

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.А. Долинский, академик

Институт технической теплофизики НАН Украины

Б.Х. Драганов, доктор технических наук

В.В. Козырский, доктор технических наук

**Национальный университет биоресурсов
и природопользования Украины**

Изложены основы теории устойчивости систем, которая может оказаться справедливой при достаточно общих условиях, включая как равновесные, так и неравновесные состояния. Критерии устойчивости основаны на теории Ляпунова об устойчивости механических систем. Нестационарные состояния энтропии определены как функционал Ляпунова.

Неравновесные стационарные состояния, функционал Ляпунова, вариация энтропии, критерии устойчивости.

Цель исследований – на основе приведенных основных положений теории устойчивости формирование условий и критериев линейной устойчивости для случаев малых возмущений.

Материалы и методика исследований. Состояния, далекие от равновесия, могут терять свою устойчивость и переходить к одному из многих возможных состояний. Движимая внутренними флуктуациями или другими малыми воздействиями система переходит к одному из многих возможных новых состояний. Эти новые состояния могут быть высокоорганизованными [1, 2].

Формулировка Ляпунова определяет условия устойчивости в точной математической форме (с ясным интуитивным смыслом). Пусть X_s – стационарное состояние системы. В общем случае X может быть r -мерным вектором с компонентами X_k ($k = 1, 2, \dots, r$). Обозначим компоненты X_s как X_{sk} . Допустим, что эволюция X описывается уравнением:

$$\frac{dX_k}{dt} = Z_k(X_1, X_2, \dots, X_r; \lambda_j), \quad (1)$$

где λ_j – параметры, которые могут зависеть, а могут и не зависеть от времени. В общем случае, если X_k есть функция не только времени t , но и координаты X , уравнение (1) следует переписать в виде дифференциального уравнения в частных производных, в котором Z_k – оператор частного дифференцирования.

Стационарное состояние X_{sk} определяется решением системы уравнений:

$$\frac{dX_k}{dt} = Z_k(X_{s1}, X_{s2}, \dots, X_{sr}; \lambda_j) = 0 \quad (k=1, 2, \dots, r). \quad (2)$$

Для понимания устойчивости стационарного состояния можно рассмотреть поведение малых возмущений δX_k . Прежде всего определим по касательной к точке X_k положительную функцию $L(X_k)$ – так называемое «удаление». Если это «удаление» между X_{sk} и возмущенным состоянием ($X_{sk} + \delta X_k$) монотонно уменьшается со временем, то стационарное состояние устойчиво. Таким образом, состояние X_{sk} устойчиво, если

$$L(X_k) < 0; \quad \frac{dL(X_k)}{dt} < 0. \quad (3)$$

Функция L , удовлетворяющая (3), называется функцией Ляпунова. Если переменные X_k являются функциями координат (например, в неравновесных системах это могут быть концентрации n_k), L называется функционалом Ляпунова. «Функционал» – это отображение, сопоставляющее множеству функций действительное или комплексное число. Понятие устойчивости не ограничено стационарным состоянием; оно может быть расширено на периодические состояния [3]. Однако, поскольку здесь мы изучаем устойчивость неравновесных стационарных состояний, то не будем рассматривать устойчивость периодических (колебательных) состояний.

Результаты исследований. Энтропии – функция с определенным знаком для любой термодинамической системы. Рассматривая плотность энтропии s как функцию плотности энергии u и концентрации n_k , можно записать отклонение энтропии от стационарного состояния в виде [4]:

$$\Delta S = \int \left[\left(\frac{\partial s}{\partial u} \right)_{n_k} \delta u + \sum_k \left(\frac{\partial s}{\partial n_k} \right)_u \delta n_k \right] dV + \frac{1}{2} \int \left[\left(\frac{\partial^2 s}{\partial u^2} \right) \delta u^2 + 2 \sum_k \left(\frac{\partial^2 s}{\partial u \partial n_k} \right) \delta u \delta n_k + \sum_{ij} \left(\frac{\partial^2 s}{\partial n_i \partial n_j} \right) \delta n_i \delta n_j \right] dV = \delta S + \frac{1}{2} \delta^2 S. \quad (4)$$

Так как рассматривается неравновесное стационарное состояние, то термодинамические силы и соответствующие потоки энергии J_u и вещества J_k не обращаются в нуль. Следовательно, первая вариация отлична от нуля, $\delta S \neq 0$. Вторая вариация $\delta^2 S$ имеет определенный знак, потому что подинтегральное выражение, которое является второй вариацией равновесной энтропии в элементарном объеме, отрицательно:

$$\frac{1}{2} \delta^2 S < 0. \quad (5)$$

В итоге получаем соотношение [2]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\delta^2 S}{2} = \sum_k \delta F_k \delta J_k. \quad (6)$$

Уравнение (6) показывает, что производная по времени от $\delta^2 S$ имеет такой же вид даже при неравновесных условиях. Отличие состоит

в том, что вблизи равновесия $\sum_k \delta F_k \delta J_k \sum_k F_k J_k > 0$, что не обязательно выполняется вдали от равновесия. Это свойство называется избыточным производством энтропии, но, строго говоря, речь идет об увеличении производства энтропии только вблизи равновесия: для возмущений от неравновесного состояния увеличение производства энтропии составляет $\delta P = \delta_F P + \delta_J P$.

Выражения (5) и (6) определяли бы функционал Ляпунова $L = -\delta^2 S$, если бы в стационарном состоянии $\sum_k \delta F_k \delta J_k > 0$. Таким образом, неравновесное стационарное состояние устойчиво, если

$$\frac{d}{dt} \frac{\delta^2 S}{2} = \sum_k \delta F_k \delta J_k > 0. \quad (7)$$

Если неравенство (7) нарушается, то это означает, что система может быть неустойчивой, т.е. $\sum_k \delta F_k \delta J_k < 0$ является необходимым, но недостаточным условием неустойчивости.

Предположим вначале, что стационарное решение X_k^0 уравнения известно, а значит

$$Z_k(X_i^0, \dots, X_n^0, \lambda) = 0. \quad (8)$$

Необходимо выяснить, является ли это стационарное решение устойчивым к малым возмущениям x_i . Для этого выполняем линейный анализ устойчивости. Рассмотрим малое возмущение x_k :

$$X_k = X_k^0 + x_k. \quad (9)$$

Тогда разложение Z_k в ряд Тейлора дает

$$Z_k(X_i^0 + x_i) = Z_k(X_i^0) + \sum_j \left(\frac{\partial Z_k}{\partial X_j} \right)_0 x_j + \dots, \quad (10)$$

где индекс 0 указывает, что производная берется при стационарном состоянии X_i^0 . В линейном анализе устойчивости рассматриваются только линейные члены x_j ; члены более высокого порядка отбрасываются, так как предполагается, что x_j мало. Поскольку X_i^0 является стационарным состоянием, получаем для $x_k(t)$ линейное уравнение:

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_j \Lambda_{kj} x_j, \quad (11)$$

в котором $\Lambda_{kj} = \left(\partial Z_k / \partial X_j \right)_0$ – функция параметра λ . В матричном обозначении уравнение (11) может быть записано как

$$\frac{dx}{dt} = \Lambda x, \quad (12)$$

где $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ – вектор; Λ_{kj} – элементы матрицы Λ . Под матрицей Λ иногда подразумевают матрицу якобиана.

Общее решение (12) может быть записано, если известны собственные значения и собственные функции матрицы Λ . Пусть ω_k – собственное значение, а ψ_k – соответствующий собственный вектор:

$$\Delta \psi_k = \omega_k \psi_k. \quad (13)$$

В общем случае, для n - мерной матрицы имеется n собственных значений и n собственных векторов. Если известны собственные значения ω_k и собственные функции ψ_k , то решение уравнения (12), соответствующее каждому собственному значению, имеет вид:

$$x = e^{\omega_k t} \psi_k. \quad (14)$$

Если обозначить плотности и потоки стационарных состояний через u_s , n_{ks} , J_{us} , J_{ks} и v_{is} , то $\dot{u}_s = -\nabla \cdot J_{us} = 0$ и $\dot{n}_{ks} = -\nabla J_{ks} + \sum_i v_{ki} v_{is} = 0$. При действии возмущения $u = u_s + \delta u$, $J_u = J_{us} + \delta J_u$ и т. д., откуда

$$\delta \dot{u} = -\nabla \delta J_u; \quad (15)$$

$$\delta \dot{n}_k = -\nabla \delta J_k + \sum_i v_{ki} \delta v_i. \quad (16)$$

Подставим выражения для δu и $\delta \dot{n}_k$ в (12) и используем тождество

$$\nabla \nabla f = \nabla \nabla J + J \nabla f, \quad (17)$$

где f – скалярная функция; J – векторное поле. Используя теорему Гаусса, получим:

$$\int_V \nabla \nabla J dV = \int_{\Sigma} J da, \quad (18)$$

в которой Σ – поверхность, ограничивающая объем V , da – элемент площади поверхности. Итак, (12) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \delta^2 \dot{S} = & - \int_{\Sigma} \delta \left(\frac{1}{T} \right) \delta J_u \cdot da + \int_V \delta \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \delta J_u dV + \\ & + \int_{\Sigma} \sum_k \delta \left(\frac{\mu_k}{T} \right) \delta J_k \cdot da - \int_V \sum_k \delta \nabla \left(\frac{\mu_k}{T} \right) \delta J_k dV + \int_V \left[\sum_i \delta \left(\frac{A_i}{T} \right) \delta v_i \right] dV. \end{aligned} \quad (19)$$

При выводе этого уравнения учитывалось, что $\sum_k v_{ki} \delta \left(\mu_k / T \right) = \delta \left(A_i / T \right)$. Потоки на поверхности определены граничными условиями и не подвержены флуктуациям, так что поверхностные члены исчезают. Это и приводит к требуемому результату:

$$\frac{1}{2} \delta^2 \dot{S} = \int_V \delta \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \delta J_u dV - \int_V \sum_k \delta \nabla \left(\frac{\mu_k}{T} \right) \delta J_k dV + \int_V \left[\sum_i \delta \left(\frac{A_i}{T} \right) \delta v_i \right] dV = \sum_{\alpha} \delta F_{\alpha} \delta J_{\alpha}. \quad (20)$$

Выводы

Исследование устойчивости энергетических систем позволяет обеспечить условия стационарной работы рассматриваемого явления, а также определить пути для надежной работы.

Список литературы

1. Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И. Пригожин. – М.: Мир, 1973. – 290 с.
2. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди; пер. с англ. Ю. А. Данилова и В.В. Белого. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
3. Minorski N. Nonlinear Oscillations. – Princeton, NJ – Van Nostrand, 1962.

4. Prigogine I. Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. – N.Y.: John Wiley, 1967.

Викладено основи теорії стійкості систем, яка може виявитися справедливою при досить загальних умовах, включаючи як рівноважні, так і нерівноважні стани. Критерій стійкості заснований на теорії Ляпунова про стійкість механічних систем. Нестационарні стани ентропії визначені як функціонал Ляпунова.

Нерівноважні стаціонарні стани, функціонал Ляпунова, варіація ентропії, критерії стійкості.

The foundations of the theory of stability of systems that may be valid under fairly general conditions, including both equilibrium and non-equilibrium states. Sustainability criteria are based on the theory of Lyapunov stability of mechanical systems. Unsteady state entropy defined as Lyapunov functional.

Nonequilibrium steady states, the Lyapunov functional, variation entropy, stability criteria.

УДК 637.1

НАЗЕМНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ, НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В ТОЧНЫХ АГРОТЕХНОЛОГИЯХ

Д.С. Стребков, академик РАСХН

А.М. Башилов, доктор технических наук

В.А. Королёв, кандидат технических наук

***Всероссийский научно-исследовательский институт
электрификации сельского хозяйства, г. Москва***

Рассмотрена стратегия развития фундаментальных направлений агроинженерной науки, включающая расширение сферы применения современных информационно-коммуникационных систем точного управления агротехнологическими процессами на основе интеллектуальной системы видеонаблюдения за подвижными объектами, в том числе животными в закрытых помещениях и на открытых пространствах.

Стратегия, информационно-коммуникационные системы, видеонаблюдение, идентификация, позиционирование, подвижные объекты, поведение животных, роботизированное производство.

Уровень сельскохозяйственного производства, на фоне современных достижений научно-технического прогресса, требует модернизации, создания высококвалифицированных производств и привлечения молодёжи в село.

4. Prigogine I. Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. – N.Y.: John Wiley, 1967.

Викладено основи теорії стійкості систем, яка може виявитися справедливою при досить загальних умовах, включаючи як рівноважні, так і нерівноважні стани. Критерій стійкості заснований на теорії Ляпунова про стійкість механічних систем. Нестационарні стани ентропії визначені як функціонал Ляпунова.

Нерівноважні стаціонарні стани, функціонал Ляпунова, варіація ентропії, критерії стійкості.

The foundations of the theory of stability of systems that may be valid under fairly general conditions, including both equilibrium and non-equilibrium states. Sustainability criteria are based on the theory of Lyapunov stability of mechanical systems. Unsteady state entropy defined as Lyapunov functional.

Nonequilibrium steady states, the Lyapunov functional, variation entropy, stability criteria.

УДК 637.1

НАЗЕМНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ, НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В ТОЧНЫХ АГРОТЕХНОЛОГИЯХ

Д.С. Стребков, академик РАСХН

А.М. Башилов, доктор технических наук

В.А. Королёв, кандидат технических наук

***Всероссийский научно-исследовательский институт
электрификации сельского хозяйства, г. Москва***

Рассмотрена стратегия развития фундаментальных направлений агроинженерной науки, включающая расширение сферы применения современных информационно-коммуникационных систем точного управления агротехнологическими процессами на основе интеллектуальной системы видеонаблюдения за подвижными объектами, в том числе животными в закрытых помещениях и на открытых пространствах.

Стратегия, информационно-коммуникационные системы, видеонаблюдение, идентификация, позиционирование, подвижные объекты, поведение животных, роботизированное производство.

Уровень сельскохозяйственного производства, на фоне современных достижений научно-технического прогресса, требует модернизации, создания высококвалифицированных производств и привлечения молодёжи в село.

В сельском хозяйстве применение инфокоммуникационных систем и технологий особенно эффективно в крупных самодостаточных сельскохозяйственных организациях при решении оптимизационных многофакторных задач управления экономикой и бизнесом. Для реализации таких задач требуется информационная система оперативного управления, организационно-экономической базой которой должен быть унифицированный автоматизированный информационно-технический комплекс на основе конвергенции наземных и спутниковых систем дистанционного наблюдения, навигации, наведения и управления стационарными и мобильными объектами, роботизированными агрегатами, поточными линиями и мехатронными аппаратами [1–5].

Основные составляющие ожидаемого экономического эффекта от внедрения информационно-коммуникационных роботизированных систем точного земледелия и животноводства: народнохозяйственная – обеспечение возможности роста сельскохозяйственной продукции за счёт модернизации материально-технической базы, повышения производительности труда, применения современных технологий; социальная – предоставление сельским жителям широкого спектра услуг информационной связи и автоматизации, способствующих повышению эффективности при сбыте продукции, выборе технологий производства агропродукции, а также социально-значимых услуг; корпоративная – повышение деловой активности сельхозпроизводителей и населения при объединении усилий с другими предприятиями и организациями, заинтересованными в росте объёмов сельхозпродукции и входящими в единое информационное пространство сельскохозяйственных регионов; политико-административная – повышение эффективности сельхозпроизводства за счёт перехода на инновационные технологии с использованием комплексной механизации, автоматизации и информатизации всех технологических операций и производственных процессов, что обеспечивает достижение высокого уровня потребления и продовольственной безопасности.

Цель исследований – применение в сельском хозяйстве унифицированных автоматизированных диспетчерских центров, роботизированных производств, мобильных агрегатов и беспилотных летательных аппаратов на основе видеонаблюдения, локального позиционирования и спутниковой навигации, обеспечивающих оперативность и качество реализации агротехнологических процессов.

Результаты исследований. *Основные задачи создания наземных и спутниковых средств наблюдения, навигации и управления в точных агротехнологиях:*

- создание условий для расширения предоставляемых информационно-коммуникационных услуг с использованием результатов космической деятельности, накопленных знаний и передового агропроизводственного опыта в интересах развития сельскохозяйственных регионов;
- освоение технологий точного производства с использованием средств спутниковой связи, аппаратуры цифровой обработки сигналов и информации, микроэлектромеханических и робототехнических систем,

новых интеллектуальных датчиковых систем, мобильных транспортных средств и агрегатов;

- доведение до конечных потребителей результатов космической деятельности в сфере дистанционного зондирования Земли, спутниковой связи, использования навигационных технологий, беспилотных летательных аппаратов, систем компьютерного зрения;

- разработка новых конкурентоспособных агропроизводственных технологий на основе спутниковой связи, дистанционного зондирования Земли, навигационного обеспечения, слежения и мониторинга подвижных наземных объектов с использованием космической и наземной идентификационной системы позиционирования;

- решение задач картографии, контроля состояния природной среды, инвентаризации природных ресурсов, обеспечения рационального ведения сельскохозяйственной деятельности;

- обеспечение международного сотрудничества в области использования информационно-коммуникационного пространства, развитие кадрового потенциала сельскохозяйственной отрасли.

Для реализации рассматриваемого проекта требуются значительные ресурсы и сроки.

Система мероприятий для реализации проекта

Мероприятия по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам – создание и оснащение специализированных конструкторских бюро и научно-исследовательских лабораторий на базе сельскохозяйственных ВУЗов РФ.

Строительство и техническое оснащение региональных диспетчерских информационно-коммуникационных центров и разветвлённой сети управления сельскохозяйственным производством.

Этапы развития

Первый этап. Формирование приоритетных направлений развития информатизации и автоматизации в высокоэффективных технологиях. Формирование рынка информационных услуг, автоматизированных рабочих мест и технологий. Совершенствование структуры, функций и повышение роли информационно-диспетчерского управления при выполнении планов работ, организационно-техническая помощь производственным подразделениям и машинно-тракторным агрегатам, а также внедрение прикладных компьютерных программ в растениеводстве и животноводстве. Совершенствование информационного обеспечения реализуемых технологий, способствующее повышению производительности труда и сокращению затрат времени. Систематизация первоочередных задач и функций информационной системы автоматизированного оперативного управления.

Второй этап. Проектирование информационно-коммуникационных систем на основе космических и наземных средств мониторинга и дистанционного управления. Создание баз данных и баз знаний, включающих экспертные системы, достижения учёных и изобретения, опыт передовых сельхозорганизаций в производстве и переработке продукции.

Третий этап. Обеспечение внедрения в сельхозорганизациях высокоэффективной технологии принятия управленческих решений. Внедрение современных средств и методов автоматизированного управления производственными процессами с использованием когнитивной и системноорганизованной информации. Роботизация агротехнологических процессов. Формирование организационно-финансовой программы модернизации отраслей сельскохозяйственного производства.

Совместное использование систем глобальной навигации, локального позиционирования и интеллектуального видеонаблюдения

Совместное использование систем глобальной навигации ГЛОНАСС/GPS, локального позиционирования RTLS и интеллектуального видеонаблюдения ITV может дать новые синергетические эффекты и возможности решения задач повышения точности роботизированных агротехнологических процессов и сопровождающих эту тенденцию экономических приращений прибылей.

Совместное использование RTLS и ГЛОНАСС/GPS позволяет распространить контроль перемещения транспортных средств и сельскохозяйственных машин на зоны, где отсутствует прямая видимость спутников – крытые дворы, здания, сооружения. При этом возникают дополнительные возможности контролировать локальные перемещения животных и персонала в производственных и внепроизводственных помещениях закрытого и открытого типа.

Совместное использование RTLS и интеллектуального видеонаблюдения ITV позволяет совместить возможности идентификации и позиционирования объекта по метке с его визуальным наблюдением. Например, в случае, если датчик движения видеокамеры обнаруживает движение объекта, а сигнал радиометки в секторе обзора видеокамеры при этом отсутствует, это может означать движение постороннего (не интересующего) объекта. Можно одновременно вывести на экран оператора для анализа видеоизображения объекта, находящегося перед видеокамерой и идентифицировать его по сигналу метки. Такой подход формирует уникальные возможности по автоматической идентификации объекта при автоматизированном видеонаблюдении поведения животных, что позволяет существенно уменьшить нагрузку на персонал, снизить вероятность ошибки или ложной тревоги при выполнении агротехнологических операций. Кроме того, при интеграции системы RTLS и данных видеонаблюдения позволит выявить случаи движения объекта с использованием метки, которую злонамеренно либо по халатности переадресовали другому объекту.

Совместное использование RTLS, ГЛОНАСС/GPS и ITV наблюдения даёт ещё большее число вариантов получения синергетического эффекта: при оценке индивидуального состояния животного (идентификация и определение местоположения животного в стаде, индивидуальный контроль и учёт параметров животного, ведение календаря и истории животного), в процессе доения (контроль работы оператора и поведения животного), при кормлении (продолжительность поедания, пережёвывание корма, прирост живой массы), в процессе осеменения (иден-

тификация половой охоты, наблюдение за отёлом животного), при оценке подвижности животного (контроль моциона, двигательная активность животного, поведенческие признаки), при проведении зооветеринарных мероприятий (бонитировка, идентификация заболеваний, формирование календаря ветеринарных мероприятий).

Совместное использование систем глобальной навигации ГЛО-НАСС/GPS, локального позиционирования RTLS и интеллектуального видеонаблюдения ITV обусловлено разнообразием подвижных объектов (животные, человек, мобильная и конвейерная техника), распределённостью их в пространстве (в пределах одной фермы, одного хозяйства, района, области), масштабом оперативно-технологических процессов (число особей, единиц техники, персонала). В соответствии с этим их приоритетность будет меняться, однако высокая информативность, наглядность, оперативность, многофункциональность и универсальность видеоаналитической составляющей с нарастающей функцией круглосуточного, длительного, более пристального, интеллектуального наблюдения за поведением животных и окружающей агропроизводственной инфраструктурой в перспективе будет иметь центральное значение.

Дополнительные информационно-аналитические возможности применения систем интеллектуального видеонаблюдения в животноводстве

- Видеонаблюдение поведения многочисленных и разнообразных объектов в закрытых помещениях, на поточных технологических линиях, при охране периметра и территории агропредприятия или животноводческой фермы.
- Определение общего состояния стада животных (число животных, скученность и обособленность животных, активность и беспокойство животных, борьба за лидерство).
- Осмотр стада во время пастьбы, доения, кормления, поения и отдыха (выявление слабых и сильных животных, здоровых и больных).
- Осмотр стада при стойловом или групповом содержании (определение общего состояния животных в группах).
- Наблюдение условий содержания животных и работы технологического оборудования.
- Определение общего состояния животного (положение тела в пространстве, полнотелость, телосложение, состояние шерстного покрова и кожи, присутствие или отсутствие выделений из носа, глаз, влагалища).
- Наблюдение акцентируемого животного и определение структуры поведения (продолжительность лежания, стояния, кормления, поения, движения в стойле, передвижения на пастбище).
- Обнаружение больного животного путём селективного осмотра и наблюдения поведенческих реакций.
- Обнаружение детальных признаков прохождения половой охоты и осеменения животных.
- Наблюдение предродовых признаков и родов животного в специальном помещении.

