не має розв'язків при довільних неоднорідностях $f(t) \in C([a, b] \setminus \{\tau_i\}_I)$, $\alpha_i \in \mathbb{R}^n$, $\alpha \in \mathbb{R}^m$. Тоді справедливі такі еквівалентні твердження:

а) при довільних $f(t) \in C([a, b] \setminus \{\tau_i\}_I)$, $\alpha_i \in \mathbb{R}^n$ і $\alpha \in \mathbb{R}^m$ крайова задача (1) має єдиний розв'язок $z(t, \varepsilon)$ у вигляді збіжного при $\varepsilon \in (0, \varepsilon_*)$ ряду

$$z(t, \varepsilon) = \sum_{i=-2}^{+\infty} \varepsilon^i z_i(t); \quad (3)$$

б) при довільному r -вимірному постійному векторі $\varphi_0 \in \mathbb{R}^r$ r -вимірна алгебраїчна система

$$(B_0 + \varepsilon B_1 + \dots) u_\varepsilon = \varphi_0 \quad (4)$$

має єдиний розв'язок у вигляді збіжного при $\varepsilon \in (0, \varepsilon_*)$ ряду

$$u_\varepsilon = \sum_{i=-1}^{+\infty} \varepsilon^i u_i; \quad (5)$$

в) виконанні умови

$$P_{B_0} \neq 0, \quad P_{B_0} P_{B_1} = 0, \quad P_{B_0} P_{B_1} P_{Q_0^*} = 0. \quad (6)$$

При цьому умови $P_{B_0} \neq 0$, $P_{B_0} P_{B_1} = 0$ забезпечують єдиність, а умова $P_{B_0} P_{B_1} P_{Q_0^*} = 0$ – існування розв'язків.

Доведення. Підставимо ряд (3) у крайову задачу (1) і прирівняємо коефіцієнти при однакових степенях ε .

При ε^{-2} отримаємо однорідну крайову задачу:

$$\begin{cases} \dot{z}_{-2} = A(t)z_{-2}, \quad t \neq \tau_i; \\ \Delta z_{-2}|_{t=\tau_i} = S_i z_{-2}(\tau_i - 0); \\ l z_{-2} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

яка за припущенням теореми має r -параметричну систему ($r = n - n_1$, $n_1 = \text{rank } Q$) розв'язків виду $z_{-2}(t) = X_r(t)c_{-1}$, де c_{-1} – довільний r -вимірний вектор-стовпець із $\mathbb{R}^r$.

При ε^{-1} приходимо до крайової задачі:

$$\begin{cases} \dot{z}_{-1} = A(t)z_{-1} + A_1(t)z_{-2}, \quad t \neq \tau_i; \\ \Delta z_{-1}|_{t=\tau_i} = S_i z_{-1}(\tau_i - 0) + A_{1i} z_{-2}(\tau_i - 0); \\ l z_{-1} = l_1 z_{-2}. \end{cases} \quad (8)$$

Для цієї крайової задачі з врахуванням $B_0 = P_{Q_0^*} \left\{ l_1 X_r(\cdot) - l \int_a^b K(\cdot, \tau) A_1(\tau) X_r(\tau) d\tau - l \sum_{i=1}^p \bar{K}(\cdot, \tau_i) A_{1i} X_r(\tau_i - 0) \right\}$ отримаємо алгебраїчну відносно $c_{-1} \in \mathbb{R}^r$ систему

$$B_0 c_{-1} = 0.$$

При цьому крайова задача (8) має r -параметричну систему розв'язків виду

$$z_{-1}(t) = X_r(t)c_0 + G_1(t)c_{-1},$$

де c_0 – довільний r -вимірний вектор-стовпець із $\mathbb{R}^r$;