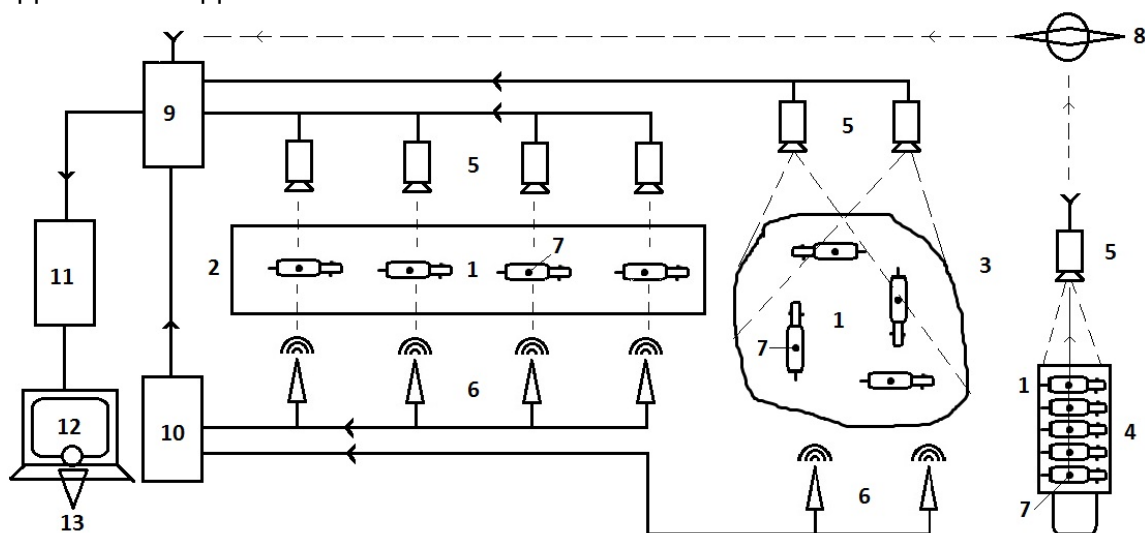
- Установление характера заболевания путём тщательного обследования частей животного (при достаточном освещении, в установленной последовательности: голова, шея, грудная клетка, живот, вымя, матка, таз, конечности).

- Термометрическое наблюдение.

- Акустическое наблюдение путём выслушивания

Система интеллектуального видеонаблюдения поведения и детектирования движения животных с мобильно-транспортных средств

Система интеллектуального видеонаблюдения основана на интеграции трёх компонентов: видеоподсистемы, подсистемы определения местоположения и спутниковой системы глобальной навигации. Система интеллектуального видеонаблюдения на основе локационных данных, поступающих от подсистемы определения местоположения, осуществляет автоматическое определение активной видеокамеры (в зоне видимости которой находится объект) и выбирает маршрут видеозаписи. Видеоподсистема получает видеопоток от активной камеры и передаёт по выбранному маршруту в видеоархив или посылает оператору. При использовании в системе поворотных камер осуществляется непрерывное видеосопровождение объекта наблюдения на протяжении участка его движения. Благодаря использованию данных от системы позиционирования и анализу видеоизображения, система интеллектуального видеонаблюдения осуществляет слежение за определенным объектом без привлечения оператора. Данную систему можно использовать, например, на животноводческих фермах. На рисунке приведена структурно-функциональная схема интеллектуальной системы позиционного видеонаблюдения поведения животных.



Структурно-функциональная схема интеллектуальной системы позиционного видеонаблюдения поведения животных и транспортных средств: 1 – наблюдаемые животные; 2 – животноводческая ферма; 3 – выгульная площадка или пастбище; 4 – транспортное средство; 5 – видеокамеры; 6 – точки доступа, базовые станции радиочастотной идентификации; 7 – теги, метки радиочастотной идентификации; 8 – спутниковая система глобального позиционирования; 9 – сервер подсистемы определения местоположения; 10 – сервер подсистемы видеозаписи; 11 – видеоархив; 12 – монитор; 12 – оператор

На животноводческой ферме, где развёрнута система, размещаются базовые станции определения местоположения и видеокамеры. К объекту (животное, человек, мобильный агрегат, транспортное средство), за которым ведётся наблюдение, крепится мобильное устройство – тег (метка). Базовые станции измеряют расстояние до тега и передают полученные данные серверу подсистемы определения местоположения, который переводит их в координаты. Затем эти координаты поступают на сервер видеоподсистемы, который, в свою очередь, производит захват видеопотока от соответствующей камеры и выполняет его дальнейшую обработку.

Использование предлагаемой системы позволит:

- автоматически переключать видеоизображения с разных камер на основе анализа координат наблюдаемого объекта;
- регистрировать видеоизображения в момент движения интересующего объекта перед камерой;
- получить качественное видеоизображение;
- увидеть интересующий объект в разных ракурсах, соответствующих основным зонам агротехнологических процессов;
- производить видеонаблюдение за каждым животным автоматически, без оператора;
- формировать архив видеоданных о поведении каждого интересующего объекта;
- дальнейшее уточнение поведенческих реакций и диагностирования интересующего объекта можно проводить с помощью анализа изображения на сервере видеоподсистемы.

Выводы

1. Современные достижения науки и техники создают фундаментальные предпосылки дальнейшего развития и совершенствования роботизированного сельскохозяйственного производства в направлении повышения точности реализации агротехнологических процессов.

2. Видеонаблюдение – наиболее перспективный способ регистрации структурно-морфологических, динамических и поведенческих характеристик подвижных объектов аграрного производства при их глобально-локальной навигации, точном позиционировании и дистанционном управлении.

3. Совместное использование глобального наведения, локального позиционирования и интеллектуального видеонаблюдения в аграрном производстве значительно расширит информационно-управляющие функции автоматизированных агротехнологических процессов.

4. Система видеонаблюдения и позиционирования поведения животных и мобильно-транспортных средств повышает эффект присутствия специалистов в зонах производства, обеспечивает более пристальное внимание к состоянию интересующего объекта и позволяет осуществлять постоянный контроль за его поведением, а следовательно осуществлять более эффективное управление.

Список литературы

1. Башилов А.М. Видеонаблюдение и навигация в системах точного земледелия / А.М. Башилов, В.А. Королев // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. Горячкина». – 2009. – №3(34). – С. 7–11.
2. Башилов А.М. Проект управления аграрным производством на основе систем видеомониторинга / А.М. Башилов // Техника и оборудование для села. – 2010. – № 10. – С. 46–48.
3. Левшин А.Г. Автоматическое пилотирование и диспетчеризация мобильных агрегатов / А.Г. Левшин, А.М. Башилов, В.А. Головкин. // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. – 2011. – № 2. – С. 18–22.
4. Принципы построения и варианты реализации систем электроснабжения, навигации и управления движением перспективных агроагрегатов / Д.С. Стребков, А.М. Башилов, В.А. Королев, В.З. Трубников. // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2–2. – С. 280–284.
5. Шевченко И.А. Стратегия разработки автоматизированной системы управления молочным скотоводством / И.А. Шевченко, Э.Б. Алиев. // Вестник ВНИИМЖ. – 2013. – №3(11). – С. 37–43.

Розглянуто стратегію розвитку фундаментальних напрямів агроінженерної науки, що включає розширення сфери застосування сучасних інформаційно-комунікаційних систем точного управління агротехнологічними процесами на основі інтелектуальної системи відеоспостереження за рухомими об'єктами, в тому числі тваринами в закритих приміщеннях і на відкритих просторах.

Стратегія, інформаційно-комунікаційні системи, відеоспостереження, ідентифікація, позиціонування, рухомі об'єкти, поведінка тварин, роботизоване виробництво .

The strategy of the development main fundamental direction agro-engineering sciences with expansion of the sphere of the using modern information-communication systems of exact management agro-technological processes on base of the intellectual system video control mobile objects, including animal, in closed premiseses, on opened platform and territory is stated in the article.

The strategy, information-communication systems, video control, identification, positioning, rolling objects, behaviour animal, robotized production.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОДОТОКА В ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОГО ДОМА

В.В. Харченко, доктор технических наук

А.О. Сычёв, аспирант*

***Всероссийский научно-исследовательский институт
электрификации сельского хозяйства, г. Москва***

Рассмотрен способ отбора низкопотенциальной теплоты от водотока на основе специального речного теплообменника. Описано экспериментальную установку. Проанализировано влияние регулирования расхода теплоносителя в низкотемпературном контуре на характеристики установки при использовании теплового насоса с частотно-регулируемым компрессором.

Тепловой насос, низкопотенциальная теплота, речной теплообменник вода-рассол, частотно-регулируемый компрессор.

В настоящее время большинство индивидуальных теплонасосных установок (ТНУ), обеспечивающих отопление и горячее водоснабжение жилых домов, включают в себя тепловой насос (ТН) типа воздух-воздух, воздух-вода или вода-вода (рассол-рассол) и используют в качестве источников низкопотенциальной теплоты (НПТ) окружающий воздух, грунт или грунтовые воды. Доля индивидуальных тепловых насосов, использующих низкопотенциальную теплоту поверхностных вод, в общем числе теплонасосных установок на сегодняшний день невелика. Однако это направление имеет определённые перспективы. Основным преимуществом таких схем перед грунтовыми тепловыми насосами являются более низкие капитальные вложения. Кроме того, помимо природных водных сред существует множество относительно тёплых водоёмов и водотоков, не имеющих в себе геотермальную или бросовую антропогенную теплоту, при использовании которой в теплонасосных установках можно значительно сократить затраты на теплоснабжение.

Нами была рассмотрена возможность использования низкопотенциальной теплоты поверхностных водотоков в системах теплоснабжения на основе тепловых насосов. Такой подход, то есть использование теплоты именно водотоков, представляется частным случаем более общей проблемы использования теплоты поверхностных вод в теплонасосных системах теплоснабжения. Однако в известных нам работах отдельно эта тема не рассматривается, несмотря на очевидную перспективность применения такого подхода на практике.

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

© В.В. Харченко, А.О. Сычёв, 2014

Цель исследований – анализ возможности использования низкопотенциальной теплоты поверхностного водотока в теплонасосной системе теплоснабжения сельского дома

Материалы и методика исследований. Для организации отбора теплоты от водоёмов применяют схему, подобную используемой в грунтовых ТНУ, когда теплота отбирается пластиковой трубой большой длины, по которой протекает теплоноситель, только в данном случае трубу укладывают не в грунт, а на дно водоёма [4]. Такая схема, очевидно, оправдана при отборе теплоты из стоячего водоёма. Для случая же водотока можно предложить альтернативные, более эффективные схемы отбора теплоты (рис. 1), в которых движение воды в русле используется для интенсификации теплообменных процессов, что позволяет выполнить систему отбора теплоты более компактной (что может играть решающую роль, особенно в условиях малых водотоков), простой в монтаже и экономически более оправданной.

Нами был выбран теплообменник в виде змеевика из гладких неоребрённых труб, располагающийся в русле водотока в зоне наибольшей скорости течения.

Для того, чтобы проверить на практике работу предлагаемой системы отбора теплоты от водотока, провести необходимые эксперименты, измерения и найти оптимальные конструкционные решения была смонтирована экспериментальная установка.

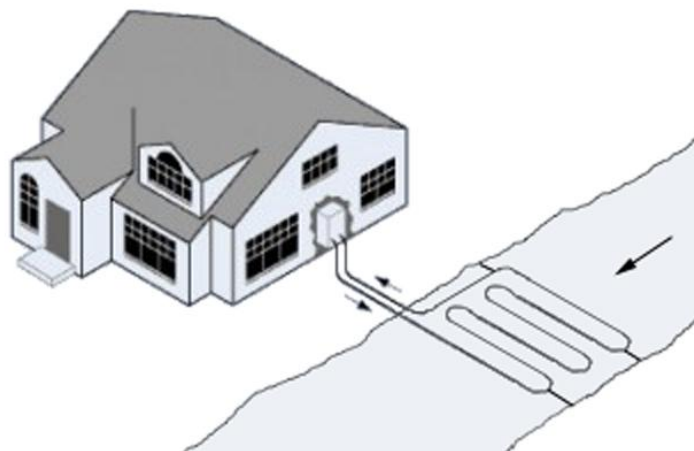


Рис. 1. Отбор низкопотенциальной теплоты от водотока с помощью речного теплообменника

Установка представляет собой теплонасосную систему отопления и кондиционирования жилого дома типа вода-воздух теплопроизводительность 5...7 кВт. Система отбора теплоты смонтирована на специально выбранном незамерзающем водотоке. Расчётный коэффициент производительности (coefficient of performance – COP) в холодное время года – 3,5...4,0. В качестве основы при изготовлении системы были использованы элементы серийно-выпускаемого кондиционера (сплит-система воздух-воздух).

Принципиальная схема установки приведена на рис. 2. Помимо использования специального речного теплообменника эту эксперименталь-

ную установку отличает ещё несколько технических решений, которые обычно не используются в классических теплонасосных системах, но которые дают определённые преимущества и также служат предметами исследования. К таким решениям, например, относятся:

- использование частотно-регулируемых компрессора и циркуляционного насоса низкотемпературного контура;
- непосредственный нагрев внутреннего воздуха в теплообменнике-конденсаторе теплового насоса без применения промежуточных контуров и замкнутая вентиляционная система для распределения тёплого воздуха по дому;
- возможность подключения к системе дополнительных источников низкопотенциальной теплоты.

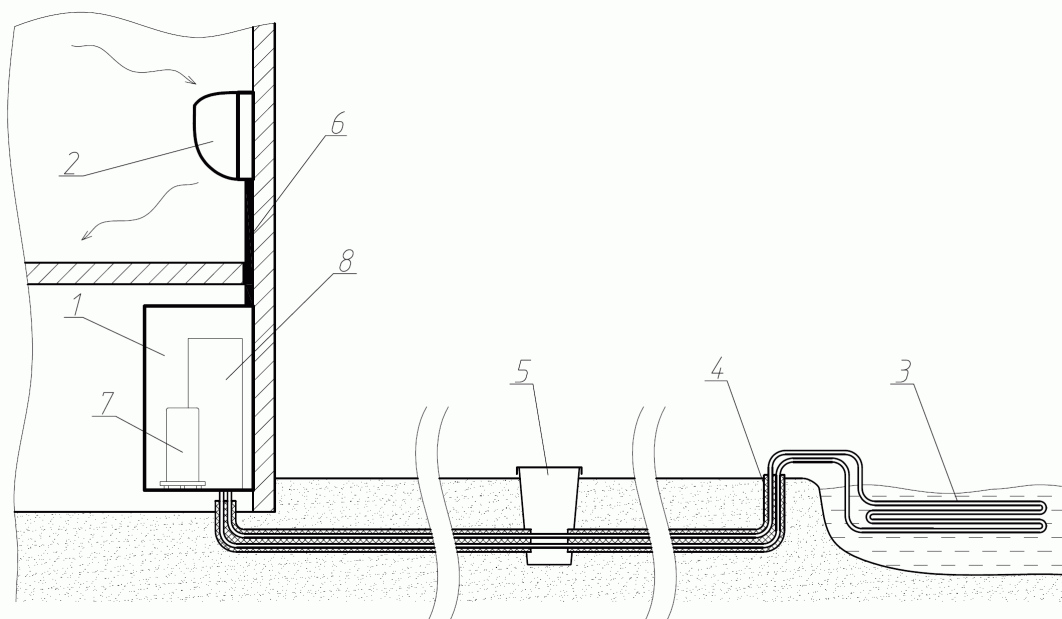


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – внешний блок ТН; 2 – внутренний блок ТН; 3 – теплообменник вода-рассол; 4 – утеплённый подземный трубопровод; 5 – инспекционный колодец, точка подключения дополнительных источников НПТ; 6 – фреоновый провод; 7 – компрессор ТН; 8 – теплообменник рассол-фреон

Для рассматриваемой схемы эффективность теплового насоса зависит от таких параметров, как размеры и конфигурация речного теплообменника, тип и удельный расход теплоносителя и других. При этом на суммарный COP всей установки влияет также мощность, затрачиваемая на циркуляцию теплоносителя.

Для оценки параметров ТНУ и определения путей повышения эффективности ТН была разработана расчётная программа в среде MathCAD, которая по введённым исходным данным позволяет делать расчёт одновременно для множества значений длины и диаметра труб змеевика и расхода теплоносителя, и выдавать результаты в виде таблиц и графиков, по которым можно легко определить оптимальную конфигурацию для

каждого конкретного случая. Расчетная схема базируется на основных положениях теории тепломассообмена в теплообменных аппаратах [1, 2].

При проектировании системы расчетная программа была использована для оптимизации речного теплообменника и низкотемпературного контура в целом [3]. Эти расчёты позволили найти оптимальный баланс между размерами теплообменника, затратами на циркуляцию теплоносителя и коэффициентом преобразования установки. Кроме того, по составленной методике можно рассчитать низкотемпературный контур для пока ещё малораспространённого типа тепловых насосов – с частотно-регулируемым компрессором. Основное преимущество данных тепловых насосов – более высокий COP в режиме неполной мощности, а именно в таком режиме – 20...50 % от полной мощности – такие ТН работают основную часть времени. В этих установках желательно использовать также регулируемый циркуляционный насос (ЦН).

При использовании частотно-регулируемых компрессора и циркуляционного насоса низкотемпературного контура значение оптимального расхода теплоносителя будет зависеть от режима работы установки. В режиме малой мощности желательно, чтобы ЦН также уменьшал производительность, иначе он будет потреблять избыточное количество электроэнергии, уменьшая суммарный COP. Результатом вычислений для такого случая является зависимость оптимальной частоты вращения ЦН от режима работы ТН (частоты вращения компрессора).

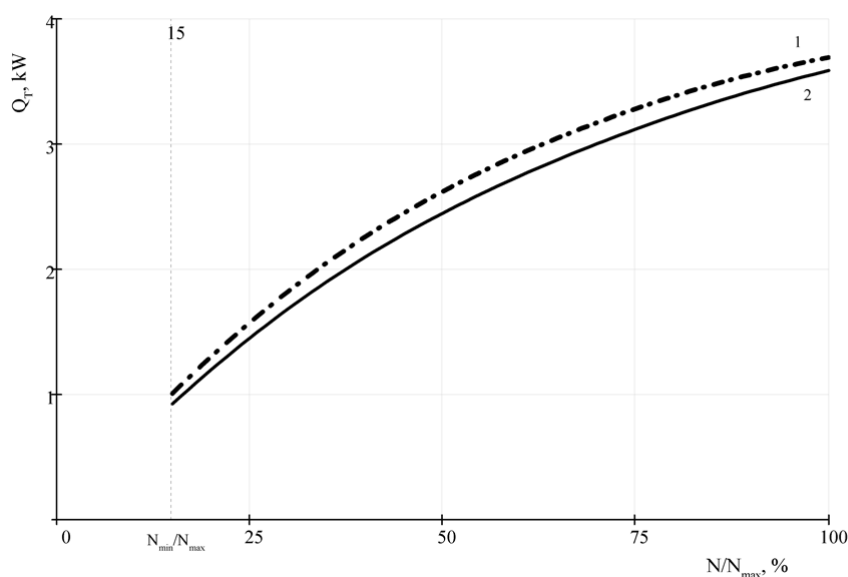


Рис. 3. Теплопроизводительность ТНУ при максимальном (1) и оптимальном (2) расходе теплоносителя в зависимости от режима работы

Результаты исследований. Ниже приведены сравнительные характеристики теплового насоса с частотно-регулируемым компрессором для случаев регулируемого и нерегулируемого ЦН. Как видно из первого графика (рис. 3), при работе ЦН по найденной зависимости несколько снижается теплопроизводительность установки (при необходимости этого можно избежать включением ЦН на полную мощность), но при этом сум-

марное потребление электроэнергии снижается ещё сильнее. В результате, как видно из второго графика (рис. 4), значение коэффициента преобразования возрастает в режимах малой мощности, что позволяет в данном случае экономить на отоплении в год до 8 % электроэнергии по сравнению с использованием нерегулируемого ЦН в сочетании с частотно-регулируемым компрессором. Но в то же время расчёты показали, что можно использовать и нерегулируемый ЦН. При точном подборе его производительности потери получаются в пределах 3 %, хотя при этом несколько снижается максимальная теплопроизводительность ТНУ.

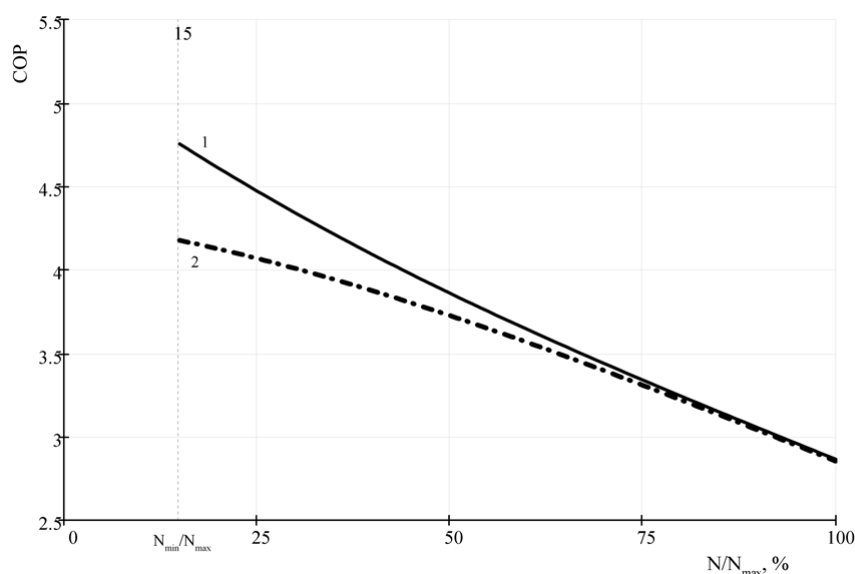


Рис. 4. COP ТНУ при оптимальном (1) и максимальном (2) расходе теплоносителя в зависимости от режима работы

Выводы

Для теплоснабжения сельского дома предлагается использовать теплонасосную систему на основе низкопотенциальной теплоты водотока с компактным открытым речным теплообменником вода-рассол в ее составе.

Разработана расчётная программа, позволяющая оперативно определять оптимальные параметры низкотемпературного контура для заданных условий.

Показана эффективность регулирования расхода теплоносителя в контуре теплового насоса с использованием частотно-регулируемого привода компрессора.

Список литературы

1. Теория тепломассообмена / [Исаев С.И., Кожин В.И., Кофанов В.И. и др.]; под ред. А.И. Леонтьева. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. — 683 с.
2. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных двигателей и комбинированных установок / В.Л. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушин, М.И. Осипов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 591 с.

3. Харченко В.В. Оптимизация низкотемпературного контура теплонасосной установки на основе теплоты поверхностных вод / В.В. Харченко, А.О. Сычёв. // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – №7. – С. 31–36.

4. Kiran Tota-Maharaj, Piotr Grabowiecki, Akintunde Babatunde, Prasad Devi Tumula. Constructed wetlands incorporating surface water heat pumps (SWHPS) for concentrated urban stormwater runoff treatment and reuse // Proceedings of Sixteenth International Water Technology Conference (IWTC-2012). – Istanbul, Turkey, 2012.

Розглянуто спосіб відбору низкопотенціальної теплоти від водотоку на основі спеціального річкового теплообмінника. Описано експериментальну установку. Проаналізовано вплив регулювання витрати теплоносія в низькотемпературному контурі на характеристики установки при використанні теплового насоса з частотно-регульованим компресором.

Тепловий насос, низькопотенційна теплота, річковий теплообмінник вода-розсіл, частотно-регульований компресор.