$G_1(t)c_{-1} = \bar{z}_{-1}(t) = \left(G \begin{bmatrix} A_1(\tau)z_{-2}(\tau, c_{-1}) \\ A_{1i}z_{-2}(\tau_i - 0) \end{bmatrix} \right)(t) + X(t)Q^+ l_1 z_{-2}(\cdot, c_{-1})$ – частинний розв'язок задачі (8);

вираз $\left(G \begin{bmatrix} * \\ * \end{bmatrix}\right)(t)$ (7) має вигляд:

$$\left(G \begin{bmatrix} A_1(\tau)z_{-2}(\tau, c_{-1}) \\ A_{1i}z_{-2}(\tau_i - 0) \end{bmatrix}\right)(t) \stackrel{\text{def}}{=} \left(\left[\int_a^b K(t, \tau) * d\tau - X(t)Q^+l \int_a^b K(\cdot, \tau) * d\tau, \sum_{i=1}^p \bar{K}(t, \tau_i) * - X(t)Q^+l \sum_{i=1}^p \bar{K}(\cdot, \tau_i) *\right]\right) \times \\ \times \begin{bmatrix} A_1(\tau)z_{-2}(\tau, c_{-1}) \\ A_{1i}z_{-2}(\tau_i - 0) \end{bmatrix}.$$

Після прирівнювання коефіцієнтів при ε^0 одержимо крайову задачу для визначення $z_0(t)$:

$$\begin{cases} z'_0 = A(t)z_0 + A_1(t)z_{-1}(t) + f(t), & t \neq \tau_i; \\ \Delta z_0|_{t=\tau_i} = S_i z_0(\tau_i - 0) + A_{1i}z_{-1}(\tau_i - 0) + a_i; \\ lz_0 = \alpha + l_1 z_{-1}, \end{cases} \quad (9)$$

де $z_1(t) = X_r(t)c_0 + G_1(t)c_{-1}$.

Із умови (необхідної і достатньої) розв'язності

$$P_{Q_d^*} \left\{ \alpha - l \int_a^b K(\cdot, \tau) f(\tau) d\tau - l \sum_{i=1}^p \bar{K}(\cdot, \tau_i) a_i \right\} = 0, \quad d = m - n_1$$

для крайової задачі (9) відносно $c_0, c_1 \in \mathbb{R}^r$ маємо алгебраїчну систему

$$B_0 c_0 + B_1 c_{-1} = \varphi_0,$$

де φ_0 – r -вимірний довільний постійний вектор із $\mathbb{R}^r$ у силу довільності $f(t) \in C([a, b] \setminus \{\tau_i\}_I)$, $a_i \in \mathbb{R}^n$ і $\alpha \in \mathbb{R}^m$;

$$\varphi_0 = -P_{Q_d^*} \left\{ \alpha - l \int_a^b K(\cdot, \tau) f(\tau) d\tau - l \sum_{i=1}^p \bar{K}(\cdot, \tau_i) a_i \right\},$$

$d \times r$ – вимірна матриця B_1 має вигляд:

$$B_1 = P_{Q_d^*} \left\{ l_1 G_1(\cdot) - l \int_a^b K(\cdot, \tau) A_1(\tau) G_1(\tau) d\tau - l \sum_{i=1}^p \bar{K}(\cdot, \tau_i) A_{1i} G_1(\tau_i - 0) \right\}. \quad (10)$$

Крайова задача (9) має r -параметричну систему розв'язків:

$$z_0(t) = X_r(t)c_1 + G_1(t)c_0 + G_2(t)c_{-1} + f_1(t),$$

де c – довільний r -вимірний вектор-стовпець із $\mathbb{R}^r$;

$$G_2(t)c_{-1} = \left(G \begin{bmatrix} A_1(\tau)G_1(\tau)c_{-1} \\ A_{1i}G_1(\tau_i - 0)c_{-1} \end{bmatrix}\right)(t) + X(t)Q^+l_1 G_1(\cdot)c_{-1};$$

$$f_1(t) = \left(G \begin{bmatrix} f(\tau) \\ a_i \end{bmatrix}\right)(t) + X(t)Q^+ \alpha.$$