The way of extraction of low-grade heat from a surface watercourse on basis of the special river heat exchanger is under consideration. Experimental installation is described. The influence of flow regulation in the low-temperature circuit on the properties of the system using a heat pump with variable-speed capacity controlled compressor is considered.

Water-source heat pump, low-grade heat, river water-brine heat exchanger, variable-speed capacity controlled compressor.

УДК 697.7

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ПОРІВНЯННЯ ДВОХ ВАРІАНТІВ КОМПОНУВАННЯ ГЕЛІОУСТАНОВОК

В.В. Козирський, доктор технічних наук

Л.В. Мартинюк, аспірантка*

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

Йоанна Алєкшеюк, аспірантка**

Варшавський університет наук про життя

Наведено результати техніко-економічного порівняння геліоустановок з двома типами сонячних колекторів плоского та вакуумного з точки зору ефективності їх роботи та терміну окупності.

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

**Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Анджей Хоховські

© В.В. Козирський, Л.В. Мартинюк, Й. Алєкшеюк, 2014

3. Харченко В.В. Оптимизация низкотемпературного контура теплонасосной установки на основе теплоты поверхностных вод / В.В. Харченко, А.О. Сычёв. // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – №7. – С. 31–36.

4. Kiran Tota-Maharaj, Piotr Grabowiecki, Akintunde Babatunde, Prasad Devi Tumula. Constructed wetlands incorporating surface water heat pumps (SWHPS) for concentrated urban stormwater runoff treatment and reuse // Proceedings of Sixteenth International Water Technology Conference (IWTC-2012). – Istanbul, Turkey, 2012.

Розглянуто спосіб відбору низкопотенціальної теплоти від водотоку на основі спеціального річкового теплообмінника. Описано експериментальну установку. Проаналізовано вплив регулювання витрати теплоносія в низькотемпературному контурі на характеристики установки при використанні теплового насоса з частотно-регульованим компресором.

Тепловий насос, низькопотенційна теплота, річковий теплообмінник вода-розсіл, частотно-регульований компресор.

The way of extraction of low-grade heat from a surface watercourse on basis of the special river heat exchanger is under consideration. Experimental installation is described. The influence of flow regulation in the low-temperature circuit on the properties of the system using a heat pump with variable-speed capacity controlled compressor is considered.

Water-source heat pump, low-grade heat, river water-brine heat exchanger, variable-speed capacity controlled compressor.

УДК 697.7

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ПОРІВНЯННЯ ДВОХ ВАРІАНТІВ КОМПОНУВАННЯ ГЕЛІОУСТАНОВОК

В.В. Козирський, доктор технічних наук

Л.В. Мартинюк, аспірантка*

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

Йоанна Алєкшеюк, аспірантка**

Варшавський університет наук про життя

Наведено результати техніко-економічного порівняння геліоустановок з двома типами сонячних колекторів плоского та вакуумного з точки зору ефективності їх роботи та терміну окупності.

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

**Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Анджей Хоховські

© В.В. Козирський, Л.В. Мартинюк, Й. Алєкшеюк, 2014

Геліосистема, сонячний колектор, ефективність роботи, термін окупності.

В Україні річне надходження сонячного випромінювання становить 3500-5200 МДж/м², що знаходиться на одному рівні з країнами, які активно використовують сонячні колектори (США, Німеччина, Швеція та ін.).

Тривалість сонячного випромінювання по Києву з квітня до жовтня становить 130 – 300 год/міс і не поступається іншим центрально-європейським містам, де широко використовуються сонячні технології з метою теплозабезпечення [2].

Існує безліч варіантів геліосистем, і теплова енергія, яку вони можуть виробити у визначений день – обмежена і залежить від багатьох факторів: конфігурації системи та її конструктивних особливостей, ступеня ясності дня, температури холодної води, об'єму бака, температури навколишнього повітря тощо. Тому для правильного розрахунку геліосистем необхідно використовувати відповідні розрахунки та складні програмні продукти. Ефективність роботи геліосистеми визначається коефіцієнтом корисної дії сонячних колекторів та їх компоновкою, орієнтацією в просторі, кутом нахилу і т.д. [5].

Відомі методики розрахунків економічної ефективності геліоустановок мають два основних недоліки: по-перше, багато з них засновано на старих економічних моделях і непристосовано до сучасних умов; по-друге, в основі своїй мають такі характеристики, які складно визначити на попередній стадії проектування геліоустановок [1].

Мета досліджень – порівняння двох типів сонячних колекторів (вакуумного і плоского) для визначення ефективності їх роботи у геліоустановках для гарячого водопостачання (ГВП) шляхом використання відповідних розрахункових алгоритмів.

Матеріали та методика досліджень. На прикладі фірми WATT S.A. підібрані дві геліоустановки для ГВП з плоским та вакуумним сонячними колекторами (рис.1).



Рис. 1. Геліоустановки фірми WATT S.A. для ГВП з вакуумним (а) та плоским (б) сонячними колекторами

Вибрані геліоустановки конструктивно відрізняються лише площею апертури колекторів, що пов'язано з різним типом колекторів (вакуумний і

плоский) та ціною комплекту, а всі інші параметри підбрані однаковими (табл.1.).

1. Вихідні дані для техніко-економічного порівняння двох варіантів геліоустановок

Параметр	Геліоустановка з плоским сонячним колектором	Геліоустановка з вакуумним сонячним колектором
Кількість колекторів, шт.	2	2
Площа апертури, м ²	3,746	3,61
Об'єм бака-акумулятора, л	200	200
Вартість геліоустановки з врахуванням монтажу, грн	37 000	44 900
Вартість заміщеної теплової енергії, грн/кВт·год [3].	4,63	4,63

Функціональна схема геліоустановки показана на рис. 2. Встановлено, що температура води на вході становить 10 °С, а на виході повинна сягати необхідних для цього типу установок 50 °С. Температура води в баці-акумуляторі 50 °С та температура приміщення, де знаходиться бак-акумулятор 22 °С. Нахил колектора прийнятий 45° з орієнтацією на південь.

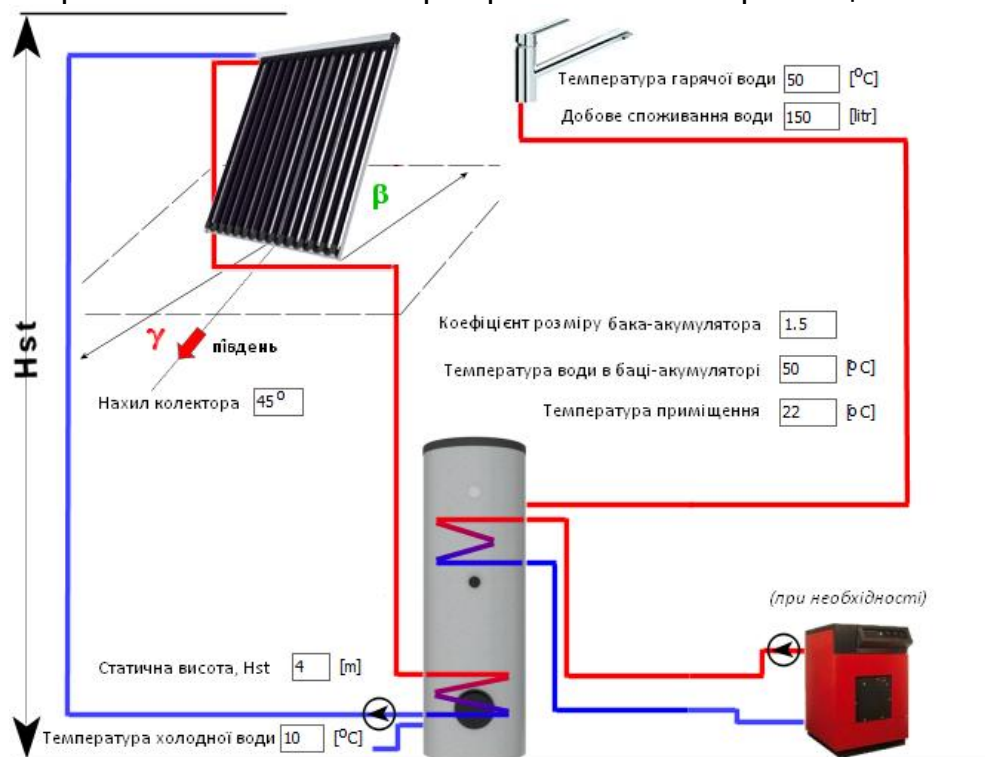


Рис.2. Функціональна схема геліоустановки

Результати досліджень. Важливим аспектом при проектуванні сонячних систем є вибір відповідної площі апертури сонячного колектора, оскільки розмір та конструктивні параметри останнього суттєво впливають на вартість геліоустановки в цілому, а звідси, і на термін її окупності. Крім того, термін окупності геліоустановки також залежить і від попередньо ви-

користовуваного виду традиційного джерела теплової енергії та тарифів на енергоносії. Однак, слід пам'ятати, що перевищення терміну окупності над періодом експлуатації є недопустимим.

Розрахунок основних параметрів геліоустановки подано у вигляді алгоритму на рис.3.

Цей алгоритм розрахунку є стандартним і може використовуватися в процесі проектування будь-яких геліоустановок із сонячними колекторами [4] .

Результати техніко-економічного порівняння геліоустановок з двома типами сонячних колекторів плоского та вакуумного наведені в табл.2.

2. Результати техніко-економічного порівняння двох варіантів геліоустановок

Розрахунковий параметр	Геліоустановка з плоским колектором	Геліоустановка з вакуумним колектором
Сонячна інсоляція, кВт·год /м ² /рік	1135	1135
ККД сонячних колекторів η , %	34	48,4
ККД геліоустановки k_2 , %	32	45,3
Втрати в геліоустановці, кВт·год/рік	99,35	99,35
Продуктивність геліоустановки, кВт·год/рік	1365	1942
Заміщення теплового навантаження, %	54,5	77,5
Термін окупності, років	17	11

Метод визначення економічної окупності сонячних систем теплопостачання показує її залежність від основних факторів: вартості геліоустановки, сумарної інтенсивності сонячної радіації в площині колекторів, ККД сонячних колекторів, вартості заміщеного теплового навантаження і дозволяє провести експрес-оцінку доцільності спорудження геліоустановок на етапі прийняття рішення про впровадження.

Попередньо термін окупності геліоустановок на стадії проектування можна визначити за формулою:

$$T = \frac{K_r}{\sum S_p k_2 C_3},$$

де T – термін окупності (роки); K_r – вартість геліоустановки, враховуючи монтажні роботи, грн.; $\sum S_p$ – сумарна інтенсивність сонячної радіації в площині колектора протягом року, кВт·год/рік; k_2 – ККД геліоустановки, %; C_3 – вартість заміщеного теплового навантаження (зелений тариф), грн/кВт·год.

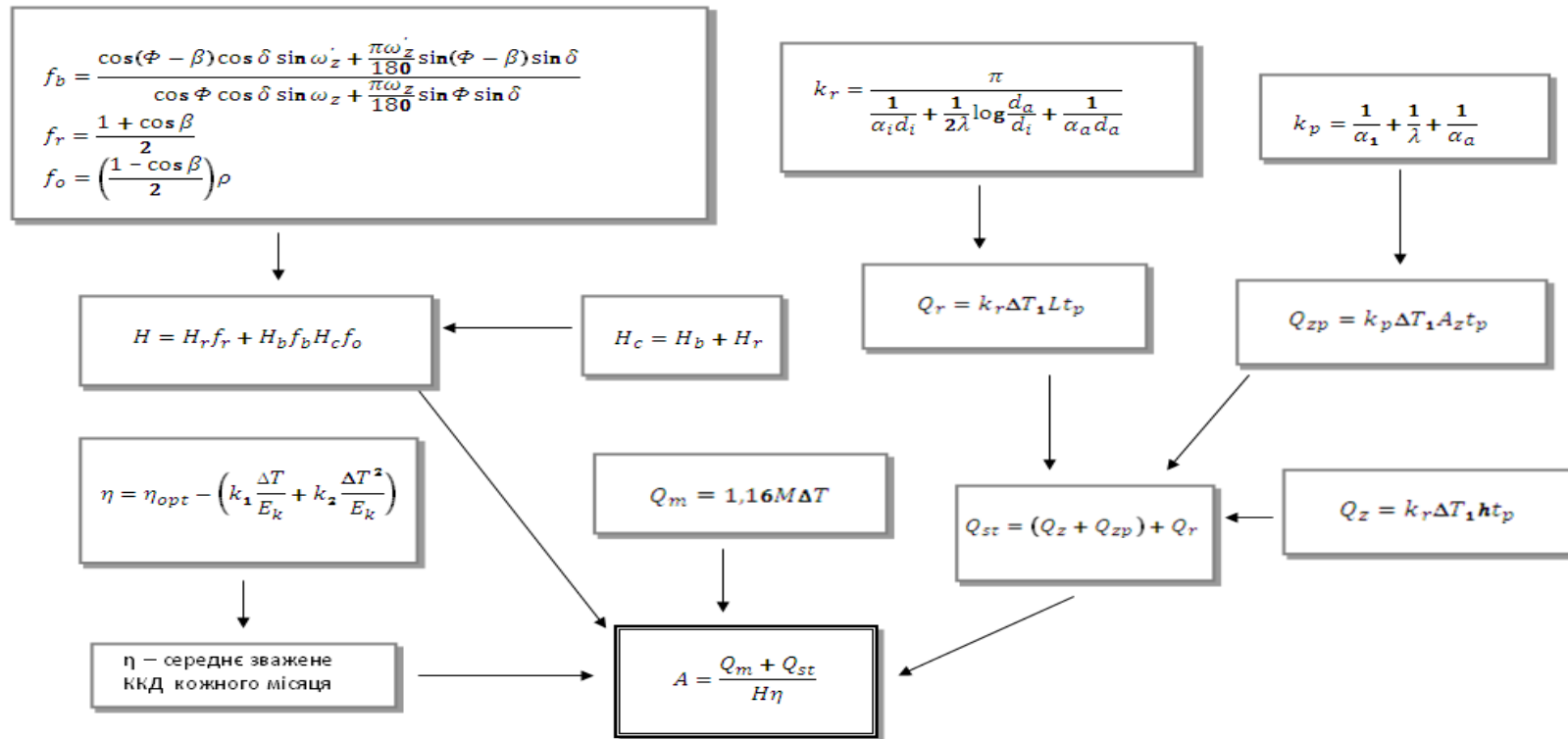


Рис.3. Алгоритм розрахунку основних параметрів геліоустановки:

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К; α – зовнішній коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·К; d_a – зовнішній розріз ізоляції, м; d_i – внутрішній розріз ізоляції, м; d – товщина ізоляції, м; A – площа апертури, м²; k_r , k_p – коефіцієнти тепловіддачі; k_1 – кутовий коефіцієнт; k_2 – середньорічний ККД системи; ΔT – різниця температури води «вихід-вхід», °С; ΔT_1 – різниця температури «бойлер-навколишнє середовище», °С; H_c – сумарна сонячна радіація, Вт/м²; H_r – розсіяна сонячна радіація, Вт/м²; H_b – пряма сонячна радіація, Вт/м²; L – довжина трубопроводів, м; t_p – час роботи насоса, с; M – попит на гарячу воду, л/міс; Q_r – теплові втрати в трубопроводі, Вт·год/міс; Q_{st} – теплові втрати в баці та трубопроводі Вт·год/міс; Q_z , Q_{zp} – теплові втрати в баці, Вт·год/міс; Q_m – попит на теплову енергію, Вт·год/міс; E_k – миттєве значення сонячної радіації, Вт/м²; β – нахил колектора; γ – поворот колектора; Φ – географічна широта; ρ – коефіцієнт відбиття землі; η_{opt} – оптичний ККД сонячного колектора; f , f_b , f_o – коефіцієнти кореляції.

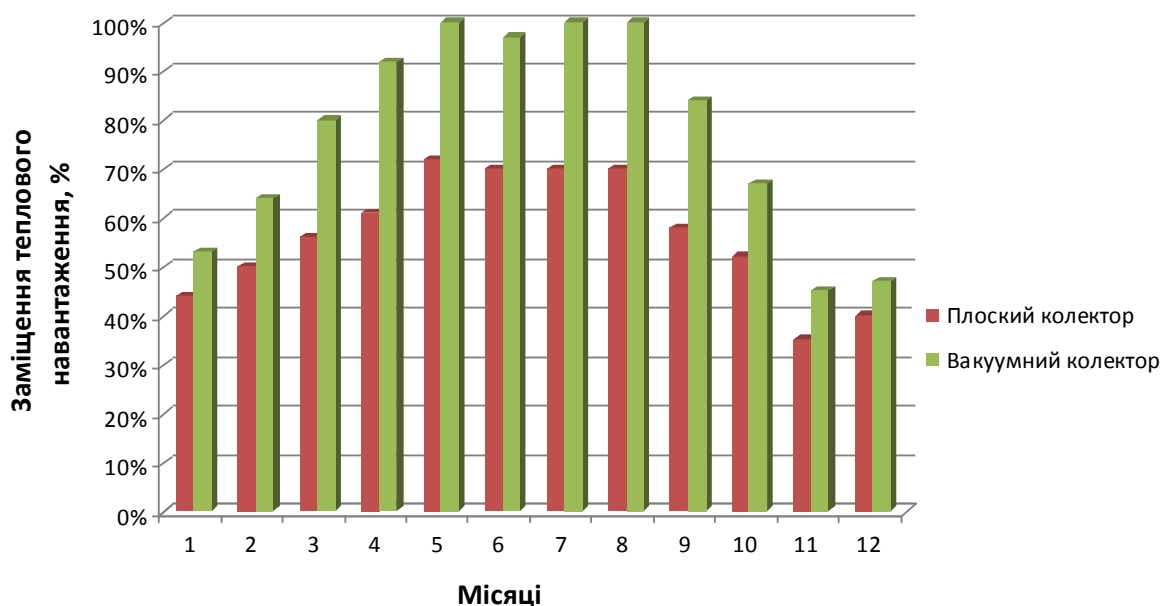


Рис. 4. Графік заміщення теплового навантаження сонячними колекторами

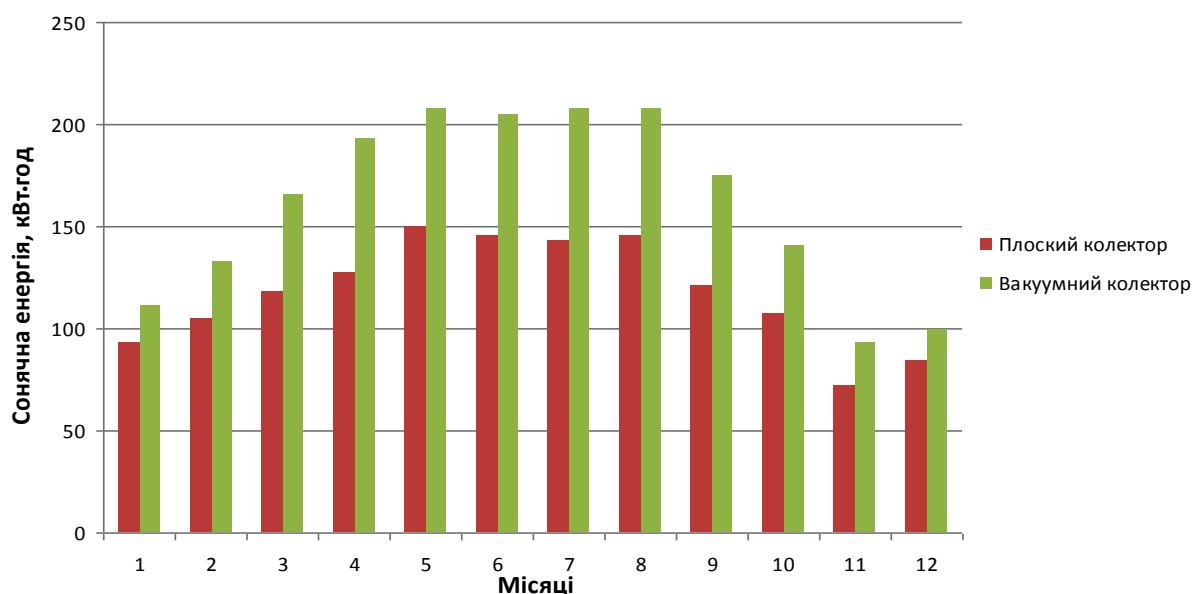


Рис.5. Графік середньомісячного виробітку теплової енергії геліоустановками

Висновки

В ясний день геліоустановки можуть використовувати майже всю сонячну радіацію, за винятком вечірніх і ранкових годин, а безперервна тривалість сонячного випромінювання протягом 6 год забезпечує найменші втрати енергії на розігрів геліоустановки та підвищує її рентабельність. Термін ефективної експлуатації геліоенергетичного обладнання в межах Київської області становить від 5 до 7 міс. (з травня до жовтня).

Порівнюючи подібні геліоустановки фірми WATT S.A., які відрізняються тільки видами колекторів, зроблено такі висновки:

1) сучасний ефективний вакуумний геліоколектор працює із середнім ККД 48,4 %, за тих же умов ККД плоского геліоколектора становить 34 %;

2) вакуумні колектори можуть нагрівати теплоносії до 250 °С влітку і не менше 35 °С взимку, навіть при захмареному небі. Заміщення теплового навантаження вакуумного колектора в літній період становить 100 %, а плоского близько 70 % (рис.4.);

3) середньомісячний виробіток теплової енергії геліоустановкою з вакуумними колекторами у літній період досягає близько 200 кВт·год, що на 40 % більше, ніж виробляють геліоустановки з плоскими колекторами (рис.5.);

4) термін окупності геліоустановок з вакуумними колекторами менший (11 років), ніж установок з плоскими (17 років), хоча вартість самої геліоустановки з вакуумними колекторами вища.

Список літератури

1. Дзядикевич Ю.В. Енергетичний менеджмент / Дзядикевич Ю.В., Буряк М.В., Розум Р.І. – Тернопіль: Економічна думка, 2010. – 295 с.

2. Зеркалов Д.В. Энергозбереження в Україні: монографія / Д.В. Зеркалов. – К.: Основа, 2012. – 584 с.

3. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики. Офіційний веб-сайт [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua>

4. Beckman W., Duffie J. Solar Engineering of Thermal Processes / W. Beckman, J. Duffie // A Wiley-Interscience Publication, New York. – 1980. – 919 p.

5. Chochowski A. Sloneczne instalacje grzewcze / A. Chochowski, D. Czekalski // Ciepłownictwo, ogrzewnictwo, wentylacja. – SGGW, Warszawa. – 2011. – P. 111–118.

Приведены результаты технико-экономического сравнения гелиоустановок с двумя типами солнечных коллекторов – плоского и вакуумного с точки зрения эффективности их работы и срока окупаемости.

Гелиосистема, солнечный коллектор, эффективность работы, срок окупаемости.

Paper presents results of the technical and economic comparison of solar systems with two types of solar collectors (flat plate and vacuum tube) according to that efficiency and payback period.

Heliosystem, solar collector, efficiency, payback period.

МЕТОД РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Б.Х. Драганов, доктор технических наук

Приведен расчетно-экспериментальный метод моделирования тепломассообменных процессов, характерных для строительной теплофизики. При решении обратной задачи получены решения, наиболее соответствующие результатам проводимого эксперимента.

Параметрический анализ, идентификация параметров, решение обратных задач, итерационный процесс, вычислительный эксперимент, матрица, пространственно-временная область.