Продовжуючи цю процедуру, зауважимо, що для того, щоб ряд (3) був розв'язком крайової задачі (1) при довільних неоднорідностях $f(t) \in C([a, b] \setminus \{\tau_i\}_I)$, $a_i \in \mathbb{R}^n$ і $\alpha \in \mathbb{R}^m$ необхідно і достатньо, щоб була

розв'язна відносно $c_i \in \mathbb{R}^r (i = -1, 0, 1, \dots)$ така система алгебраїчних рівнянь при довільному $\varphi_0 \in \mathbb{R}^r$:

$$\begin{cases} B_0 c_{-1} = 0; \\ B_0 c_0 + B_1 c_{-1} = \varphi_0 \end{cases} \quad (11)$$

і далі

$$\begin{cases} B_0 c_1 + B_1 c_0 + B_2 c_{-1} = \varphi_1; \\ B_0 c_2 + B_1 c_1 + B_2 c_0 + B_3 c_{-1} = \varphi_2. \end{cases} \quad (12)$$

З іншого боку, підставляючи ряд (5) у (4), отримаємо, що для того, щоб ряд (5) був розв'язком системи (4), необхідно і достатньо, щоб коефіцієнти $u_i \in \mathbb{R}^r$ задовольняли системі, аналогічній (11), (12), але з $\varphi_i = 0, i = 1, 2, \dots$:

$$\begin{cases} B_0 u_{-1} = 0; \\ B_0 u_0 + B_1 u_{-1} = \varphi_0 \end{cases} \quad (13)$$

і далі

$$\begin{cases} B_0 u_1 + B_1 u_0 + B_2 u_{-1} = 0; \\ B_0 u_2 + B_1 u_1 + B_2 u_0 + B_3 u_{-1} = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Для розв'язання системи алгебраїчних рівнянь (13) необхідно і достатньо виконати умову (6). Далі, для завершення доведення теореми підтвердимо, що в випадку розв'язності системи рівнянь (13), система рівнянь (14) також розв'язана, причому із умови розв'язності останнього рівняння (13) знаходимо коефіцієнт u_{-1} . Із умови розв'язності (що збігається з попередньою умовою) першого рівняння (14) знаходимо u_0 і т.д. Доведення цієї частини теореми повторює доведення відповідної теореми з [1], і тому не повторюється.

Висновки

Якщо умова $P_{B_0} = 0$, $P_{B_0} P_{Q_0} = 0$ не виконується, то для отримання достатніх умов існування розв'язків крайової задачі (1) при довільних неоднорідностях $f(t) \in C([a, b] \setminus \{\tau_i\}_I)$, $a_i \in \mathbb{R}^n$, $\alpha \in \mathbb{R}^m$ необхідно залучити $(d \times r)$ – вимірну матрицю B_1 (10). Розв'язок $z(t, \varepsilon)$ крайової задачі (1) шукається при цьому у вигляді збіжного при $\varepsilon \in (0, \varepsilon_*)$ ряду з $k \geq 2$.

Список літератури

1. Бойчук А.А. Конструктивные методы анализа краевых задач / А.А. Бойчук. – К.: Наук. думка, 1990. – 96 с.
2. Самойленко А.М. Дифференциальные уравнения с импульсным воздействием / А.М. Самойленко, Л.А. Перестюк. – К.: Вища шк., 1987. – 287 с.
3. Овчар Р.Ф. Дослідження розв'язків слабозбурених крайових задач для систем з імпульсною дією / Р.Ф. Овчар // Науковий вісник НУБіП України. – 2011. – Вип. 166, ч. 1. – С. 243–248.

Предложена и доказана теорема для получения достаточных условий существования решений слабозмущенных линейных неоднородных краевых

задач с импульсным воздействием в случае, когда условие $P_{B_0} = 0$, $P_{B_0}P_{Q_0^*} = 0$ не выполняется.