Одним из путей уменьшения погрешности расчетного анализа и экспериментальных исследований является использование расчетно-экспериментального подхода.

Расчетно-экспериментальный подход к моделированию и прогнозированию исследуемых тепломассообменных процессов обеспечивает идентификацию параметров математической модели решением обратных задач по имеющимся данным проведенных экспериментов.

Цель исследования – разработка метода, направленного на снижение тепловых потерь на основе теоретических и экспериментальных данных.

Материалы и методика исследований. Схема расчетно-экспериментального анализа тепломассообменных процессов приведена на рисунке.

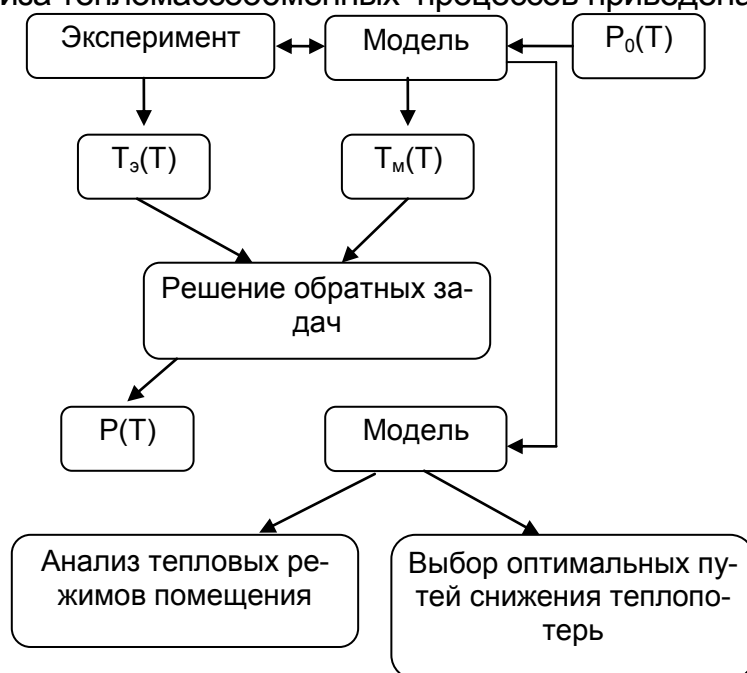


Схема расчетно-экспериментального подхода

Решение обратных задач имеет значение для идентификации параметров, используемых при исследовании моделей, как важный этап обеспечения адекватности этих моделей (если есть какая-либо экспериментальная информация об исследуемом процессе) [2].

$$F = \left\{ \sum_{j=1}^m \left| T_{jm}(P) - T_{j0} \right|^2 / m \right\}^{0,5} \approx \delta, \quad (1)$$

Для оценки (идентификации) параметров в общем случае нелинейных математических моделей (в том числе моделей процессов тепломассопереноса) выбран итерационный метод Ньютона-Гаусса.

$$P^{l+1} = P^l + \Delta P^l, \quad l = 0, 1, \dots, n, \quad (2)$$
$$\begin{cases} Z_{1,l}^l \Delta P_1^l + ... + Z_{1,i}^l \Delta P_i^l + ... + Z_{1,n}^l \Delta P_n^l = T_{1M}^1 - T_{1j} \\ \\ Z_{j,l}^l \Delta P_1^l + ... + Z_{j,i}^l \Delta P_i^l + ... + Z_{j,n}^l \Delta P_n^l = T_{jM}^1 - T_{j\vartheta} \\ \\ Z_{m,j}^l \Delta P_1^l + ... + Z_{m,i}^l \Delta P_i^l + ... + Z_{m,n}^l \Delta P_n^l = T_{mM}^1 - T_{m\vartheta} \end{cases}, \quad (3)$$

Значения T_{jM}^1 вычисляются решением прямой задачи теплообмена при известных (заданных при $l=0$) параметрах на предыдущей итерации l

в тех же пространственно-временных точках y , в которых измерены соответствующие значения $T_{j\beta}$. Система линейных алгебраических уравнений (3) размерностью $m \times n$ ($m > n$) решается с помощью метода наименьших квадратов:

$$A^T A \Delta P = A^T B, \quad (4)$$

где A – матрица коэффициентов чувствительности $Z_{j,i}^l$; B – вектор правой части; A^T – матрица, транспонированная к матрице A .

Итерационный процесс (2) – (4) приводит к минимизации квадратичного критерия качества решения обратной задачи (1).

Итерационные методы заключается в определении собственных значений и собственных векторов матрицы [1].

Анализ матрицы $A^T A$ показывает, что она не всегда хорошо обусловлена. В плохой обусловленности матрицы $A^T A$ и проявляется физическая и математическая некорректность обратных задач, поэтому обращение матрицы $A^T A$ (решение уравнения (3) может привести к неустойчивым решениям этой обратной задачи).

С целью борьбы с неустойчивостью решения обратных задач теплообмена предлагается использовать комплекс регуляризирующих процедур, совместное использование которых позволяет получать устойчивые решения:

- учет ограничений сверху и снизу на искомое решение (искомые параметры) обратных задач;
- итерационная регуляризация – остановка итерационного процесса;
- классическая регуляризация по А.Н. Тихоновой, согласно которой вместо уравнений (3) решается задача:

$$(A^T A + \alpha E) \Delta P = A^T B, \quad (5)$$

где E – единица матрицы; α – параметр регуляризации.

В данном случае речь идет об использовании формы отбора допустимых решений при построении устойчивых к исходной информации приближенных решений некоторых задач [3].

Методика проведения вычислительного эксперимента и идентификации параметров модели следующая:

- решаем прямую задачу. В качестве входного параметра используем вектор P искомых параметров. В результате получаем значения температур $T_{jm}(P)$;

- из полученных температур $T_{jm}(P)$ составляем выборку из точек наиболее характерных точек экспериментальных исследований. В результате получаем точки, которые используются в качестве уже экспериментальных данных $T_{j\beta}$ ("точные экспериментальные данные");

- проводим решение ОЗТ с поиском от 1 до n параметров модели согласно методу последовательной идентификации. При этом в качестве начального приближения выбирается вектор искомых параметров P^0 , который отличается от P ;

- моделируем ошибки эксперимента. В результате получаем значения $T'_{jэ}$ как "возмущенные экспериментальные данные";
- проводим поиск тех же параметров P , что и в п. 3, но уже на "возмущенных экспериментальных данных".

Под моделированием ошибок эксперимента подразумевается внесение искусственных возмущений в "точные экспериментальные данные", которое проводится по формуле (5):

$$T_{jэ} = T_{jm}^T (1 + \varepsilon \rho_j), \quad (6)$$

где ε – коэффициент линейной зависимости плотности от температуры;
 ρ – плотность, кг/м³.

Таким образом, расчетно-экспериментальный подход – это способ анализа, оптимизации и прогнозирования исследуемых процессов тепло-массообмена на основе компьютерной (расчетной) модели, адекватность которой обеспечивается путем параметрической или структурной идентификации с помощью экспериментальной информации об исследуемом процессе и решении обратных задач. Параметрическая идентификация – это определение величин некоторых параметров модели, которые минимизируют разницу экспериментальных и расчетных значений температур, а структурная идентификация – определение неизвестных составляющих модели, также приводящее к минимизации отклонения расчетных и экспериментальных значений температур.

Выводы

Исследования тепломассообменных процессов на основе моделирования теоретических и экспериментальных методов анализа позволяет получить наиболее точные решения и указать пути уменьшения тепловых потерь.

Список литературы

1. Канторович Л.В. Функциональный анализ /Л.В. Канторович, Г.П. Акимов. – [2-е изд.]. – М.: Наука, 1977.
2. Круковский П.Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) / П.Г. Круковский. – К.: Ин-т технической теплофизики НАН Украины, 1998. – 224 с.
3. Тихонов А.Н. Доклады АН СССР/ А.Н. Тихонов. – М., 1963. – Т.151, №3. – С. 501– 504.

Наведено розрахунково-експериментальний метод моделювання тепломасообмінних процесів, характерних для будівельної теплофізики. При вирішенні зворотної задачі отримано рішення, найбільш відповідні до результатів проведеного експерименту.

Параметричний аналіз, ідентифікація параметрів, рішення зворотних задач, ітераційний процес, обчислювальний експеримент, матриця, просторово-часова область.

The calculated and experimental method for modeling heat and mass transfer processes typical for the construction of Thermophysics. Solution of the inverse problem solution to get the most relevant results to the experiment.

Parametric analysis, parameter identification, the solution of inverse problems, iterative process, a computational experiment, matrix, space-time region.

УДК 621.3: 631.53.027.33

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРОКУ ВІДЛЕЖУВАННЯ НАСІННЯ КРУП'ЯНИХ КУЛЬТУР, ОБРОБЛЕНОГО В СИЛЬНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ, НА ЙОГО ПОСІВНІ ЯКОСТІ

О.М. Берека, доктор технічних наук

С.М. Усенко, кандидат технічних наук

С.А. Шворов, доктор технічних наук

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

М.М. Сучек, кандидат сільськогосподарських наук

Хмельницька ДСГДС ІКСГП НААН України

Наведено результати досліджень впливу електричного поля високої напруженості постійного струму на посівні якості круп'яних культур. Встановлено ефективність дії електричного поля високої напруженості на енергію проростання і схожість насіння залежно від строку відлежування перед посівом.

Електричне поле високої напруженості, круп'яні культури, схожість, енергія проростання.

Передпосівна обробка насінневого матеріалу є одним із найважливіших етапів у процесі вирощування сільськогосподарської продукції. На сучасному етапі розвитку зернової галузі передпосівна обробка передбачає декілька етапів, основними з яких є: протруювання насіння та обробка біологічними стимуляторами росту. В результаті протруювання насіння знищується шкідлива мікрофлора, яка призводить до захворюваності рослин після висіву, але в той же час погіршуються посівні якості. Тому насіння потребує додаткового обробітку біологічними стимуляторами росту. Така технологія передбачає використання хімічних та біологічних препаратів, які мають здатність накопичуватись як у ґрунті, так і у продукції рослинництва, що врешті-решт негативно впливає на екологічну ситуацію в природі та організм людини.

The calculated and experimental method for modeling heat and mass transfer processes typical for the construction of Thermophysics. Solution of the inverse problem solution to get the most relevant results to the experiment.

Parametric analysis, parameter identification, the solution of inverse problems, iterative process, a computational experiment, matrix, space-time region.

УДК 621.3: 631.53.027.33

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРОКУ ВІДЛЕЖУВАННЯ НАСІННЯ КРУП'ЯНИХ КУЛЬТУР, ОБРОБЛЕНОГО В СИЛЬНОМУ ЕЛЕК- ТРИЧНОМУ ПОЛІ, НА ЙОГО ПОСІВНІ ЯКОСТІ

***О.М. Берека, доктор технічних наук
С.М. Усенко, кандидат технічних наук
С.А. Шворов, доктор технічних наук
Національний університет біоресурсів
і природокористування України
М.М. Сучек, кандидат сільськогосподарських наук
Хмельницька ДСГДС ІКСГП НААН України***

Наведено результати досліджень впливу електричного поля високої напруженості постійного струму на посівні якості круп'яних культур. Встановлено ефективність дії електричного поля високої напруженості на енергію проростання і схожість насіння залежно від строку відлежування перед посівом.

Електричне поле високої напруженості, круп'яні культури, схожість, енергія проростання.

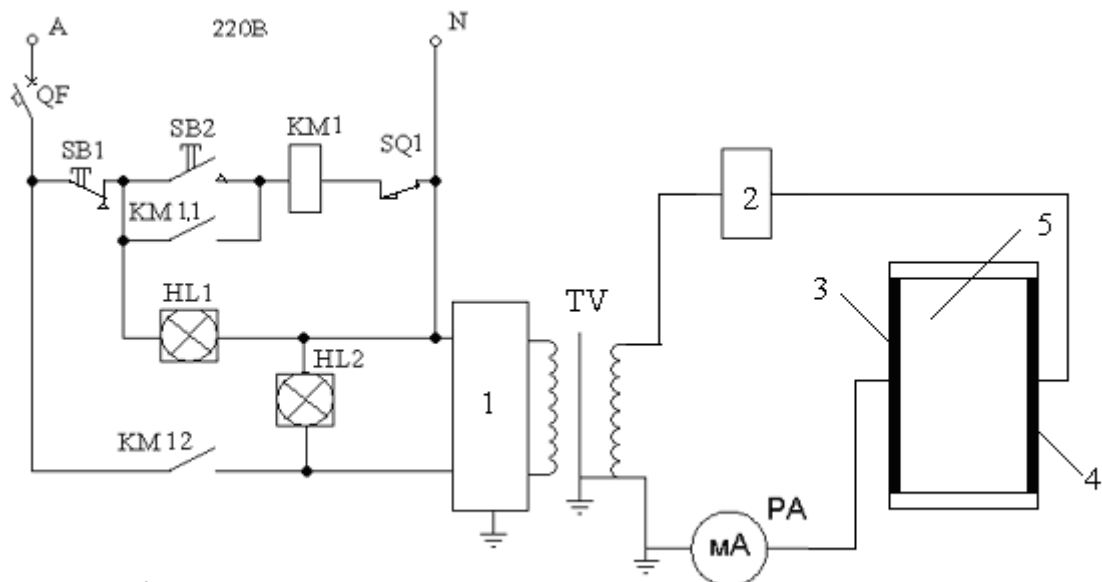
Передпосівна обробка насінневого матеріалу є одним із найважливіших етапів у процесі вирощування сільськогосподарської продукції. На сучасному етапі розвитку зернової галузі передпосівна обробка передбачає декілька етапів, основними з яких є: протруювання насіння та обробка біологічними стимуляторами росту. В результаті протруювання насіння знищується шкідлива мікрофлора, яка призводить до захворюваності рослин після висіву, але в той же час погіршуються посівні якості. Тому насіння потребує додаткового обробітку біологічними стимуляторами росту. Така технологія передбачає використання хімічних та біологічних препаратів, які мають здатність накопичуватись як у ґрунті, так і у продукції рослинництва, що врешті-решт негативно впливає на екологічну ситуацію в природі та організм людини.

Прагнення до отримання високих врожаїв без завдання шкоди до-вкіллю спонукає до пошуку альтернативних способів передпосівної обробки. Останнім часом все більше уваги науковців та виробників привертають фізичні способи обробки. Нині розроблені та використовуються способи обробки із застосуванням високих температур, рентгенівського і гамма-випромінювання, полів НВЧ [1, 5]. Та незважаючи на екологічність та ряд інших переваг, велика енергоємність та нечітка відтворюваність результатів заважають широкому впровадженню цих технологій.

Одним із напрямів, що розвивається останнім часом, є застосування електричного поля високої напруженості [2–4]. Під час такої обробки на насінневу масу діє сукупність факторів – електричне поле високої напруженості, постійний струм провідності, іонізаційні процеси в насіннєвій масі та озон, які забезпечують одночасну стимуляцію ростових процесів і знезараження поверхні зерна від шкідливої мікрофлори.

У дослідженнях, проведених на зерновій масі ячменю, було встановлено, що ефективний вплив від обробки в електричному полі високої напруженості проявляється не відразу, а через певний час відлежування. Донині такі дослідження проводилися лише на зернових культурах, а ефективність впливу обробки в електричному полі високої напруженості на круп'яні культури та ефективний строк їх відлежування перед посівом не досліджувалися.

Мета досліджень – вивчення ефективності впливу електричного поля високої напруженості постійного струму на посівні якості насіння круп'яних культур та встановлення ефективного строку відлежування насіння перед посівом.



Принципова електрична схема дослідної установки:

1 – регулятор напруги; 2 – помножувач напруги; 3, 4 – плоско-паралельні пластинчасті електроди; 5 – камера для розміщення насіння

Матеріали та методика досліджень. На кафедрі електропривода та електротехнологій НУБіП України проводяться дослідження впливу сильних електричних полів на посівні якості насіння. Обробка насіннєвої маси проводиться на розробленій експериментальній установці, електрична схема якої наведена на рисунку. Насіннєва маса, що обробляється, засипається в камеру обробки, де знаходиться між високовольтними електродами. При підведенні до електродів високої напруги насіннєва маса піддається комплексній дії декількох факторів, основними з яких є постійний струм та озон. Постійний струм, що проходить через насінини, збуджує ростові процеси, а озон, який утворюється в повітряних включеннях насіннєвої маси, знешкоджує шкідливу мікрофлору, запобігаючи захворюваності рослин після висіву.

Для проведення досліджень використовувались чотири види круп'яних культур: гречка (Вікторія, Єлена, Оранта), сориз (Кварц, Одеський 302, Титан), сорго (Одеський 205, Фаворит, Медовий), просо (Денвікське, Вітрило, Золотисте).

Дослідження проводили при температурі повітря 18⁰ С та вологості 75 %. Режими обробки наведено в табл. 1.

1. Режимні параметри обробки насіння круп'яних культур в електричному полі високої напруженості

Культура	Напруженість поля, кВ/см	Густина струму, А/м ²	Час експозиції, хв
Гречка сорту Вікторія	2,1	0,2	3
Гречка сорту Єлена	3,8	0,12	3
Гречка сорту Оранта	3,2	0,18	2,2
Сориз сорту Кварц	5,2	0,0042	5
Сориз сорту Одеський 302	5,1	0,01	3
Сориз сорту Титан	5	0,0092	5
Сорго сорту Одеський 205	6,2	0,032	5
Сорго сорту Фаворит	6,3	0,031	3
Сорго сорту Медовий	5	0,05	3
Просо сорту Денвікське	4,8	0,045	3
Просо сорту Вітрило	5,2	0,076	3
Просо сорту Золотисте	3,2	0,1	3

Лабораторний аналіз проб насіння проводився згідно з ДСТУ 4138-2002 «Методи визначення якості сільськогосподарських культур» в Старокостянтинівській районній державній насіннєвій інспекції Хмельницької області.

Польові досліді закладалися протягом 2010 року в польовій сівозміні Хмельницького інституту АПВ. Агротехніка в досліді відповідає рекомендацій на час їх проведення для зони, за виключенням агрозаходів, зміна яких передбачається схемами дослідів для вивчення.

Результати досліджень. У результаті проведених досліджень було встановлено, що обробка насіння в електричному полі високої напруженості сприяє покращенню посівних якостей, але найкращий ефект досягається, якщо насіння висівати не відразу після обробки, а через певний час відлежу-

вання. Результати досліджень впливу обробки насіння круп'яних культур в електричному полі високої напруженості наведено в табл 2.

2. Результати впливу обробки насіння круп'яних культур в електричному полі високої напруженості

Культура	Енергія проростання насіння, %				Лабораторна схожість насіння, %			
	Контроль	Оброблене, днів			Контроль	Оброблене, днів		
		2	7	10		2	7	10
Гречка сорту Вікторія	96	96	98	98	96	96	98	98
Гречка сорту Єлена	86	86	87	88	86	86	88	88
Гречка сорту Оранта	92	92	94	94	93	94	94	94
Сориз сорту Кварц	87	84	82	82	88	85	82	82
Сориз сорту Одеський 302	86	86	88	88	86	86	88	88
Сориз сорту Титан	96	95	95	92	96	96	95	92
Сорго сорту Одеський 205	90	92	96	98	90	94	96	98
Сорго сорту Фаворит	94	94	96	98	96	95	98	98
Сорго сорту Медовий	94	95	98	98	94	96	98	98
Просо сорту Денвікське	97	97	98	98	98	98	98	98
Просо сорту Вітрило	93	94	98	98	94	95	98	98
Просо сорту Золотисте	95	96	97	97	96	96	97	97

Аналізуючи проведені дослідження, результати яких подано в табл. 2, було встановлено, що ефект стимуляції насіння після обробки в електричному полі високої напруженості постійного струму найкраще проявляється на 7–10 день порівняно з контрольним зразком (без обробки). Тобто на десятий день найбільше включаються фізіологічні ростові процеси в насінні як результат дії обробки. Так, дані табл. 2 свідчать, що проби насіння, висіяні на другий день після обробки не показали суттєвої переваги за енергією проростання і лабораторною схожістю порівняно з контрольним варіантом, тоді як у зразках, закладених на сьомий та десятий день після обробки ці показники значно покращилися відносно контрольних. Щодо культури соризу, то в сортів Кварц та Титан спостерігали негативну дію обробки в електричному полі високої напруженості на посівні якості насіння, що свідчить про різну сортову реакцію та необхідність додаткового вивчення та удосконалення режимів обробки.

Найбільший приріст показників посівних якостей спостерігався в насінні зернового сорго сорту Одеський 205, де енергія проростання та лабораторна схожість збільшилися на 8 % (з 90 до 98 %) порівняно з контрольним варіантом (без обробки).

Висновки

За результатами проведених досліджень встановлено, що в результаті обробки насіння круп'яних культур в електричному полі високої напруженості покращуються його посівні якості, але для досягнення найкращого ефекту обробку насіння необхідно проводити за 7–10 днів до висіву. Відлежування насіння протягом 7–10 днів дозволяє в найбільшій мірі активізувати ростові процеси в насінні.

Список літератури

1. Андрейчук В.К. Электрофизические методы предпосевной обработки семян различных сельскохозяйственных культур / В.К. Андрейчук, А.Е. Реднев, И.А. Потапенко // Применение электротехнических устройств в АПК: Тр. КГАУ. – Краснодар, 2000. – Вып. 381 (409). – С. 74 – 78.
2. Берека О.М. Дослідження впливу електричного поля високої напруги на посівні якості насіння та визначення оптимальної дози обробки / О.М. Берека, С.М. Усенко // Науковий вісник НУБіП України. – 2009. – Вип. 139. – С. 62–66.
3. Берека О.М. Установка для обробки насіння в електричному полі високої напруги / О.М. Берека, Л.С. Червінський, С.М. Усенко // Наука та інновація: Зб. заверш. наук. та іннов. розробок НУБіП України. – 2010. – Вип. 1(7). – С. 21.
4. Наумов Е.М. Влияние послеуборочной обработки пшеницы в электростатическом поле на посевные качества семян / Е.М. Наумов // Электротехнология в сельском хозяйстве: Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1974. – Вып. 75. – С. 159 – 162.
5. Савельев В.А. Способы повышения качества посевного материала и методы его оценки [Использование физических факторов на примере зерновых культур] / В.А. Савельев. – Курган: Курганская гос. с.-х. акад. им. Т.С. Мальцева, 1995. – 170 с.

Приведены результаты исследований влияния электрического поля высокой напряженности постоянного тока на посевные качества крупяных культур. Установлена эффективность действия электрического поля высокой напряженности на энергию прорастания и всхожесть семян в зависимости от срока отлежки до посева.

Электрическое поле высокой напряженности, крупяные культуры, всхожесть, энергия прорастания.

The results of studies of the effect of the electric field of high intensity direct current on crop quality cereals. Established the effectiveness of the electric field intensity at high vigor and germination, depending on the duration of softened before sowing.

The electric field of high intensity, cereal crops, germination, vigor.