Слабовозмущенная линейная неоднородная краевая задача, однородная краевая задача с импульсным воздействием, ортопроектор, ряд, псевдообратная матрица.

It is proposed and proved a theorem to obtain sufficient conditions for the existence of solutions of weakly perturbed linear inhomogeneous boundary value problem in the case where the condition $P_{B_0} = 0$, $P_{B_0}P_{Q_0^} = 0$ is not fulfilled.*

Weakly perturbed linear inhomogeneous boundary value problem, homogeneous boundary value problem with impulse action, orthogonal projector, series, pseudoinverse.

УДК 517.51

ТОПОЛОГІЧНА ЕКВІВАЛЕНТНІСТЬ ФУНКЦІЙ

Т. Г. Криворот, асистент

Мовою альтернуючих послідовностей досліджено топологічну еквівалентність функцій. Доведено, що для кожної кусково-лінійної функції, яка має $n-1$ локальний екстремум, існує поліном степеня n , що є топологічно еквівалентний цій функції.

Топологічна еквівалентність, поліном, альтернуюча послідовність, кусково-лінійна функція.

Серед багатьох проблем, які стоять перед математиками, однією з важливих є дослідження поведінки функцій на різноманітних многовидах. Відомо, що багато процесів можна описати за допомогою гладких функцій [1], [4]. Наприклад, такі науки, як біологія, біофізика, фізика зараз суттєво використовують математичні знання відносно поведінки гладких функцій в околі критичних точок.

У теорії функцій важливим напрямком є проблема дослідження умов топологічної еквівалентності функцій. Цією проблемою займалися М. Морс, В. Каплан, В.В. Шарко, О.О. Пришляк, В.А. Арнольд, А.Т. Фоменко, С. Стоілов.

Мета досліджень – розгляд топологічної еквівалентності функцій зі скінченним числом екстремальних точок, наведення топологічної класифікації таких функцій з подальшим дослідженням умови їх топологічної еквівалентності.

Матеріали та методика досліджень. Для кожного класу еквівалентності вводиться невід'ємна функція, яка приймає в точках екстре-

задач с импульсным воздействием в случае, когда условие $P_{B_0} = 0$, $P_{B_0}P_{Q_0^*} = 0$ не выполняется.

Слабовозмущенная линейная неоднородная краевая задача, однородная краевая задача с импульсным воздействием, ортопроектор, ряд, псевдообратная матрица.

It is proposed and proved a theorem to obtain sufficient conditions for the existence of solutions of weakly perturbed linear inhomogeneous boundary value problem in the case where the condition $P_{B_0} = 0$, $P_{B_0}P_{Q_0^} = 0$ is not fulfilled.*

Weakly perturbed linear inhomogeneous boundary value problem, homogeneous boundary value problem with impulse action, orthogonal projector, series, pseudoinverse.

УДК 517.51

ТОПОЛОГІЧНА ЕКВІВАЛЕНТНІСТЬ ФУНКЦІЙ

Т. Г. Криворот, асистент

Мовою альтернуючих послідовностей досліджено топологічну еквівалентність функцій. Доведено, що для кожної кусково-лінійної функції, яка має $n-1$ локальний екстремум, існує поліном степеня n , що є топологічно еквівалентний цій функції.

Топологічна еквівалентність, поліном, альтернуюча послідовність, кусково-лінійна функція.

Серед багатьох проблем, які стоять перед математиками, однією з важливих є дослідження поведінки функцій на різноманітних многовидах. Відомо, що багато процесів можна описати за допомогою гладких функцій [1], [4]. Наприклад, такі науки, як біологія, біофізика, фізика зараз суттєво використовують математичні знання відносно поведінки гладких функцій в околі критичних точок.

У теорії функцій важливим напрямком є проблема дослідження умов топологічної еквівалентності функцій. Цією проблемою займалися М. Морс, В. Каплан, В.В. Шарко, О.О. Пришляк, В.А. Арнольд, А.Т. Фоменко, С. Стоілов.