УДК 004.3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ AVR

***И.П. Матвеевко, кандидат технических наук
Белорусский государственный аграрный технический
университет, г. Минск***

Рассмотрены преимущества и методики компьютерного моделирования электронных схем, включающие в свой состав микроконт-

Список літератури

1. Андрейчук В.К. Электрофизические методы предпосевной обработки семян различных сельскохозяйственных культур / В.К. Андрейчук, А.Е. Реднев, И.А. Потапенко // Применение электротехнических устройств в АПК: Тр. КГАУ. – Краснодар, 2000. – Вып. 381 (409). – С. 74 – 78.
2. Берека О.М. Дослідження впливу електричного поля високої напруги на посівні якості насіння та визначення оптимальної дози обробки / О.М. Берека, С.М. Усенко // Науковий вісник НУБіП України. – 2009. – Вип. 139. – С. 62–66.
3. Берека О.М. Установка для обробки насіння в електричному полі високої напруги / О.М. Берека, Л.С. Червінський, С.М. Усенко // Наука та інновація: Зб. заверш. наук. та іннов. розробок НУБіП України. – 2010. – Вип. 1(7). – С. 21.
4. Наумов Е.М. Влияние послеуборочной обработки пшеницы в электростатическом поле на посевные качества семян / Е.М. Наумов // Электротехнология в сельском хозяйстве: Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1974. – Вып. 75. – С. 159 – 162.
5. Савельев В.А. Способы повышения качества посевного материала и методы его оценки [Использование физических факторов на примере зерновых культур] / В.А. Савельев. – Курган: Курганская гос. с.-х. акад. им. Т.С. Мальцева, 1995. – 170 с.

Приведены результаты исследований влияния электрического поля высокой напряженности постоянного тока на посевные качества крупяных культур. Установлена эффективность действия электрического поля высокой напряженности на энергию прорастания и всхожесть семян в зависимости от срока отлежки до посева.

Электрическое поле высокой напряженности, крупяные культуры, всхожесть, энергия прорастания.

The results of studies of the effect of the electric field of high intensity direct current on crop quality cereals. Established the effectiveness of the electric field intensity at high vigor and germination, depending on the duration of softened before sowing.

The electric field of high intensity, cereal crops, germination, vigor.

УДК 004.3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ AVR

***И.П. Матвеевко, кандидат технических наук
Белорусский государственный аграрный технический
университет, г. Минск***

Рассмотрены преимущества и методики компьютерного моделирования электронных схем, включающие в свой состав микроконт-

роллеры AVR фирмы ATMEL, на основе использования интегрированной среды разработки AVR Studio 6 и программы Proteus v7.7, которая представляет собой симулятор принципиальных электрических схем.

Компьютерное моделирование, микроконтроллер, принципиальная электрическая схема.

Различные системы автоматизированного управления производственными и технологическими процессами в сельском хозяйстве основываются на применении средств электронной и микропроцессорной техники, например, в растениеводстве – для измерения температуры и влажности почвы; в животноводстве и птицеводстве – для дистанционного контроля и регулирования температуры и влажности воздуха; при эксплуатации машинно-тракторного парка – для диагностики технического состояния двигателей внутреннего сгорания, контролирования процесса впрыскивания топлива в цилиндры дизелей и момента зажигания горючей смеси в цилиндрах карбюраторных двигателей; в энергетике – для защиты токоприемников от ненормальных режимов работы, регулирования электрического освещения, обеспечения электробезопасности и т.д.

Такие системы автоматизированного управления, как правило, включают электронные схемы с использованием микроконтроллеров различных типов. Однако отладка работы реальных контроллеров оказывается затратной задачей, так как недостаточно только написать программу в определенной среде, необходимо с помощью программатора «прошить» процессор, т.е. записать в него разработанную программу, подключить к выходу контроллера исполнительные устройства и только тогда наглядно увидеть результат своей работы.

Цель исследований – показать преимущества и методику создания, отладки и работы виртуальных схем с помощью средств компьютерного моделирования.

Материалы и методика исследований. В работе используются микроконтроллеры AVR фирмы ATMEL, которые представляют собой современные высокопроизводительные и экономичные встраиваемые контроллеры многоцелевого назначения [3].

Для проведения компьютерного моделирования были использованы интегрированная среда разработки **AVR Studio 6** и программа **Proteus v7.7**.

AVR Studio 6 предоставляет возможность осуществлять разработку и отладку программ для микроконтроллеров AVR, поддерживает большое количество средств программирования и отладки.

Программы пишутся на языке ассемблер (Assembler), поддерживается также язык программирования Си.

Proteus (by Labcenter Electronics) – симулятор принципиальных электронных схем, с помощью которого можно проверить работу спроектированной электрической схемы.

Результаты исследований. Приведем методику работы с AVR Studio 6 и Proteus v7.7.

Создание проекта в AVR Studio 6.

1. После установки запустить программу и после появления стартового окна в левом верхнем углу кликнуть New Project.

2. Выбрать язык программирования AVR Assembler, кликнув наверху вкладку AVR Assembler Project.

В строке Name указать имя проекта, используя латинский алфавит (например, Primer1).

В строке Location – путь и место хранения файлов.

Имя проекта, введенное в строке Solution name будет выводиться в меню при старте.

Если появились затруднения при создании проекта или при открытии ранее созданного проекта можно воспользоваться стандартным путем: на панели Menu выбрать File – New или Open – Project.

После клика OK появляется окно выбора микроконтроллера (Device Selection) (рис.1).

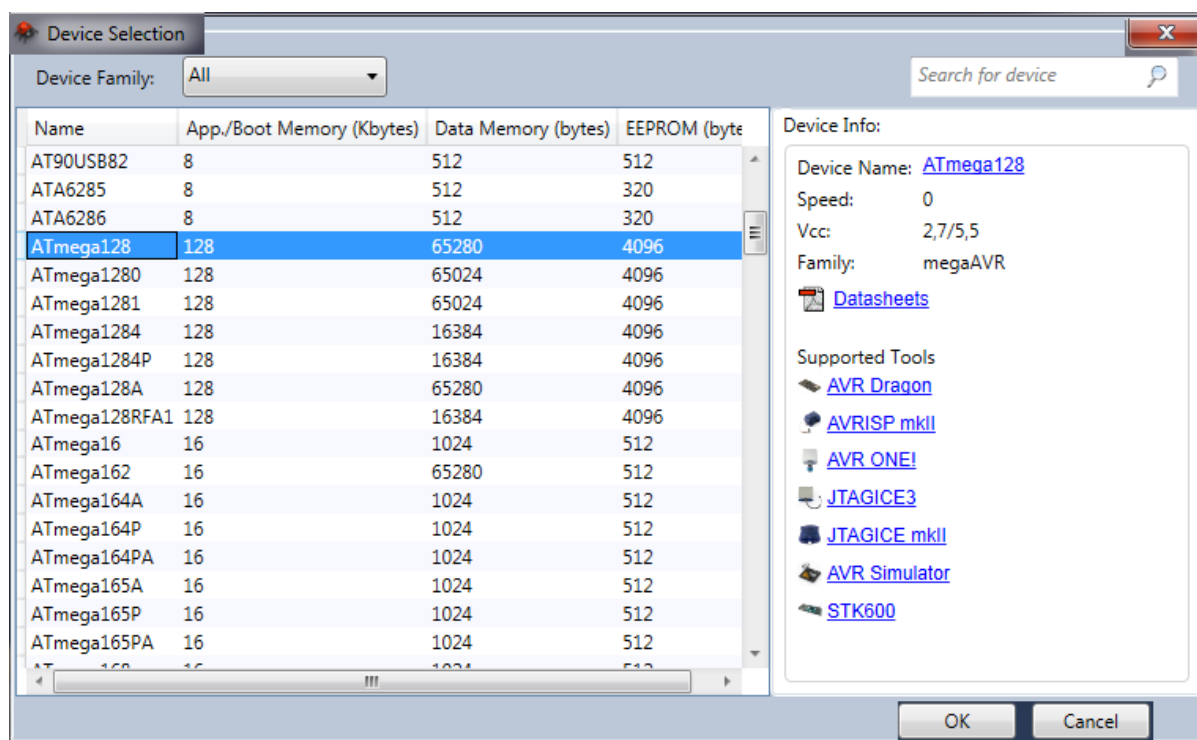


Рис.1. Окно выбора типа микроконтроллера

3. Выбрать тип микроконтроллера (например, ATmega128) [2], нажимаем OK, после чего появляется страница редактора для написания программы на Assembler (рис.2).

4. Написать программу. Для этого необходимо предварительно изучить наборы команд Assembler и знать постановку задачи, т.е. что мы хотим получить на выходе микроконтроллера. Нам нужно чтобы микроконтроллер принял информацию, обработал по заданному алгоритму и выдал результат в понятной для нас форме. В простейшем случае, чтобы увидеть результат работы микроконтроллера, к его выходным портам подк-

лючают светодиоды, которые должны загораться в соответствии с алгоритмом [1].

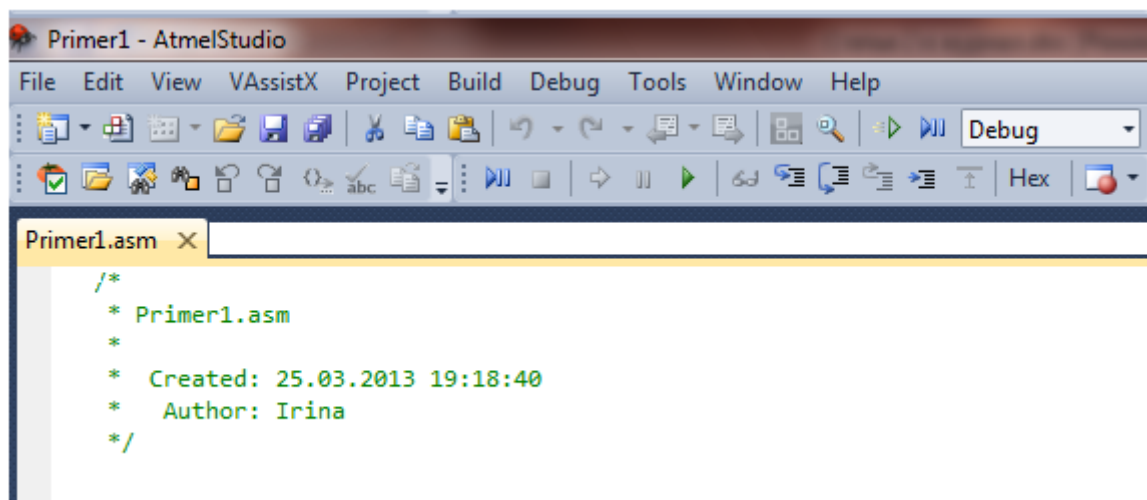


Рис.2. Страница редактора для написания программы на Assembler

Пример текста программы приведён ниже. В этой программе через порты В и D контроллера АТmega128 устанавливается набор заданных сигналов (11001100), т.е. производится включение соответствующих диодов.

```
/*  
 * Primer1.asm  
 *  
 * Created: 25.03.2013 19:18:40  
 * Author: Irina  
 */  
.def temp=r16; директива  
;=====  
; Начало программы  
.cseg; директива  
.org 0; начало первой строки программы  
rjmp Start; относительный переход к метке Start  
; =====  
Start:  
ser temp; устанавливает все биты регистра temp в 1  
out DDRB,temp; переводит все биты  
out DDRD,temp; порта В и D на вывод  
clr temp; обнуляет регистр temp (устанавливает все биты регистра temp в 0)  
out PortB,temp; отключает подтягивающие резисторы  
out PortD,temp; портов В и D  
Cicle:  
ldi temp,0b11001100; включает светодиоды  
out PortB, temp; порта В  
rjmp Cicle; Возвращаемся к метке Cicle, зацикливаемся
```

5. Провести компиляцию программы, используя кнопку Debug – Start Without Debugging (рис.3). Суть работы компилятора заключается в переводе письменных символов, понятных для человека, в машинный код (в код нулей и единиц) и создание нового файла с расширением hex.

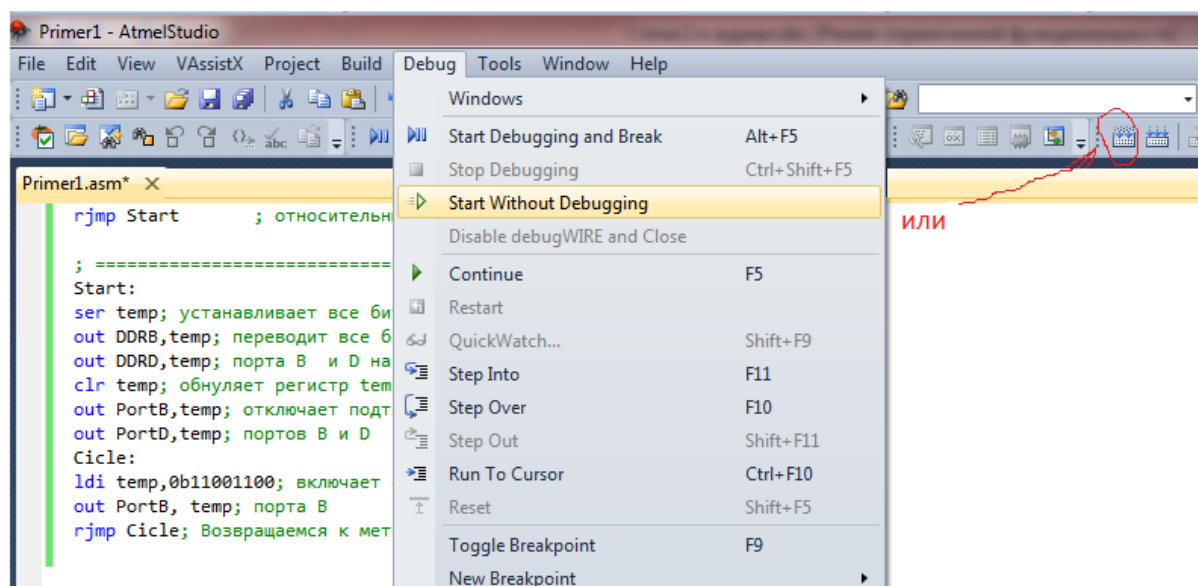


Рис.3. Проведение компиляции программы

В окне Output появится информация о проведенной компиляции, в конце должна быть надпись Build succeeded, которая подтверждает удачную сборку .hex файла.

Все файлы можно посмотреть там, где было указано в строке Location. В папке Debug, которая находится в папке, указанной в строке Location, будет находиться скомпилированный .hex файл, который необходим для прошивки реального микроконтроллера или для симуляции работы микроконтроллера в программе Proteus v7.7[4].

В Proteus наряду с редактором электронных схем (ISIS) включен графический редактор печатных плат (ARES), т.е. при необходимости возможно развести печатную плату в соответствии с разработанной электронной схемой и создать реальное устройство.

Создание проекта в Proteus v7.7.

1. Открыть предварительно установленную программу Proteus v7.7.
2. Собрать виртуальную электронную схему, которая в данном проекте включает:

- микроконтроллер ATmega128, программу для которого создали в AVR Studio 6;
- восемь светодиодов, с помощью которых можно увидеть результат работы микроконтроллера;
- восемь токоограничивающих резисторов;
- восемь кнопок, с помощью которых можно управлять вручную горением светодиодов.

3. Выбрать элементы виртуальной электронной схемы.

Это можно сделать двумя способами.

Первый способ: нажимаем на кнопку  на панели инструментов слева, затем на кнопку **P** слева от надписи DEVICES. Откроется окно, в котором необходимо выбрать нужный нам элемент. Например, Microprocessor ICs — AVR Family — ATMEGA128, а можно написать нужное название в строке поиска сверху.

Второй способ выбора элементов – через панель Menu — Библиотека — Выбрать устройство/ Символ.

После нажатия кнопки Ввод, выбранные элементы появятся в списке DEVICES на левой панели (рис.4).

Аналогично осуществляется выбор других элементов схемы: резистор (RES), светодиод (LED-GREEN) и кнопка (BUTTON). Светодиоды могут быть выбраны различного свечения – зеленого (green), как в нашем случае, красного (red) или желтого (yellow).

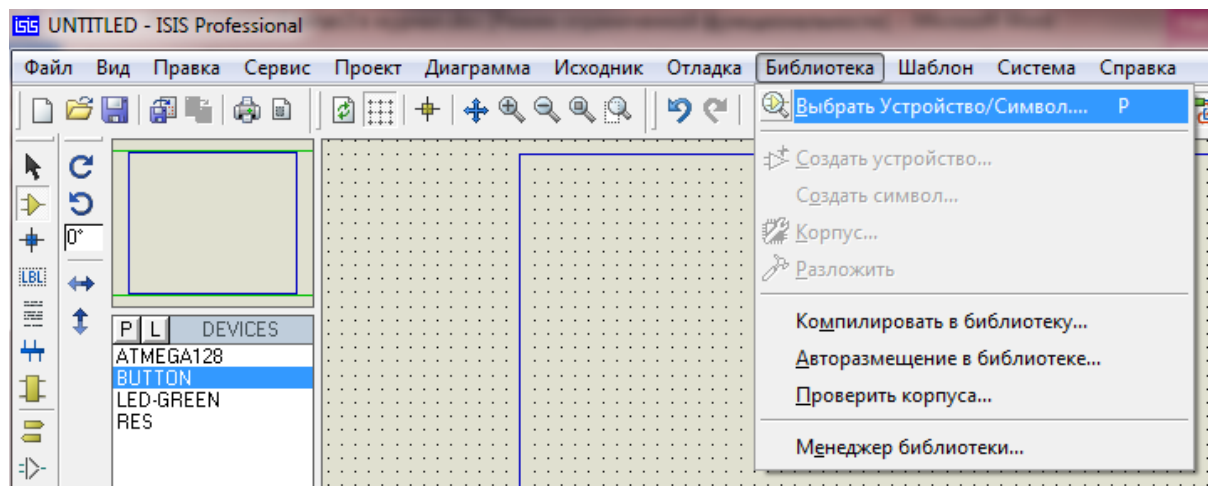
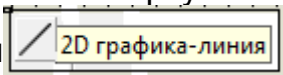


Рис.4. Выбор элементов виртуальной схемы

4. Объединить элементы в схему.

Из списка DEVICES выбираем микроконтроллер и помещаем его в рабочую область. Потом добавляем аналогичным образом 8 светодиодов и 8 резисторов и 8 кнопок. Резисторы имеют сопротивление по умолчанию 10 кОм, а нам нужно 300 Ом. Для изменения сопротивления щёлкнем по резистору двойным щелчком и в открывшемся окне найдем поле «Resistance» и внесем туда число 300.

Элементы схемы на монтажном поле размещаем таким образом, чтобы с одной стороны, минимизировать связи между элементами, а с другой – исключить их пересечение, т.е. в нашем случае входные кнопки подключаются к порту D микроконтроллера, а светодиоды с ограничивающими резисторами к порту В. Соединение элементов осуществляется с

помощью кнопки  на левой панели.

Катоды светодиодов потребуется подключить к земле. Чтобы получить вывод «Земля» нужно щёлкнуть на кнопке  и в списке выбрать «GROUND». В результате получаем готовый макет проекта.

5. Проверить работу собранной схемы.

В схеме кликаем на изображение контроллера и вводим путь, где находится .hex файл (рис.5), нажимаем ОК.

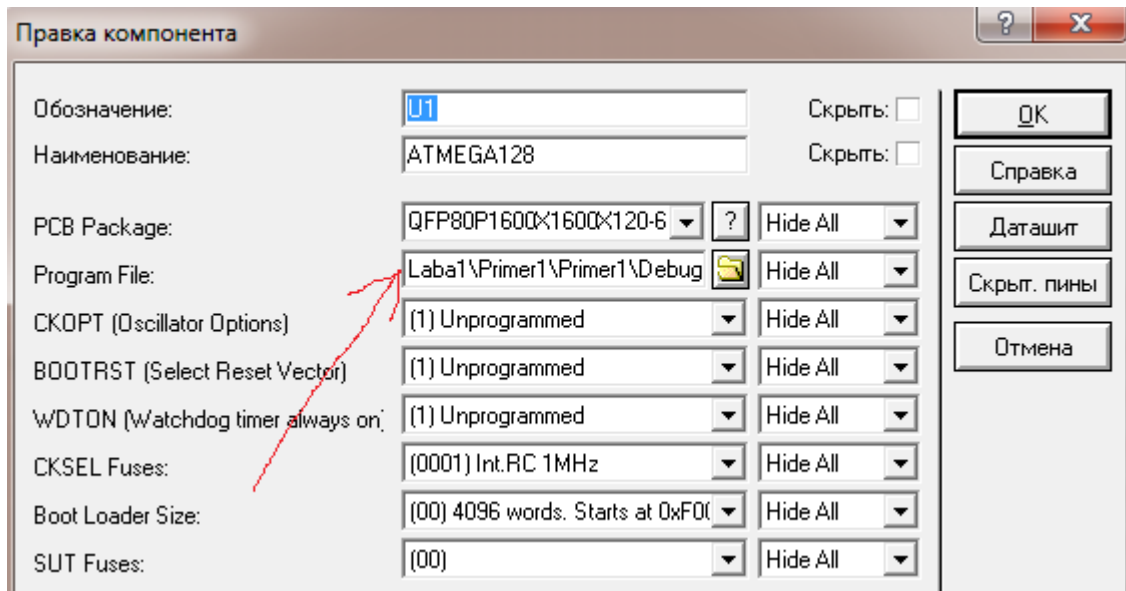


Рис.5. Выбор пути к .hex файлу микроконтроллера

Затем запускаем эмуляцию программы, нажав на кнопку Старт, и наблюдаем работу схемы в соответствии с написанной программой для микроконтроллера (рис.6).

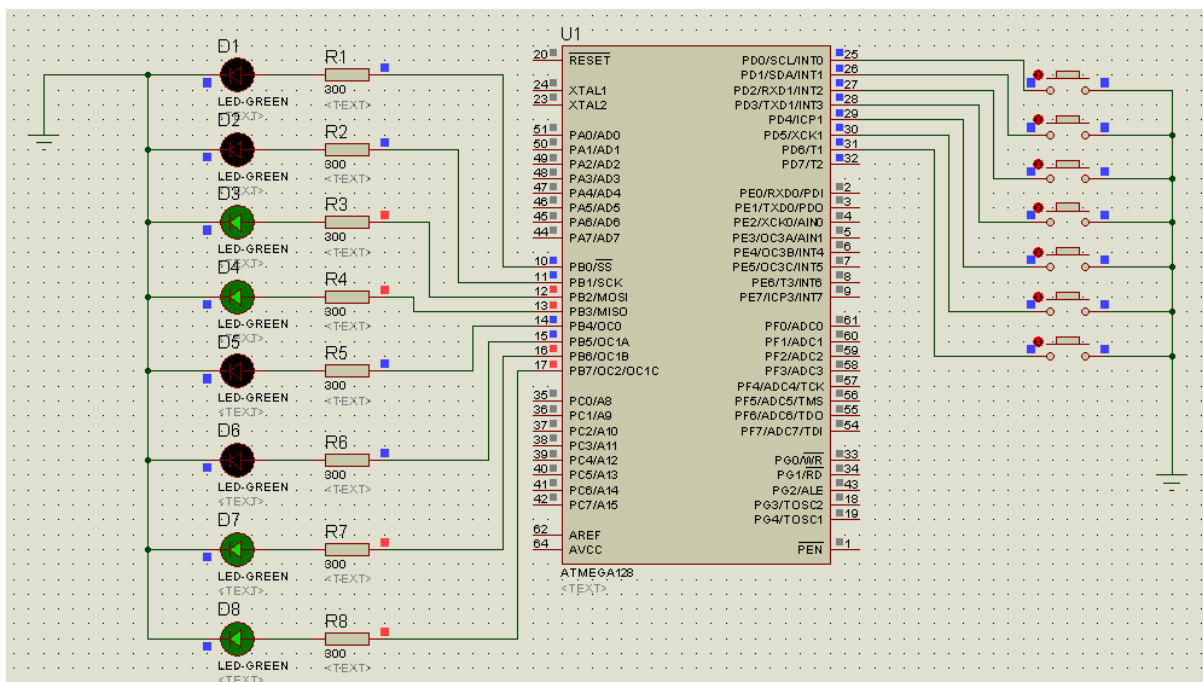


Рис.6. Работающий макет проекта

Выводы

Таким образом, используя интегрированную среду AVR Studio 6 и программу Proteus v7.7, появляется возможность достаточно легко, с наименьшими материальными и временными затратами, спроектировать электронную схему, включающую любой микроконтроллер AVR, провести её отладку и разводку платы. И только потом создавать реальное устройство.

Список литературы

1. Баранов В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы / В.Н. Баранов. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 288 с.
2. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Мегга. Руководство пользователя / А.В. Евстифеев. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 592 с.
3. Мортон Джон. Микроконтроллеры AVR. Вводный курс / Джон Мортон. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2006. – 272 с.
4. Программирование в AVR Studio 5 с самого начала [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// datagor.ru/microcontrollers/1787-programirovanie-v-avrstudio-5-s-nulya.html](http://datagor.ru/microcontrollers/1787-programirovanie-v-avrstudio-5-s-nulya.html).

Розглянуто переваги та методику комп'ютерного моделювання електронних схем, що містять мікроконтролери AVR фірми ATMEL, на основі використання інтегрованого середовища розробки AVR Studio 6 і програми Proteus v7.7, яка являє собою симулятор принципів електричних схем.

Комп'ютерне моделювання, мікроконтролер, принципова електрична схема.

The article discusses the advantages and methods of computer modeling of electronic schemes including AVR microcontrollers inside, using AVR Studio integrated development environment (IDE) and Proteus 6 v 7.7, which is a simulator of schematics.

Computer modeling, microcontroller, schematic.

УДК 621.327.539

ВПЛИВ ВІДКЛЮЧЕНЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ЕЛЕКТРОПРИВОДИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

**О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, кандидати технічних наук
С.А. Шворов, доктор технічних наук**

Проведено дослідження впливу перерв в електропостачанні на втрати енергії та тепловий режим роботи електродвигуна. Встанов-

Выводы

Таким образом, используя интегрированную среду AVR Studio 6 и программу Proteus v7.7, появляется возможность достаточно легко, с наименьшими материальными и временными затратами, спроектировать электронную схему, включающую любой микроконтроллер AVR, провести её отладку и разводку платы. И только потом создавать реальное устройство.

Список литературы

1. Баранов В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы / В.Н. Баранов. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 288 с.
2. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Мегга. Руководство пользователя / А.В. Евстифеев. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 592 с.
3. Мортон Джон. Микроконтроллеры AVR. Вводный курс / Джон Мортон. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2006. – 272 с.
4. Программирование в AVR Studio 5 с самого начала [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// datagor.ru/microcontrollers/1787-programirovanie-v-avrstudio-5-s-nulya.html](http://datagor.ru/microcontrollers/1787-programirovanie-v-avrstudio-5-s-nulya.html).

Розглянуто переваги та методики комп'ютерного моделювання електронних схем, що містять мікроконтролери AVR фірми ATMEL, на основі використання інтегрованого середовища розробки AVR Studio 6 і програми Proteus v7.7, яка являє собою симулятор принципів електричних схем.

Комп'ютерне моделювання, мікроконтролер, принципова електрична схема.

The article discusses the advantages and methods of computer modeling of electronic schemes including AVR microcontrollers inside, using AVR Studio integrated development environment (IDE) and Proteus 6 v 7.7, which is a simulator of schematics.

Computer modeling, microcontroller, schematic.

УДК 621.327.539

ВПЛИВ ВІДКЛЮЧЕНЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ЕЛЕКТРОПРИВОДИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

**О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, кандидати технічних наук
С.А. Шворов, доктор технічних наук**

Проведено дослідження впливу перерв в електропостачанні на втрати енергії та тепловий режим роботи електродвигуна. Встанов-

лено залежності втрат енергії та допустимої частоти вмикань електродвигуна від кількості відключень.

Електропривод, перерва в електропостачанні, кількість відключень, втрати енергії, частота вмикань електродвигуна.

Нині в Україні перерви в електропостачанні досягають 10 % загального часу технологічних процесів протягом року (проти 0,1 % у розвинених країнах). Недовідпуск електроенергії за рік становить близько 18 млн кВт·год. Економічні втрати в Україні від перерв електропостачання та зниження якості електроенергії за наближеними оцінками досягають 1 млрд грн. щорічно [1].

Відключення електричної енергії спричиняють часті пуски і гальмування електродвигуна. При значній частоті вмикання асинхронного двигуна втрати в перехідних процесах викликають його інтенсивне нагрівання. Особливо це важливо для асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, у якого вся енергія втрат цілком виділяється в об'ємі електродвигуна [2].

Мета досліджень – встановлення впливу перерв в електропостачанні на експлуатаційні характеристики електроприводів.

Матеріали та методика досліджень. Аналіз впливу відключень на втрати енергії в асинхронних електроприводах проведено з використанням положень теорії електропривода, які стосуються енергетики електропривода, та застосуванням математичного моделювання.

Результати досліджень. Показником, що визначає роботу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в умовах безперервних пусків і гальмувань, є допустима частота вмикань, при якому середнє перевищення температури після значного числа циклів дорівнює допустимому.

Для розрахунку допустимої частоти вмикань за годину скористаємося методом середніх втрат як найточнішим при аналізі теплових процесів в електродвигуні. Допустимим вважається таке число вмикань електродвигуна за годину, при якому середнє перевищення температури через час $t > 4T_n$ від початку роботи дорівнює допустимому.

Для визначення допустимої частоти вмикань за годину вважатимемо (рисунки), що тривалість робочого циклу складається із тривалості пуску t_n , роботи при усталеному режимі t_y , гальмування t_z і паузи t_0 , тобто [3]:

$$t_u = t_n + t_y + t_z + t_0, \quad (1)$$

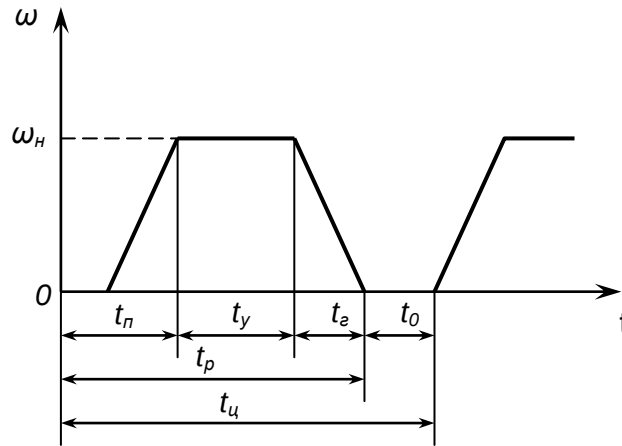
або

$$t_u = \frac{3600}{h}, \quad (2)$$

де h – фактична частота вмикань за годину.

Втрати енергії в асинхронному двигуні за цикл складаються з пускових втрат ΔA_n , втрат гальмування ΔA_z і втрат в усталеному режимі роботи при i -тому навантаженні $\Delta A_y = \Delta P_i t_y$. Віддача енергії в навколишнє середовище за час циклу складається з втрат при роботі в усталеному режимі

з номінальним навантаженням $\Delta P_{ном} t_y$, під час паузи $\beta_0 \Delta P_{ном} t_0$ і за час пуску і гальмування $\Delta P_{ном} (t_n + t_z) \left(\frac{1 + \beta_0}{2} \right)$, де $\frac{1 + \beta_0}{2}$ – середнє значення коефіцієнта погіршення тепловіддачі.



Зміна швидкості обертання двигуна за робочий цикл при повторно-короткочасному режимі роботи

Рівняння теплового балансу в усталеному режимі роботи електродвигуна з гранично допустимою частотою вмикань за годину матиме такий вигляд:

$$\Delta A_n + \Delta P_i t_y + \Delta A_z = \Delta P_{ном} (t_n + t_z) \left(\frac{1 + \beta_0}{2} \right) + \Delta P_{ном} t_y + \beta_0 \Delta P_{ном} t_0. \quad (3)$$

Величиною $\Delta P_{ном} (t_n + t_z) \left(\frac{1 + \beta_0}{2} \right)$ можна знехтувати, оскільки вона становить (2–4) % від суми ΔA_n і ΔA_z [4]. Якщо в усталеному режимі асинхронний двигун працює з номінальним навантаженням, то $\Delta P_{ном} = \Delta P_i$. Тоді рівняння теплового балансу двигуна (3) запишеться у вигляді:

$$\Delta A_n + \Delta A_z = \Delta P_{ном} \beta_0 t_0. \quad (4)$$

Враховуючи (2), отримаємо вираз для визначення допустимої частоти вмикань при роботі двигуна в мережі без відключень:

$$h_{дон} = 3600 \cdot \frac{\Delta P_{ном} \beta_0 t_0}{(\Delta A_n + \Delta A_z) t_u}. \quad (5)$$

При відключеннях зростає число пусків і гальмувань двигуна, внаслідок чого зростають відповідні втрати у перехідних режимах, що призводить до перегрівання двигуна і виходу його з ладу.

При кількості відключень n з тривалістю t_e за цикл t_u рівняння теплового балансу (4) запишеться у вигляді:

$$n(\Delta A_n + \Delta A_z) = \Delta P_{ном} \beta_0 (t_0 + t_e). \quad (6)$$

Тоді вираз для допустимої частоти вмикань запишеться у вигляді:

$$h'_{дон} = 3600 \cdot \frac{\Delta P_{ном} \beta_0 (t_0 + t_e)}{n \cdot (\Delta A_n + \Delta A_z) \cdot t_u}. \quad (7)$$

Розділивши (7) на (5), отримаємо:

$$h'_{don} = h_{don} \frac{(t_0 + t_g)}{n \cdot t_0}. \quad (8)$$

Якщо тривалість вимикання невелика $t_g < t_0$, то (8) запишеться у вигляді:

$$h'_{don} = \frac{h_{don}}{n}. \quad (9)$$

Таким чином, допустима частота вмикань електродвигуна зменшується пропорційно кількості відключень.

Наведені вирази показують, що відключення електроенергії сприяють зростанню втрат енергії в перехідних процесах пропорційно кількості відключень:

$$\Delta A = n(\Delta A_n + \Delta A_z). \quad (10)$$

Висновки

Часті перерви в електропостачанні спричиняють зростання втрат енергії, що призводить до перегрівання електродвигуна і виходу його з ладу. При цьому допустима частота вмикань електродвигуна зменшується пропорційно кількості відключень.

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 / [Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко та ін.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: Ліра-К, 2009. – 504 с.
3. Електропривод і автоматизація / [О.Ю. Синявський, П.І. Савченко, В.В. Савченко та ін.]; за ред. О.Ю. Синявського. – К.: Аграр Медіа Груп, 2013. – 586 с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода / Ключев В.И. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 560 с.

Проведено исследование влияния перерывов в электроснабжении на потери энергии и тепловой режим работы электродвигателя. Установлены зависимости потерь энергии и допустимой частоты включений электродвигателя от числа отключений.

Електропривод, перерыв в электроснабженні, кількість відключень, втрати енергії, частота включень електродвигателя.

The research of the influence of interruptions in electricity supply to energy loss and thermal conditions of the motor was conducted. The dependences of the energy loss and the permissible switching frequency of the motor on the number of trips are identified.

The electric drive, the actuator break in the power supply, the number of outages, loss of energy, switching frequency of the motor.

МОДЕЛЮВАННЯ ФАКТОРІВ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОСЛИНИ В СИСТЕМІ РОСЛИНА – ҐРУНТ – ПОВІТРЯ

І.М. Болбот, кандидат технічних наук

Проаналізовано вплив факторів навколишнього середовища на життєзабезпечення рослин у системі рослина – ґрунт – повітря. Проведено моделювання основних факторів життєзабезпечення рослини, що суттєво впливають на її ріст і врожайність рослини.

Моделювання, коефіцієнт життєзабезпечення рослини, світлозабезпечення, вологозабезпечення, теплозабезпечення, забезпечення поживними речовинами, газозабезпечення.

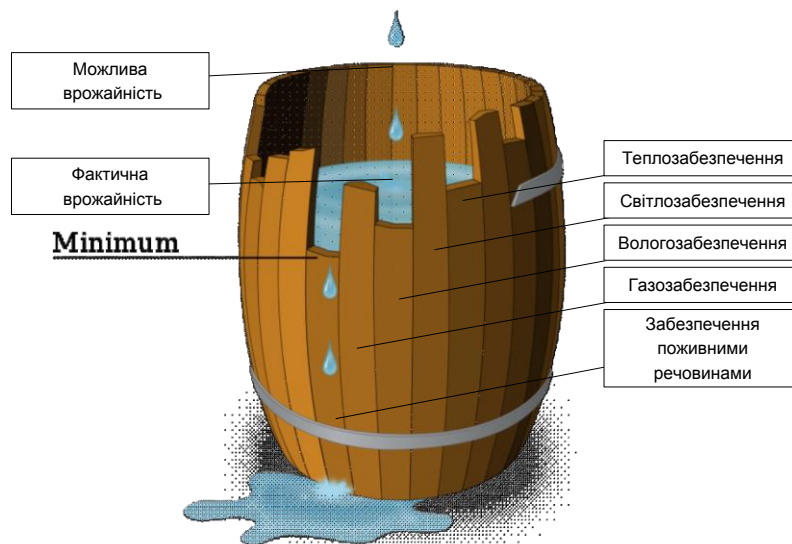
Розглянемо загальну модель, яка відображає залежність врожаю сільськогосподарської культури від процесів тепломасопереносу, що протікають в об'єкті закритого ґрунту. Мова йде про отримання оптимального врожаю певної культури завдяки найсприятливішому поєднанню складного комплексу різних властивостей і стану зовнішнього середовища, ґрунту і повітря, що оточує рослину. Модель повинна бути призначена для якісного і кількісного опису росту і розвитку рослини, що знаходиться в найтіснішій взаємодії з динамікою параметрів навколишнього середовища в теплиці.

Мета досліджень – на основі комбінованої фізико-статистичної схеми оцінки та аналізу явищ, що протікають у системі рослина – ґрунт - повітря, проведення моделювання факторів, що впливають на життєзабезпечення рослини.

Матеріали та методика досліджень. Аналіз літературних джерел [1, 3, 4] свідчить про те, що всю кількість факторів, що впливають на рослину можна звести до світлозабезпечення (m), вологозабезпечення (n), теплозабезпечення (p), забезпечення поживними речовинами (r), газозабезпечення (s). Всі ці фактори 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, засвоюється рослиною в оптимальних кількостях. Для рослини однаково погані і дуже малі, і дуже великі порції води, поживних елементів, тепла і т. д. Враховуємо, що кожен із цих факторів є досить складним і багатокomпонентним, а одночасне їх поєднання призводить до дуже складної системи, що зумовлює формування врожаю в цілому. Для того, щоб розібратися в цій системі, слід визначити, якими важливими і характерними параметрами для рослини і навколишнього середовища, можна оцінювати кожен із цих факторів, скільки повинно бути таких параметрів і скільки з них необхідно обов'язково прийняти в розрахунок.

Кожен із перерахованих факторів являє собою дріб, у знаменнику якого значиться все надходження до теплиці означеного виду фактора, а в чисельнику - та частина його, яка за вирахуванням всіх витрат, тобто незасвоєна частина фактора, залишається в системі, використовується нею та йде на формування режимів тепла, вологи, світла, поживних речовин та вуглекислоти, тобто режимів зовнішнього середовища, що визначають характер і стан сільськогосподарської культури на кожній стадії її розвитку [5, 6]. Структура всіх факторів така, що вони змінюються в межах від нуля до одиниці і зменшення одного з факторів спричинює зменшення врожайності в цілому, за принципом дії закону мінімуму.

Закон мінімуму свідчить про те, що всі фактори врожайності однаково потрібні рослинам і не можуть замінити один одного [7] (рисунок). За відсутності або нестачі одного з них різко знижується врожайність. Тому необхідно забезпечити рослини усіма без винятку умовами для росту і врожайності, враховуючи також їх взаємодію. Тільки створенням для рослин оптимальних умов можна забезпечити зростання врожайності сільськогосподарських культур.



Модель закону мінімуму життєзабезпечення рослин

Для оцінки того, скільки кожний зв'язок системи рослина-грунт-повітря отримує вологи, тепла, вуглекислого газу тощо, введемо і дослідимо баланси – теплові, радіаційні, водні, вуглекислотні, сольові. Однак поняття балансу часто застосовується неоднозначно [2]. Вивчають баланс радіаційний, тепловий, водний на поверхні однієї з двох складових (грунт або рослина) трискладової системи. У той час, говорячи про водний або сольовий баланси шару ґрунту, коли кожен із цих балансів занадто складний і складається з ряду компонентів, що ускладнює аналіз факторів врожайності. Тому запропоновано використовувати поняття балансу, але в формі, яка дозволила б одним параметром характеризувати найважливішу сторону обмінних процесів і притому віднести його до всієї системи в цілому. Таким параметром може стати акумулятивна частина всіх факторів, тобто частина, що утилізована системою рослина-грунт-

повітря. У цьому розумінні такий параметр являє собою відношення тієї частини чинників, яка використовується системою, до всієї величини чинників, які до неї надходять. Це відношення назовемо коефіцієнтом життєзабезпечення рослини в системі рослина – ґрунт – повітря

Результати досліджень. Розглянемо по черзі кожен із коефіцієнтів.

Світлозабезпечення – неодмінна умова існування зелених рослин. Під його впливом відбувається процес фотосинтезу, в ході якого рослини з вуглекислого газу, води і мінеральних речовин ґрунту синтезують первинні органічні речовини, виділяючи в атмосферу кисень. Сонячне світло створює освітленість, яка характеризується сумарною дією прямої, розсіяної і відбитої радіації. Освітленість пропорційна інтенсивності сонячної радіації. Світлозабезпечення m може бути записано як:

$$m = \frac{R^{(n)}}{R}, \quad (1)$$

де $R^{(n)}$ – частина радіації, що досягає поверхні ґрунту за наявності рослинного шару; R – вся радіація, що може досягти поверхні ґрунту.

З усього впливу сумарної радіації, що потрапляє на поверхню ґрунту, частина її в кількості $R^{(n)}$ досягає поверхні ґрунту за наявності рослинного шару. Таким чином, на частку рослин та міжрослинного шару повітря, висотою від верхівок рослин H до поверхні ґрунту, надходить $R^{(H)} = R - R^{(n)}$ або частина її від величини R , що дорівнює m . Значення величини $R^{(n)}$, що утилізується ґрунтом, змінюється в межах $m=0..1$. Якщо $m = 0$, то рослини настільки розвинені, що своєю суцільною масою не пропускають жодної частини променистої енергії, яка дійшла б до поверхні ґрунту. І навпаки, при $m = 1$ через рідку і малорозвинену рослинність вся величина R досягає ґрунту.

Запишемо величину m інакше:

$$m = \frac{R^{(n)}}{R^{(H)} + R^{(n)}}. \quad (2)$$

Оскільки весь радіаційний баланс R складається з частини радіації, що досягає поверхні ґрунту, і залишку, то $R^{(H)}$ формується на висоті крон рослин H [3]. Введемо інший коефіцієнт $m_1 = 1 - m$, який, навпаки, показує своїм зростанням від 0 до 1 збільшення густини рослинності від повної розрідженості до повної загущеності рослин, отримаємо:

$$m_1 = \frac{R^{(H)}}{R}. \quad (3)$$

Запишемо кожен елемент R (як $R^{(n)}$, так і $R^{(H)}$) у розгорнутому вигляді:

$$R^{(n)} = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} + c_p \rho k(x) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} + L \rho k(x) \left. \frac{\partial q}{\partial x} \right|_{x=0}; \quad (4)$$

$$R_{\text{net}} = -c_p \rho k(x) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=H-0} + c_p \rho k(x) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=H+0} - L \rho k(x) \frac{\partial q}{\partial x} \Big|_{x=H-0} + L \rho k(x) \frac{\partial q}{\partial x} \Big|_{x=H+0} + R^{(n)}, \quad (5)$$

де T – температура системи ґрунт–повітря вздовж координати x , додатні значення якої направлені в сторону повітря $x > 0$, а від’ємні в сторону ґрунту $x < 0$, $^{\circ}\text{C}$; q – абсолютна вологість повітря, $\text{г}/\text{м}^3$; $\frac{\partial T}{\partial x}$ і $\frac{\partial q}{\partial x}$ – вертикальні градієнти температури і вологості повітря; H – висота рослин, м ; λ – коефіцієнт теплопровідності ґрунту; $k(x)$ – коефіцієнт турбулентності; c_p – теплоємність повітря, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$; ρ – щільність повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Рівняння (4) є рівнянням рівня радіації на поверхні ґрунту $X = 0$, друге являє собою рівняння теплового балансу на висоті крон рослин $X = H$. Рівняння (5) відображає той факт, що значення рівня радіації на рівні H являє собою алгебраїчну суму стрибків потоків тепла турбулентності і випаровування. Рослина як би обумовлює виникнення розриву в величинах потоків турбулентного тепла і вологи, викликаного випаровуванням. Ефект від цього розриву, як показує досвід, буде максимальним на верхньому рівні крон рослин.

Другий фактор, – це *вологозабезпечення*, являє собою дріб, знаменник якого становить весь приплив вологи до рослини, що складається з поливу O , вертикального фільтраційного потоку $F \uparrow$ (знизу вгору) і початкового запасу вологи в ґрунті W . Чисельник цього дробу – це сума параметрів: всієї вологи, яка, проходячи через систему, витрачається на сумарне випаровування U ; горизонтального скидання C і вертикальної фільтрації $F \uparrow$ (зверху вниз). Таким чином:

$$n = \frac{U + C + F \downarrow}{W + O + F \uparrow}, \quad (6)$$

Загальноприйнято як коефіцієнт вологозабезпечення вважати:

$$\beta = \frac{U}{U_0}, \quad (7)$$

де U – фактичне випаровування від рослини, $\text{кг}/\text{м}^2 \text{ с}$; U_0 – максимально можливе випаровування в умовах максимального надходження вологи з ґрунту в рослину, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Встановлено, що величина LU_0 (величина, виражена в теплових одиницях) з урахуванням теплового потоку в ґрунті, дорівнює:

$$\beta = \frac{U}{(R - B)}, \quad (8)$$

де B – тепловий потік в ґрунті, $\text{Вт}/\text{м}^2$; L – прихована теплота пароутворення води, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Критерій n знаходиться набагато простіше, тому що для його визначення може бути застосований будь-який із багатьох надійних способів вимірювання сумарного випаровування, заснований або на градієнтному

принципі, або на використанні рівняння теплового балансу. Поєднуючи обидва ці підходи, для величини сумарного випаровування запишемо вираз:

$$U = \frac{R - B \Delta q}{\Delta q + 0,48 \Delta T} \quad (9)$$

де Δq і ΔT – різниці вологості та температури повітря.

При цьому коефіцієнт вологозабезпечення β дорівнює:

$$\beta = \frac{\Delta q}{\Delta q + 0,48 \Delta T} \quad (10)$$

для умов, коли випаровування LU_o (в теплових одиницях) можна вважати рівній різниці $R - B$.