Мета досліджень – розгляд топологічної еквівалентності функцій зі скінченним числом екстремальних точок, наведення топологічної класифікації таких функцій з подальшим дослідженням умови їх топологічної еквівалентності.

Матеріали та методика досліджень. Для кожного класу еквівалентності вводиться невід'ємна функція, яка приймає в точках екстре-

мумів всі цілі значення з множини $0,1,2,\dots,l$. Інваріантом функції, що дає відповідь на поставлені запитання, є альтернуючі послідовності [3], [4], [5].

Результати досліджень. Було розв'язано задачу про існування полінома топологічно еквівалентного кусково-лінійній функції.

Нехай X, Y – топологічні простори; $f, g: X \rightarrow Y$ неперервні відображення. Неперервне відображення $f: X \rightarrow Y$ між топологічними просторами X і Y називається гомеоморфізмом, якщо f є бієкцією та обернене відображення $f^{-1}: X \rightarrow Y$ – неперервне.

Означення 1. Неперервні відображення $f, g: X \rightarrow Y$ називаються *топологічно еквівалентними*, якщо існують гомеоморфізми $h: X \rightarrow X$ і $h': Y \rightarrow Y$, для яких виконується рівність $g \circ h = h' \circ f$.

Топологічна еквівалентність відображень — це комутативна діаграма

$$\begin{array}{ccc} M & \xrightarrow{f} & N \\ h \downarrow & & \downarrow h' \\ M & \xrightarrow{g} & N \end{array},$$

в якій вертикальними стрілками є гомеоморфізми.

Розглянемо випадок, коли $N = R$, тобто коли задано дві неперервні (гладкі) функції f і g , і будемо називати їх *топологічно еквівалентними*, якщо гомеоморфізм h' зберігає орієнтацію прямої R .

Питання, коли дві неперервні функції f і g зі скінченною кількістю екстремумів, які задані на відрізку $[a, b]$, будуть топологічно еквівалентними і скільки є різних типів таких топологічно еквівалентних функцій, у яких однакова кількість екстремумів приводять до вивчення комбінаторних об'єктів [2]. Відомо, що для послідовності додатних цілих чисел $0, 1, 2, \dots, n$, існує $(n+1)!$ перестановок цих чисел.

Адекватним інваріантом функції, який дає відповідь на поставлені запитання, є альтернуючі послідовності [4].

Означення 2. Альтернуючою послідовністю $A(k, l)$

1-го типу: $\langle \rangle$ назвемо послідовність $x_i, (0 \leq i \leq k)$, побудовану з чисел $0, 1, \dots, l$, для якої справедлива умова: $x_0 < x_1 > x_2 < x_3 > \dots < x_{k-1} > x_k$, де $l \leq k-1$;

2-го типу: $\langle \langle$ назвемо послідовність $x_i, (0 \leq i \leq k)$, для якої справедлива умова: $x_0 < x_1 > x_2 < x_3 > \dots > x_{k-1} < x_k$, де $l \leq k-1$;

3-го типу: $\rangle \rangle$ назвемо послідовність $x_i, (0 \leq i \leq k)$, для якої справедлива умова: $x_0 > x_1 < x_2 > x_3 < \dots < x_{k-1} > x_k$, де $l \leq k-1$;

4-го типу: $\rangle \langle$ назвемо послідовність $x_i, (0 \leq i \leq k)$, для якої справедлива умова: $x_0 > x_1 < x_2 > x_3 < \dots > x_{k-1} < x_k$.

Саме мовою альтернуючих послідовностей буде дано відповідь на поставлені запитання про топологічну еквівалентність функцій.

Альтернуючі послідовності будуються згідно з послідовністю значень функції в екстремальних точках, яка задана на відрізку. В послідовностях всіх типів можливі випадки, коли не всі числа $1, 2, \dots, l$ присутні. Якщо

в альтернуючій послідовності присутні всі числа $1, 2, \dots, l$, то будемо говорити, що альтернуюча послідовність відповідного типу є повною.