Визначимо *теплозабезпечення* рослин:

$$p = \frac{\alpha}{\gamma} = \frac{Q_c + Q_o + Q_{co} - (LU + P + Q_{ам} + Q_{від})}{Q_c + Q_o + Q_{co}}, \quad (11)$$

де γ – весь приплив тепла до системи рослина-грунт-повітря, $кВт$, який складається з сумарної короткохвильової радіації Q_c і довгохвильового випромінювання атмосфери Q_o , надходження тепла від системи опалення Q_{co} ; α – все тепло, що поглинається ґрунтом та рослиною, і проміжним шаром повітря, що заповнює проміжки між рослинами, $кВт$, який складається з LU – тепла, що витрачено на сумарне випаровування від рослини, P – турбулентного потоку тепла від поверхні, за яку прийнято рівень крон рослин, $Q_{вип}$ і $Q_{від}$ – радіаційних потоків, обумовлених випромінюванням і віддзеркаленням тієї ж поверхні.

Розглянемо детальніше критерій p , для цього введемо поняття: теплоаккумуляція в шарі проростання рослин, що являє собою величину $(c_p \Delta T)_p$, де c_p – теплоємність-повітряного шару між рослинами, $Дж/кг \cdot ^\circ C$; ΔT – зміна температури за період спостережень, $^\circ C$; $(\Delta T)_p$ – теплоаккумуляція самих рослин, тому що c_p^p – теплоємність рослинної маси, $Дж/кг \cdot ^\circ C$; а ΔT у цій комбінації $(\Delta T)_p$ являє собою зміну температури рослин (середня температура листя різного ярусу, стебла; $\left. \frac{\lambda \Delta T}{\Delta x} \right|_{x=a}$ – потік тепла в ґрунті, $Вт/м^2$, починаючи з глибини $x=a$; λ – коефіцієнт теплопровідності ґрунту в шарі $(a-\infty)$. Шар ґрунту глибиною $(0-a)$, в якому мають місце добові коливання температури і встановлюються помітні вертикальні перепади, назовемо активним шаром ґрунту. Крім того, нехай $(\Delta T)_n$ означає зміну вмісту теплоти в верхньому шарі кореня $(0-a)$, що містить ґрунт і коріння рослин.

Таким чином, чисельник критерію p містить суму $(c_p \Delta T)_p + (\Delta T)_p + \left. \frac{\lambda \Delta T}{\Delta x} \right|_{x=a} + (\Delta T)_n$, що являє собою при відніманні з усього надходження тепла $Q_c + Q_o + Q_{co}$ величину енергії, що акумулюється системою (рослина-грунт-повітря). Знаменник складається з надходження тепла до системи від різних джерел – сумарної коротко- і довгохвильової $Q_c + Q_o$

радіації, що надходить із атмосфери та системи опалення Q_{co} до верхнього рівня рослин. Отже,

$$p = \frac{\left(\epsilon_p \Delta T_p + \epsilon_s \Delta T_s + \frac{\lambda \Delta T}{\Delta x} \right)_{x=a} + (c_n \Delta T)_n}{Q_c^{(H)} + Q_d^{(H)} + Q_{co}} \quad (12)$$

Наступний фактор врожайності рослини *забезпечення поживними речовинами*:

$$r = \frac{N + P + K + C_a}{\Pi}, \quad (13)$$

де N, P, K, C_a – засвоєні корінням рослин у вагових одиницях кількості основних поживних елементів: азоту, фосфору, калію і кальцію, а Π – загальна кількість внесених добрив у всіх видах.

Звичайно, тут не враховано інші елементи, менш важливі, і це може внести деяку, але невелику похибку. Однак слід мати на увазі, що коефіцієнт r є характеристикою всієї системи рослина-грунт-повітря, а не тільки її ґрунтової ланки, оскільки через Π позначена сума всього живлення – і кореневого і позакореневого.

Коефіцієнт забезпечення поживними речовинами слід розкрити, оскільки в знаменнику цієї величини буде фігурувати сума початкового вмісту кожного елемента живлення $M_i^I - \sum M_i^I$ ($i = 1, 2, 3 \dots$) і сума всієї кількості живлення, що вноситься в ґрунт, може відрізнитися за типом ($j = 1, 2, 3 \dots$) і формі ($v = 1, 2, 3, \dots$) – $\sum M_{j,v}^{II}$. Серед типів цих елементів присутні азот, фосфор, калій, кальцій. Крім того, слід розрізняти мінеральні добрива, внесені під основний обробіток при посіві, підживленні тощо. Потім необхідно врахувати, що коріння рослин може використовувати не всю суму $\sum M_{j,v}^{II}$, а лише ту її частку, яка залишається в ґрунті після переходу частини живлення в форму, що важко засвоюється рослиною $\sum M_k^{III}$, вивітрювання іншої її частині $\sum M_g^{IV}$.

Якщо додатково взяти до уваги, що рослина може отримувати живлення через листя в кількості $\sum M_l^V$ весь приплив поживних речовин до системи, тобто знаменник величини r , являє собою величину:

$$\Pi = \sum M_i^I + \sum M_{j,v}^{II} - \sum M_k^{III} - \sum M_g^{IV} + \sum M_l^V. \quad (14)$$

Чисельник виразу r означає освоєну системою частину живлення за всіма елементами $\sum M_{i,j,v,k,g,l}$. Таким чином:

$$r = \frac{\sum M_{i,j,v,k,g,l}}{\sum M_i^I + \sum M_{j,v}^{II} - \sum M_k^{III} - \sum M_g^{IV} + \sum M_l^V}. \quad (15)$$

Останній із факторів – це *газозабезпечення* s :

$$s = \frac{q_n + q_a}{q}, \quad (16)$$

де q_n і q_a – вуглекислота, що поглинається рослиною з ґрунту та атмосфери; q – загальна існуюча величина CO_2 в теплиці.

Величина засвоєння вуглекислоти являє собою відношення суми потоку вуглекислоти S_a , що надходить до системи від атмосфери, і потоку S_n – від ґрунту до всієї кількості вуглекислоти C , що надходить до рослини на її рівні зростання – середньому рівні зеленої маси. Потоки S_a та S_n виражаються через коефіцієнти турбулентного обміну $A=\rho k(x)$ і вертикальні градієнти вмісту вуглекислоти так: з боку атмосфери $\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=H-0}$, з боку ґру-

нту $\rho K \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=H+0}$ тому:

$$s = \frac{\rho K \left[\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=H+0} + \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=H-0} \right]}{C}. \quad (17)$$

Важливо зазначити, що всі величини, що входять до коефіцієнтів m , β , p , r , s , можуть бути виміряні існуючими технічними засобами автоматики. Ніяких допоміжних невідомих емпіричних індексів, констант, параметрів не потрібно для знаходження п'яти критеріїв забезпеченості факторів врожаю.

Розглядаючи поняття врожай Y , необхідно зважати і на принцип лімітуючих факторів, оскільки він полегшує реалізацію фізичного або комбінованого методу дослідження вирощування рослини. Виходячи з конкретних обставин, що впливають на врожайність, способу вирощування, виду рослини, погодно-кліматичного впливу, необхідно провести оцінку співвідношення значимості головних і другорядних факторів врожайності.

Висновки

Встановлено, що до основних факторів, які суттєво впливають на ріст і врожайність рослин належать: світлозабезпечення, вологозабезпечення, теплозабезпечення, забезпечення поживними речовинами та газо-забезпечення. Отримано математичні моделі основних факторів навколишнього середовища рослин у вигляді коефіцієнтів їх життєзабезпечення в системі рослина – ґрунт – повітря.

Список літератури

1. Брызгалов В.А. Овощеводство защищенного грунта / Брызгалов В.А., Советкина В.Е, Савинова Н.И.; под ред. В.А. Брызгалова. – М.: Колос, 1995. – 325 с.
2. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве / Драганов Б.Х., Кузнецов В.А., Рудобашта С.П. – М.: АПИ, 1986. – 463 с.
3. Куртнер Д.А. Климатические факторы и тепловой режим в открытом и защищенном грунте / Д.А. Куртнер, И.Б. Усков. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 235 с.
4. Лихацький В.І. Овочівництво / Лихацький В.І., Бургарт Ю.Е., Васянович В.Д.; за ред. В.І. Лихацького. – К.: Урожай, 1996. – 359 с.

5. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2006. – 290 с.

6. 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.

7. Шишко Г. Г. Теплицы и тепличные хозяйства: справ. / [Шишко Г.Г., Потопов В.О., Сулима Л.Т. и др.]; под ред. Г.Г. Шишка. – К.: Урожай, 1993. – 421 с.

Проанализировано влияние факторов окружающей среды на жизнеобеспечение растений в системе растение - почва - воздух. Проведено моделирование основных факторов жизнеобеспечения растения, которые существенно влияют на его рост и урожайность.

Моделирование, коэффициент жизнеобеспечения растения, светообеспечение, влагообеспечение, теплообеспечение, обеспечение питательными веществами, газообеспечение.

The influence of environmental factors on plant life-support system in the plant - soil - air. The modeling of the main factors of life support plants that significantly influence growth and yield of plants.

Modelling, coefficient life support plants, light maintenance, providing moisture, heating supply, providing nutrients, gas-supply.

УДК 621.311.1:63

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕЗОНАНСНОЇ ОДНОПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

***В. В. Василенко, доктор технічних наук
В. М. Комаров, асистент***

Розроблено математичну модель електромагнітних процесів, що відбуваються в резонансній однопровідній системі передачі електроенергії. За результатами математичного моделювання зроблено порівняльний аналіз встановлених хвиль напруг і струмів в однопровідній системі передачі електроенергії з навантаженням від 30 до 150 %. Показано найраціональніші значення основних параметрів резонансної однопровідної системи передачі електроенергії.

Трансформатор Тесли, резонанс, коливальний контур, передача електроенергії.

Історія вивчення однопровідних резонансних систем передачі електроенергії почалася ще в кінці XIX століття, в останні роки з'явився вели-

5. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2006. – 290 с.

6. 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.

7. Шишко Г. Г. Теплицы и тепличные хозяйства: справ. / [Шишко Г.Г., Потопов В.О., Сулима Л.Т. и др.]; под ред. Г.Г. Шишка. – К.: Урожай, 1993. – 421 с.

Проанализировано влияние факторов окружающей среды на жизнеобеспечение растений в системе растение - почва - воздух. Проведено моделирование основных факторов жизнеобеспечения растения, которые существенно влияют на его рост и урожайность.

Моделирование, коэффициент жизнеобеспечения растения, светообеспечение, влагообеспечение, теплообеспечение, обеспечение питательными веществами, газообеспечение.

The influence of environmental factors on plant life-support system in the plant - soil - air. The modeling of the main factors of life support plants that significantly influence growth and yield of plants.

Modelling, coefficient life support plants, light maintenance, providing moisture, heating supply, providing nutrients, gas-supply.

УДК 621.311.1:63

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕЗОНАНСНОЇ ОДНОПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

***В. В. Василенко, доктор технічних наук
В. М. Комаров, асистент***

Розроблено математичну модель електромагнітних процесів, що відбуваються в резонансній однопровідній системі передачі електроенергії. За результатами математичного моделювання зроблено порівняльний аналіз встановлених хвиль напруг і струмів в однопровідній системі передачі електроенергії з навантаженням від 30 до 150 %. Показано найраціональніші значення основних параметрів резонансної однопровідної системи передачі електроенергії.

Трансформатор Тесли, резонанс, коливальний контур, передача електроенергії.

Історія вивчення однопровідних резонансних систем передачі електроенергії почалася ще в кінці XIX століття, в останні роки з'явився вели-

кий інтерес щодо вивчення теорії електромагнітних процесів у подібних системах. Однією з відомих однопровідних схем передачі електроенергії є схема зарядки ємнісного накопичувача енергії, запропонована С. В. Авраменком [3], а пояснення феномена однопровідної системи передачі електроенергії вперше було отримано в роботі [2]. Основна ідея принципу передачі енергії полягає в обґрунтуванні ідентичності тесловських схем заряду конденсатора схемі подвоєння Латура, теорія якої достатньо добре розроблена, що дало можливість провести ряд експериментів щодо удосконалення однопровідної схеми електропостачання.

Проте дослідження резонансних систем передачі електроенергії з двома високовольтними трансформаторами в режимах оптимального узгодження навантаження і довжини лінії проводилися недостатньо. За цією ж причиною моделювання електромагнітних процесів у резонансних однопровідних системах передачі електроенергії та розрахунок її основних параметрів є актуальною науковою задачею, розв'язку якої і присвячена стаття.

Мета досліджень – математичне моделювання електромагнітних процесів та розробка аналітичних залежностей ключових параметрів однопровідної системи передачі електроенергії з двома високочастотними резонансними трансформаторами.

Матеріали та методика досліджень. Для проведення розрахункових досліджень розглядається однопровідна система передачі електроенергії, принципова схема якої показана на рис. 1

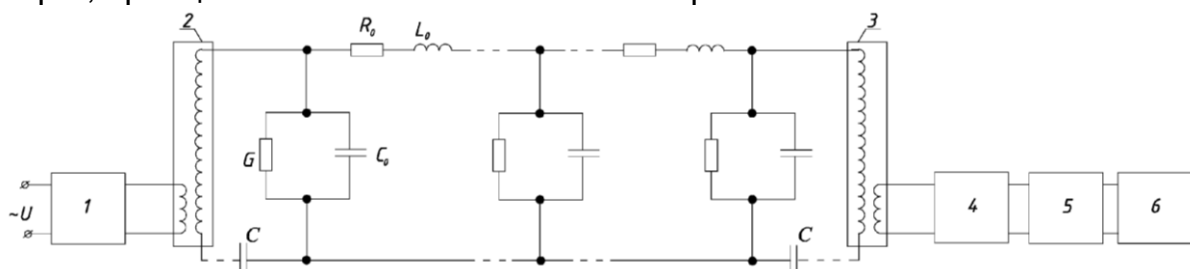


Рис. 1. Принципова схема резонансної однопровідної системи передачі електроенергії

Як видно із рис.1, однопровідна система передачі електроенергії складається із таких функціональних вузлів: транзисторного інвертора напруги (1), що живить передавальний високочастотний трансформатор (2), який з'єднаний одним проводом з приймальним високочастотним трансформатором (3), на вихід якого підключено діодно-конденсаторний випрямний блок (4), інвертор напруги випрямленого постійного струму в напругу синусоїдного змінного струму промислової частоти (5) та навантаження (6).

Електроенергія, що передається, синусоїдного змінного струму промислової частоти (220 В, 50 Гц), перетворюється транзисторним інвертором (1) і налаштовується на резонансну частоту роботи системи. Далі надходить на первинну обмотку передавального високочастотного

трансформатора (2), вторинна високовольтна обмотка якого з'єднана одним проводом з високовольтною обмоткою приймального високочастотного трансформатора. Слід зазначити, що таке з'єднання обмоток утворює розімкнений контур, в якому проходить струм зміщення, який на відміну від струму провідності не пов'язаний з втратами енергії. Необхідною умовою при налаштуванні системи є відповідність частоти вихідної напруги транзисторного інвертора з резонансною частотою (350 кГц) розімкненого індуктивно-ємнісного контуру, який включає в себе лінію передачі електроенергії по одному проводу та багатовиткові обмотки приймального (3) і передавального (2) високочастотних трансформаторів.

Для спрощення розрахунків застосуємо метод дзеркального відображення в еквіпотенціальній поверхні – земній площині. Еквівалентна схема такої системи показана на рис. 2.

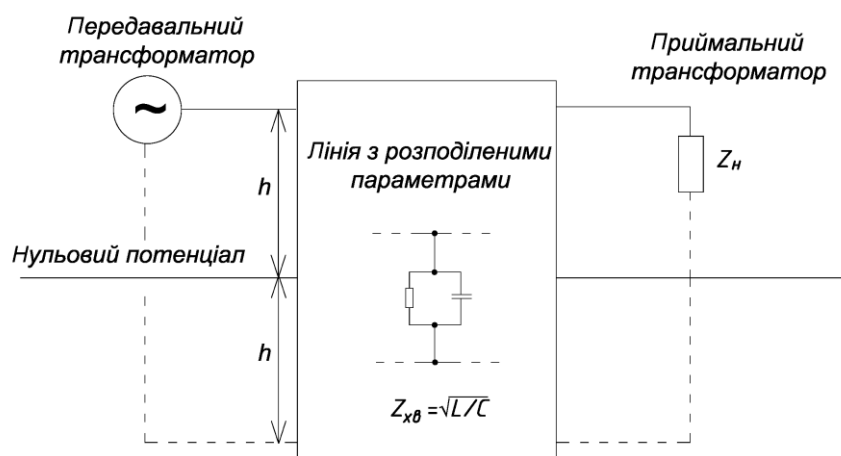


Рис. 2. Спрощена еквівалентна схема однопровідної системи передачі електроенергії

Електромагнітні процеси, що протікають в однопровідній лінії аналогічні електромагнітним процесам двохпроводної лінії з розподіленими параметрами з врахуванням параметрів навколишнього середовища (ємності та провідності між проводами). Поверхню земної площини прийнято за поверхню нульового потенціалу.

Результати досліджень. Однопровідна система передачі енергії складається з послідовно з'єднаних елементів довжиною dl опором $r_0 dl$, індуктивністю $L_0 dl$, причому в точках з'єднання двох суміжних елементів включені розгалуження з активною провідністю $G_0 dx$ та ємністю $C_0 dx$. Нехай u – напруга між проводами на початку елемента; du – зміна напруги по довжині цього елемента. Це зменшення викликано падінням напруги на опорі і падінням напруги на індуктивності:

$$-\frac{\partial u}{\partial t} dl = R_0 i dl + L_0 dl \frac{\partial i}{\partial t}, \quad (1)$$

де i – миттєве значення струму

У кінці елемента струм у лінії змінюється на $-di$, оскільки він зменшиться на величину часткового струму по довжині dl . Частковий струм

складається зі струму провідності і струму зміщення між проводом і землею поверхнею:

$$-\frac{\partial i}{\partial t} dl = G_0 u dl + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} dl. \quad (2)$$

Розділивши рівняння на dl ми отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$-\frac{\partial u}{\partial t} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \quad (3)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial t} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (4)$$

Звідси випливає, що зменшення напруги відносно одиниці довжини складається з активного падіння напруги в опорі одиниці довжини і індуктивного падіння напруги в індуктивності одиниці довжини лінії. Зменшення струму відносно одиниці довжини складається зі струму провідності на протяжності одиниці довжини та із ємнісного струму в ємності на протяжності одиниці довжини лінії.

Диференціальне рівняння напруги і струму, в якій-небудь точці лінії, розташованій від початку на відстані l , можна записати в комплексній формі:

$$-\frac{d\dot{U}}{dl} = (R_0 + j\omega L_0)\dot{I} = Z_0 \dot{I}; \quad (5)$$

$$-\frac{d\dot{I}}{dl} = (G_0 + j\omega C_0)\dot{U} = Y_0 \dot{U}, \quad (6)$$

де Z_0 , Y_0 – відповідно повний опір (вздовж проводів) та повна провідність (між проводами) одиниці довжини лінії.

Як відомо, коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (7)$$

де α – коефіцієнт згасання; $\beta = \frac{\omega}{c} = 2\pi f \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}, \frac{pad}{m}$ – коефіцієнт фази,

$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість хвилі(світла).

Пропускна здатність однопровідної системи передачі залежить від її хвильового опору, що описується виразом:

$$\dot{Z}_{xe} = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} \approx 581, \text{ Ом.} \quad (8)$$

Довжина хвилі відповідно:

$$\lambda = \beta L, \text{ м,} \quad (9)$$

де L – довжина лінії, км

Для розрахунку параметрів реальної та ідеальної ліній у відносних одиницях необхідно виразити комплексні значення напруг та струмів через активну та реактивну потужність лінії:

$$\dot{I}_1 = (P_1 - jQ_1)/U_1; \quad (10)$$

$$U_2 = U_1 ch\gamma L - \frac{P_1 - jQ_1}{U_1^2 / \dot{Z}_{x\theta}} U_1 sh\gamma L. \quad (11)$$

Погонні параметри однопровідної системи можуть бути визначені шляхом застосування методу дзеркального відображення, тоді ємність прямого каналу при відстані між проводами значно більше їх радіусів, описується таким співвідношенням:

$$C_1 = \frac{10^{-6}}{18 \ln \frac{2h}{r}} \approx 5,739 \cdot 10^{-9}, \text{ Ф/км}, \quad (12)$$

а погонна індуктивність:

$$L_1 = \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{2h}{r} \right) 10^{-4} \approx 1,936 \cdot 10^{-3}, \text{ Гн/км}. \quad (13)$$

Введемо значення базисної потужності реальної лінії:

$$S_{1БАЗ} = \frac{U_1^2}{\dot{Z}_{x\theta}}. \quad (14)$$

Відносні величини активної та реактивної потужності відповідно рівні:

$$P_{*1} = P_1 / S_{1БАЗ}; \quad (15)$$

$$Q_{*1} = Q_1 / S_{1БАЗ}. \quad (16)$$

Для деякої проміжної лінії, що знаходиться на відстані λ_x від початку лінії:

$$U_x = U_1 (\cos \lambda_x - Q_{*1} \sin \lambda_x) - jP_* \sin \lambda_x; \quad (17)$$

$$I_x = \frac{U_1}{\dot{Z}_{x\theta}} (P_* \cos \lambda_x - j(\sin \lambda_x + Q_{*1} \cos \lambda_x)), \quad (18)$$

$$S_{*x} = U_x I_x = P_* \pm jQ_{*x}. \quad (19)$$

де $P_* = P_{*1} = P_{*2}$.

Для деякої проміжної лінії, що знаходиться на відстані λ_x від кінця лінії:

$$U_x = U_2 (\cos \lambda_x - Q_{*2} \sin \lambda_x) - jP_* \sin \lambda_x, \quad (20)$$

$$I_x = \frac{U_2}{\dot{Z}_{x\theta}} (P_* \cos \lambda_x - j(\sin \lambda_x + Q_{*2} \cos \lambda_x)). \quad (21)$$

У лінії змінного струму з індуктивним опором, який впливає на передану потужність, активна потужність може бути передана при рівних за модулем напругах U_1 та U_2 . Це може бути досягнуто при фазовому зсуві δ між цими напругами. При цьому активна потужність передається від випереджуючого вектора до відстаючого:

$$P = P_{max} \sin \delta, \quad (22)$$

де $P_{max} = \frac{U_1 U_2}{\dot{Z}_{x\theta} \sin \lambda}$ – максимальна потужність, яка може бути передана лінією. У випадку навантаження лінії на еквівалентний опір, що рівний її

хвильовому опору, в лінії відсутні відбиті хвилі і по лінії без втрат передається тільки активна потужність, а реактивна потужність у всіх точках дорівнює нулю.

Еюра пропускнуї здатностї лінії за потужністю (рис.3) показала, що значення потужностї знижується по мірі збільшення довжини і при $\lambda = \pi/2$, максимальна потужність дорівнює натуральній $P_{HAT} = \frac{U^2}{Z_{xe}}$. При збільшенні довжини максимальна потужність зростає, максимум якої, при $\lambda = \pi$. Далі по мірі збільшення довжини лінії процес періодично повторюється.