З визначення топологічної еквівалентності для неперервних функцій зі скінченною кількістю екстремумів випливає, що в кожному класі еквівалентності присутня невід'ємна функція, яка приймає в точках екстремумів всі цілочислові значення з множини $0, 1, 2, \dots, l$ [3], [4].

Поставимо у відповідність функції f на відрізку $[a, b]$ повну альтернуючу послідовність відповідного типу $A(k, l)$. Для цього розглянемо на відрізку $[a, b]$ послідовність $y_i, (0 \leq i \leq k)$ локальних екстремумів функції $f(y_0 = a, y_k = b), y_i < y_{i+1}$.

Позначимо через $x_i = f(y_i)$. Припустимо, що $f(a) < x_i; f(b) < x_{k-1}$. Тоді, очевидно, що послідовність $x_0 < x_1 > x_2 < x_3 > \dots < x_{k-1} > x_k$ утворює повну альтернуючу послідовність $A(k, l)$ типу $<>$. Побудова інших типів альтернуючих послідовностей є аналогічною.

Якщо розглянути на відрізку $[a, b]$ довільну неперервну функцію $y = f(x)$ зі скінченною кількістю локальних екстремумів, то за допомогою гомеоморфізму числової прямої $s: R^1 \rightarrow R^1$, що зберігає орієнтацію, функцію $y = f(x)$ можна замінити на функцію $z = s \circ f(x)$, яка вже буде відміченою функцією. Очевидно, якщо точка y_i – локальний максимум (мінімум) для функції f , то вона буде локальним максимумом (мінімумом) для функції $s \circ f$ і навпаки [1].

Оскільки гомеоморфізм s зберігає порядок точок, розташованих на числовій осі, то для сусідніх екстремальних точок y_i і y_{i+1} функції f нерівність $f(y_i) < f(y_{i+1})$ ($f(y_i) > f(y_{i+1})$) зберігається для функції $s \circ f$, тобто $s \circ f(y_i) < s \circ f(y_{i+1})$ ($s \circ f(y_i) > s \circ f(y_{i+1})$). Таким чином, неперервній функції $y = f(x)$ зі скінченною кількістю локальних екстремумів однозначно можна поставити у відповідність повну альтернуючу послідовність $A_f(k, l)$ певного типу залежно від кількості екстремумів функції f і значень, які функція f набуває в екстремальних точках.

Отже, для довільного класу еквівалентності неперервної функції $y = f(x)$ зі скінченною кількістю локальних екстремумів, яка задана на відрізку $[a, b]$, однозначно будується альтернуюча послідовність.

Нехай задана повна альтернуюча послідовність $A(k, l)$. Тоді, послідовності $A(k, l)$ можна поставити у відповідність кусково-лінійну криву $L(A(k, l))$. Зрозуміло, що кусково-лінійну криву $L(A(k, l))$ можна трактувати як графік неперервної функції $L(A(k, l))$ з $k+1$ локальними екстремумами та l значеннями в них, яка задана на відрізку $[a, b]$. Ясно, що внутрішні екстремальні точки вибираються неоднозначно, але їх порядок розташування на відрізку $[a, b]$ завжди один і той же.

Означення. Для повної альтернуючої послідовності $A(k, l)$ кусково-лінійну функцію $L(A(k, l))$ будемо називати *PL - реалізацією* послідовності $A(k, l)$.

Лема 1. Нехай на відрізку $[a, b]$ задана неперервна функція f зі скінченною кількістю екстремальних точок. Поставимо їй у відповідність її повну альтернуючу послідовність $A_f(k, l)$. Тоді функції f і $L(A_f(k, l))$ будуть топологічно еквівалентними.

Теорема 1. Дві неперервні функції $y = f(x)$ і $y = g(x)$ на відрізку $[a, b]$ зі скінченною кількістю локальних екстремумів будуть топологічно еквівалентними тоді і тільки тоді, коли збігаються їх повні альтернуючі послідовності $A_f(k, l)$ і $A_g(k, l)$.

Для довільної повної альтернуючої послідовності $A(k, l)$ можна побудувати таку неперервну на відрізку $[a, b]$ функцію зі скінченною кількістю локальних екстремумів, що її повна альтернуюча послідовність $A_f(k, l) \in A(k, l)$ [4].

Вибір гомеоморфізмів h і h' не є однозначним. Отже, якщо зафіксувати топологічні простори X і Y , то природно виникає дві задачі: 1) описати множину класів неперервних відображень з X і Y відносно введеного відношення еквівалентності; 2) вказати необхідні та достатні умови, коли два неперервних відображення f і g з X в Y будуть топологічно еквівалентними. Ці дві задачі дуже складні і відповідь не відома, наприклад, коли $X = Y = R^1$. Тому, ми будемо розглядати не загальний випадок, а обмежимося більш вузькими класами неперервних відображень, зокрема поліноміальними [5].

Гомеоморфізм $h' : R^1 \rightarrow R^1$ зберігає орієнтацію, тобто задається строго монотонно зростаючою функцією. Якщо функції $f : X \rightarrow R^1$ і $g : X \rightarrow R^1$ – топологічно еквівалентні і точка $x_0 \in X$ є точкою локального максимуму (мінімуму) функції f , точка $h(x)$ буде точкою локального максимуму (мінімуму) функції g . Якщо $f : [a, b] \rightarrow [c, d]$ – строго монотонна неперервна функція, то вона топологічно еквівалентна лінійній функції f , заданій на $[a, b]$ з безліччю значень, рівними $[c, d]$. Тут $[a, b]$ і $[c, d]$ – інтервали числової прямої, які можуть бути нескінченними.

Лема 2. Нехай $f : R^1 \rightarrow R^1$ – неперервна функція зі скінченним числом локальних екстремумів, тоді f топологічно еквівалентна кусково-лінійній функції.

Наслідок. Нехай $f : R^1 \rightarrow R^1$ – поліном, тоді він топологічно еквівалентний кусково-лінійній функції.

Теорема 2. (допоміжна) Нехай $\xi_1 \leq \xi_2 \leq \dots \leq \xi_{n-1}$, $\eta_1, \dots, \eta_{n-1}$ – дійсні числа. Тоді існує поліном $f : R^1 \rightarrow R^1$ степеня n такий, що $f'(\xi_i) = 0$; $f(\xi_i) = \eta_i, i = \overline{1, n-1}$ тоді і лише тоді, коли числа $(-1)^i(\eta_i - \eta_{i-1}), i = \overline{2, n-1}$ одного знака.

Теорема 3. Для кожної кусково-лінійної функції $l : R^1 \rightarrow R^1$, що має $n-1$ локальних екстремумів, існує поліном $f : R^1 \rightarrow R^1$ степеня n , який є топологічно еквівалентним функції l .

Доводимо, що f топологічно еквівалентний l . Потрібно знайти такі гомеоморфізми, щоб $f \circ h = h' \circ l$. Припустимо, що $h'(x) = x$, для довільного

[illegible]

Отже, $f \circ h = h' \circ l = l$.

Висновки

Список літератури

- На языке альтернирующих последовательностей исследовано топологическую эквивалентность функций. Доказано, что для каждой кусково-линейной функции, имеющей $n-1$ локальный экстремум, существует полином степени n , который топологично эквивалентен этой функции.

Топологическая эквивалентность, полином, альтернирующая последовательность, кусково-линейная функция.

Topological equivalence of functions was studied by the language of alternating sequences. It is proved that for every piecewise-linear function with $n-1$ local extrema, there polynomial degree n , which is topologically is equivalent to this function.

Topological equivalence, polynomial, alternating sequence, piecewise-linear function.