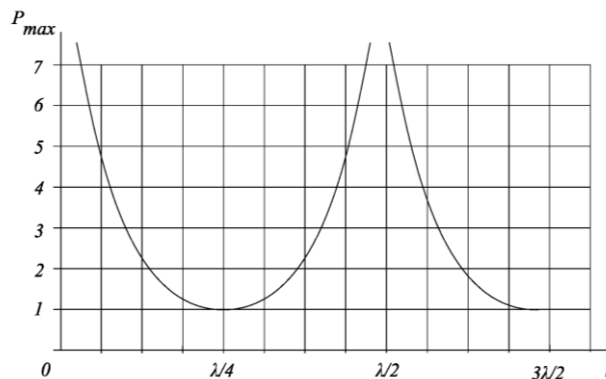


Рис. 3. Залежність максимальної пропускнуї потужностї лінії P_{max} від її довжини l

Для побудови графоаналітичних залежностей режимних параметрів лінії необхідно встановити початкові умови (параметри напруг на початку та в кінці лінії та активної потужностї на вході системи). Використавши рівняння (17), (18), (19) можна розрахувати режимні параметри для кожної точки лінії.

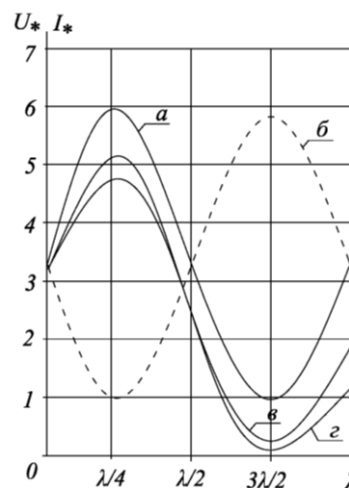


Рис. 4. Розподіл напруг і струмів в однопровідній системі

Режим узгодженого навантаження ($P=P_{нат}$) досягається при опорі навантаження в кінці лінії, рівному хвильовому опору лінії. Еюра розподілу струмів та напруг в такій лінії (рис. 4, а, б) показує, що напруги та струми в лінії на початку та в її кінці розподілені рівномірно. Режим малих на-

вантажень ($P=0,3P_{\text{нат}}$) характеризується підвищенням напруги зі збільшенням довжини лінії, а струми на кінці однопровідної системи менші від струмів на початку лінії (рис.4, в). Режим найбільших навантажень ($P=1,5P_{\text{нат}}$) характеризується значним зниженням напруги зі зростанням довжини лінії і збільшенням струму (рис. 4, г). Необхідно зазначити, що в такому режимі повинен відбуватися перетік реактивної потужності від кінця лінії до її початку ($Q_1 < Q_2$), а передавальний та приймальний резонансні трансформатори повинні забезпечити генерацію такої потужності. Без виконання цієї умови задану активну потужність при збереженні прийнятих значень напруг на кінцях лінії передати неможливо.

Висновки

Розроблена математична модель однопровідної системи передачі електроенергії дає можливість провести аналіз електромагнітних процесів і визначити найраціональніші їх величини на основі дослідження експериментального зразка. Результати моделювання показали, що отримані залежності максимального значення потужності залежно від довжини лінії досягають найбільшого значення при $\lambda = \pi$ та натурального значення при $\lambda = \pi/2$. Проведено порівняльний аналіз однопровідної системи передачі електроенергії на основі побудованих епюр напруг та струмів у різних навантажувальних режимах лінії від $0,3P_{\text{нат}}$ до $1,5P_{\text{нат}}$, який дає можливість встановити її параметри залежно від навантаження.

Розроблена математична модель та аналітичні залежності можуть бути використані при проектуванні та вдосконаленні однопровідних систем передачі електроенергії резонансного типу.

Список літератури

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов – М.: Высш. шк., 1986. – 212 с.
2. Волков И.В., Тесловские процессы в высоковольтных высокочастотных электрических цепях / И.В. Волков, И.В. Пентегов // Технічна електродинаміка: Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – К.: ІЕД НАНУ, 2000. – Ч.1. – С. 7–11.
3. Стребков Д.С. Резонансные методы передачи электрической энергии / Д.С. Стребков, А.И. Некрасов. – М: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 304 с.
4. R. Fano, L.J. Chu, and R.B. Adler, Electromagnetic Fields, Energy and Forces, Wiley, 1960. – P. 257 – 259.
5. I.V. Pentegov, Theory of Tesla processes in the charging of capacitive energy storages, Electrical Technology, N2, 1996. – P. 119–128.

Разработана математическая модель электромагнитных процессов, происходящих в резонансной однопроводной системе передачи электроэнергии. По результатам математического моделирования сделан сравнительный анализ установленных волн напряжений и токов в однопроводной системе передачи электроэнергии с нагрузкой от 30 до 150 %. Показаны наиболее рациональные значения основных параметров резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии.

Трансформатор Теслы, резонанс, колебательный контур, передача электроэнергии.

This work devoted for development electromagnetic processes' mathematical model occurring in the single-wire resonance transmission system. From results of mathematical modeling made comparative analysis, shown the waves of voltage and current in single-wire transmission system at the load from 30 to 150%. Showing most rational values of the main parameters resonance single-wire transmission system.

Tesla transformer, resonance, oscillation circuit, power transmission.

УДК 621.327.539

ВПЛИВ ЧАСТОТИ СТРУМУ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОБАРОК

О.Ю. Синявський, кандидат технічних наук

Проведено дослідження впливу частоти струму на кутову швидкість, технологічні та енергетичні характеристики дробарок. Встановлено залежності продуктивності, питомих витрат енергії та модуля помелу дробарок від частоти струму.

Дробарка, електропривод, частота струму, продуктивність, питомі витрати енергії, модуль помелу.

Зміна частоти струму впливає на кутову швидкість двигуна, яка, в свою чергу, обумовлює зміну технологічних характеристик робочих машин.

У результаті проведених проф. І.І. Ревенком експериментальних досліджень встановлено, що швидкість молотків є найсуттєвішим фактором подрібнення у молотковій дробарці [3]. Зростання кутової швидкості дробильного ротора підвищує інтенсивність подрібнення внаслідок збільшення швидкості деформування і руйнування частинок перероблюваного матеріалу, які зі зростанням деформації поведуть себе як більш крихкі тіла. Однак практичне застосування підвищення інтенсивності подрібнення за рахунок збільшення швидкості дробильного ротора обмежується пропускну здатністю встановлених решіт. Тому у дії кутової швидкості дробильного ротора на процес подрібнення можна виділити три характерні періоди [3].

1. Початковий, при якому зростання швидкості обумовлює інтенсивне підвищення подрібнювальної дії молоткового ротора, внаслідок чого знижується енергоємність процесу, а продуктивність зростає.

2. Найвигідніший для робочого процесу, який відповідає зміні швидкості у межах від мінімального значення енергоємності до моменту максимальної продуктивності дробарки. Дробарка працює з високою продук-

This work devoted for development electromagnetic processes' mathematical model occurring in the single-wire resonance transmission system. From results of mathematical modeling made comparative analysis, shown the waves of voltage and current in single-wire transmission system at the load from 30 to 150%. Showing most rational values of the main parameters resonance single-wire transmission system.

Tesla transformer, resonance, oscillation circuit, power transmission.

УДК 621.327.539

ВПЛИВ ЧАСТОТИ СТРУМУ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОБАРОК

О.Ю. Синявський, кандидат технічних наук

Проведено дослідження впливу частоти струму на кутову швидкість, технологічні та енергетичні характеристики дробарок. Встановлено залежності продуктивності, питомих витрат енергії та модуля помелу дробарок від частоти струму.

Дробарка, електропривод, частота струму, продуктивність, питомі витрати енергії, модуль помелу.

Зміна частоти струму впливає на кутову швидкість двигуна, яка, в свою чергу, обумовлює зміну технологічних характеристик робочих машин.

У результаті проведених проф. І.І. Ревенком експериментальних досліджень встановлено, що швидкість молотків є найсуттєвішим фактором подрібнення у молотковій дробарці [3]. Зростання кутової швидкості дробильного ротора підвищує інтенсивність подрібнення внаслідок збільшення швидкості деформування і руйнування частинок перероблюваного матеріалу, які зі зростанням деформації поводять себе як більш крихкі тіла. Однак практичне застосування підвищення інтенсивності подрібнення за рахунок збільшення швидкості дробильного ротора обмежується пропускну здатністю встановлених решіт. Тому у дії кутової швидкості дробильного ротора на процес подрібнення можна виділити три характерні періоди [3].

1. Початковий, при якому зростання швидкості обумовлює інтенсивне підвищення подрібнювальної дії молоткового ротора, внаслідок чого знижується енергоємність процесу, а продуктивність зростає.

2. Найвигідніший для робочого процесу, який відповідає зміні швидкості у межах від мінімального значення енергоємності до моменту максимальної продуктивності дробарки. Дробарка працює з високою продук-

тивністю, забезпечуючи добру якість подрібнення. Але вже на пропускну спроможність решіт починає впливати швидкість руху шару перероблюваного матеріалу поверхнею дробильної камери, що впливає на продуктивність і викликає зростання витрати енергії на подрібнення матеріалу.

3. Критичний, коли витрати енергії на подальше підвищення швидкості не призводять до збільшення продуктивності і достатнього зростання ступеня подрібнення, а викликають надлишкове його перетирання.

Мета досліджень – встановлення впливу частоти струму на кутову швидкість, технологічні та енергетичні характеристики дробарок.

Матеріали та методика досліджень. Лабораторні дослідження проведені на експериментальній установці, виконаній на базі універсальної молоткової дробарки КДУ-2 з переобладнанням, яке дозволило в заданих межах змінювати досліджувані параметри. Як перероблюваний матеріал використовували сіно конюшини та люпину.

При експериментальних дослідженнях частоту струму змінювали за допомогою перетворювача частоти фірми «Mitsubishi», вимірюючи при цьому частоту обертання вала двигуна тахометром. Використовуючи відомі залежності технологічних параметрів дробарки від кутової швидкості та експериментальні залежності кутової швидкості від частоти струму, визначали технологічні та енергетичні характеристики дробарки при відхиленні частоти струму від номінального значення.

Результати досліджень. При зміні частоти струму механічна характеристика двигуна на робочій ділянці має вигляд:

$$M_{\partial} = \beta_{\partial} \left(\frac{2\pi f}{p} - \omega \right), \quad (1)$$

де M_{∂} – момент двигуна, Н·м; β_{∂} – жорсткість механічної характеристики електродвигуна, Н·м·с; f – частота струму, Гц; p – число пар полюсів; ω – задана кутова швидкість, с⁻¹.

Механічна характеристика дробарок описується рівнянням [3,4]:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (2)$$

де M_c – момент статичних опорів робочої машини при заданій кутовій швидкості, Н·м; M_0 – початковий момент, Н·м; $M_{сн}$ – момент статичних опорів при номінальній кутовій швидкості, Н·м; ω і ω_n – задане і номінальне значення кутової швидкості, с⁻¹.

В усталеному режимі роботи

$$\beta_{\partial} \left(\frac{2\pi f}{p} - \omega \right) = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2. \quad (4)$$

Синхронна кутова швидкість при номінальній частоті струму f_n :

$$\omega_{0н} = \frac{2\pi f_n}{p}. \quad (5)$$

Тоді рівняння (4) запишеться у вигляді:

$$\beta_o(\omega_{0H} f_* - \omega_H \omega_*) = M_0 + (M_{сн} - M_0) \omega_*^2, \quad (6)$$

звідки отримаємо

$$f_* = \frac{M_0 + (M_{сн} - M_0) \omega_*^2 + \beta_o \omega_H \omega_*}{\beta_o \omega_{0H}}. \quad (7)$$

Якщо знехтувати початковим моментом $M_0=0$, то:

$$f_* = \frac{M_{сн} \omega_*^2 + \beta_o \omega_H \omega_*}{\beta_o \omega_{0H}}, \quad (8)$$

або

$$f_* = K_3 s_H \omega_*^2 + \frac{\omega_H}{\omega_{0H}} \omega_*, \quad (9)$$

де K_3 – коефіцієнт завантаження двигуна; s_H – номінальне ковзання двигуна.

Двигуни дробарок мають жорстку механічну характеристику, невелике номінальне ковзання і $\omega_H \approx \omega_{0H}$, тому першим доданком у виразі (9) можна знехтувати. Тоді отримаємо:

$$f_* = \omega_*. \quad (10)$$

Отже, кутова швидкість дробарок змінюється прямо пропорційно частоті струму.

Залежності питомої витрати енергії і продуктивності дробарки від частоти струму в межах 0,5 – 1,2 номінального значення показані на рис. 1, а модуля помелу від частоти струму – на рис. 2.

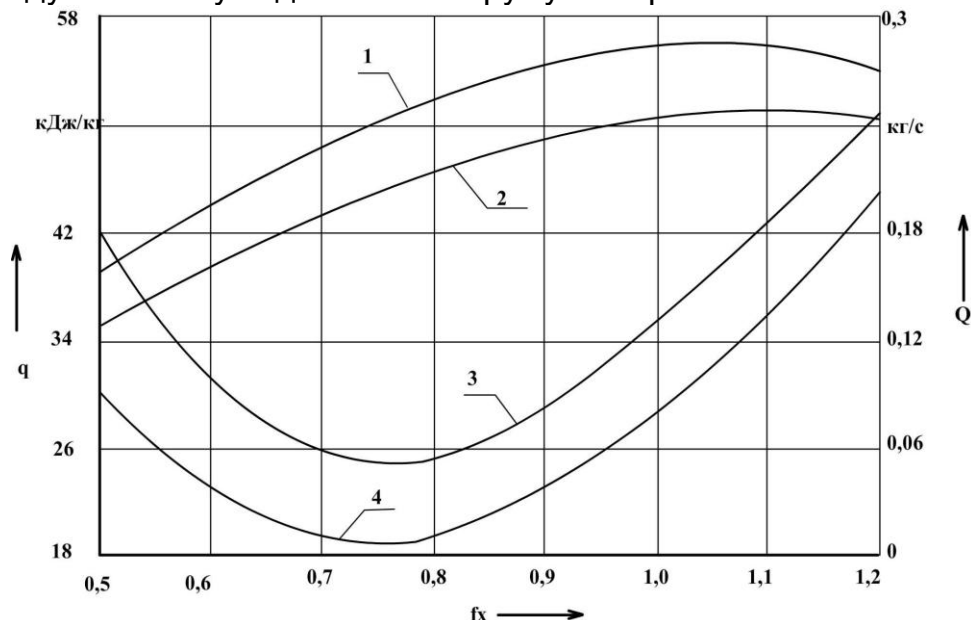


Рис.1. Залежності продуктивності дробарки КДУ-2 (1,2) та питомих витрат енергії (3,4) від частоти струму:
1,4 – люпинове сіно; 2,3 – сіно конюшини

Як впливає із наведених залежностей, підвищення частоти струму до 0,75 номінального значення викликає практично прямолінійне зростан-

ня продуктивності дробарки. При цьому питома витрата енергії і модуль помелу зменшуються. При подальшому підвищенні частоти струму в межах 0,75 – 1,0 номінального значення продуктивність дробарки нелінійно зростає, але меншими темпами, ніж у попередній період. При цьому зростає питома витрата енергії, а модуль помелу нелінійно зменшується. Підвищення частоти струму вище за номінальне значення призводить до зменшення продуктивності дробарки, зростання питомої витрати енергії і погіршення якості помелу.

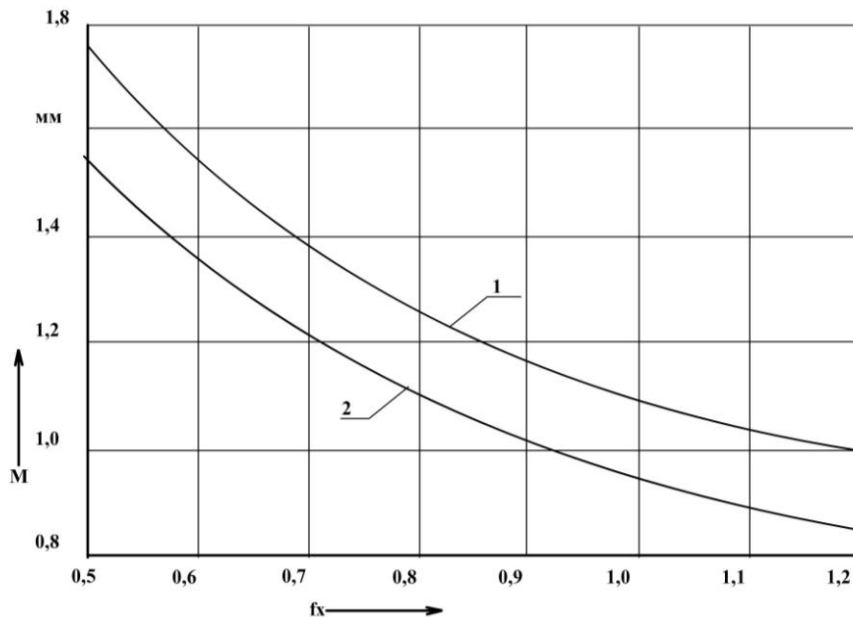


Рис.2. Залежності модуля помелу дробарки КДУ-2 від частоти струму:
1 – люпинове сіно; 2 – сіно конюшини

Висновки

На основі проведених досліджень встановлено, що при зниженні частоти струму на 2 % продуктивність дробарок знижується до 2 %. При цьому зменшуються питомі витрати енергії і зростає модуль помелу. Застосування частотно-регульованих приводів дає можливість підтримувати найвигідніший для робочого процесу режим роботи дробарки.

Список літератури

1. Електропривод / [Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко та ін.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: Ліра-К, 2009. – 504 с.
2. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній / [Є.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лавріненко та ін.]; за ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.
3. Ревенко И.И. Исследование влияния основных параметров молотковой дробилки на процесс измельчения стебельчатых материалов: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 410 «механизация сельскохозяйственного производства» / И.И. Ревенко – К., 1968. – 17 с.

Проведено исследование влияния частоты тока на угловую скорость, технологические и энергетические характеристики дробилок. Установлены зависимости производительности, удельных затрат энергии и модуля помола дробилок от частоты тока.

Дробилка, электропривод, частота тока, производительность, удельные расходы энергии, модуль помола.

The effect of frequency on the current angular speed, technological and energy characteristics of crushers are carried out. The dependencies of performance, specific energy consumption and grinding mills module on the current frequency are established.

Crusher, electric drive, frequency, capacity, specific energy consumption, grinding module.

УДК 621.313.8: 631.53.027

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА РОЗЧИННІСТЬ СОЛЕЙ

В.В. Савченко, кандидат технічних наук

Проведено дослідження зміни розчинності солей і мінеральних добрив під дією магнітного поля. Встановлено залежності ступеня електролітичної дисоціації від характеристик магнітного поля.

Магнітна індукція, швидкість хімічної реакції, розчинність, ступінь електролітичної дисоціації.

Взаємодія електролітів з водою є хімічною реакцією, яка призводить до руйнування іонних або молекулярних кристалів або молекул та утворення гідратованих іонів.

У багатьох неводних розчинах іони утворюються не в результаті електрохімічної дисоціації, а внаслідок інших хімічних реакцій, коли молекули потенційного електроліту і розчинника обмінюються протонами, іонами або електронами.

Нині експериментально встановлено, що магнітне поле впливає на кінетику хімічних реакцій. Тому, як і для будь-якої хімічної реакції внаслідок дії магнітного поля на розчин прискорюється хімічна реакція утворення іонів.

Мета досліджень – встановлення впливу характеристик магнітного поля на розчинність солей і добрив.

Матеріали та методика досліджень. При дослідженні зміни кінетики хімічних реакцій під дією магнітного поля користувалися теорією зітк-

Проведено исследование влияния частоты тока на угловую скорость, технологические и энергетические характеристики дробилок. Установлены зависимости производительности, удельных затрат энергии и модуля помола дробилок от частоты тока.

Дробилка, электропривод, частота тока, производительность, удельные расходы энергии, модуль помола.

The effect of frequency on the current angular speed, technological and energy characteristics of crushers are carried out. The dependencies of performance, specific energy consumption and grinding mills module on the current frequency are established.

Crusher, electric drive, frequency, capacity, specific energy consumption, grinding module.

УДК 621.313.8: 631.53.027

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА РОЗЧИННІСТЬ СОЛЕЙ

В.В. Савченко, кандидат технічних наук

Проведено дослідження зміни розчинності солей і мінеральних добрив під дією магнітного поля. Встановлено залежності ступеня електролітичної дисоціації від характеристик магнітного поля.

Магнітна індукція, швидкість хімічної реакції, розчинність, ступінь електролітичної дисоціації.

Взаємодія електролітів з водою є хімічною реакцією, яка призводить до руйнування іонних або молекулярних кристалів або молекул та утворення гідратованих іонів.

У багатьох неводних розчинах іони утворюються не в результаті електрохімічної дисоціації, а внаслідок інших хімічних реакцій, коли молекули потенційного електроліту і розчинника обмінюються протонами, іонами або електронами.

Нині експериментально встановлено, що магнітне поле впливає на кінетику хімічних реакцій. Тому, як і для будь-якої хімічної реакції внаслідок дії магнітного поля на розчин прискорюється хімічна реакція утворення іонів.

Мета досліджень – встановлення впливу характеристик магнітного поля на розчинність солей і добрив.

Матеріали та методика досліджень. При дослідженні зміни кінетики хімічних реакцій під дією магнітного поля користувалися теорією зітк-

нень. Дослідження впливу магнітного поля на розчинність солей виконувалася із застосуванням теорії електролітичної дисоціації.

Результати досліджень. У теорії зіткнень [3] реагуючі речовини розглядаються як сукупність сферичних часток кінцевих розмірів. До зіткнення вони не реагують одна з одною, а в момент зіткнення кінетична енергія поступального руху часток перетворюється в енергію внутрішніх видів руху.

Хімічні наслідки зіткнень залежать від кінетичної енергії відносного руху вздовж лінії центрів, яка визначається нормальною складовою швидкості v_n [2]:

$$E = \frac{\mu v_n^2}{2}, \quad (1)$$

де μ – зведена маса часток:

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, \quad (2)$$

де m_1 і m_2 – маси часток, кг.

Нормальна складова швидкості визначається як:

$$v_n = v \cos \beta. \quad (3)$$

Згідно з теорією зіткнень до хімічної реакції призводить тільки зіткнення, коли кінетична енергія відносного руху вздовж лінії центрів часток, що беруть участь у реакції, вища за критичне значення E^* .

Вважаючи розподіл за швидкостями поступального руху часток максвелівським, для числа активних зіткнень Z можна записати:

$$Z(E \geq E^*) = Z \exp(-E^* / kT), \quad (4)$$

де Z – загальне число подвійних зіткнень, яке визначається за формулою:

$$Z = Z_0 n_i n_j / \sigma_{ij}, \quad (5)$$

де Z_0 – питома кількість парних зіткнень; n_i , n_j – кількість часток i -го та j -го сорту в одиниці об'єму; σ_{ij} – фактор симетрії, $\sigma_{ij}=1$ для пар, які утворені частками i та j ; $\sigma_{ij}=2$ для пар, які утворені частками i .

Величина Z_0 характеризує ймовірність зіткнення пари часток за одиницю часу в одиниці об'єму і визначається за формулою:

$$Z_0 = \frac{4}{3} \pi kT / \mu^{1/2} (r_1 + r_2)^2, \quad (6)$$

де k – стала Больцмана, Дж/К; T – температура розчину, К.

Тоді з (4) з урахуванням (5) отримаємо:

$$Z(E \geq E^*) = \frac{n_i n_j}{\sigma_{ij}} \sqrt{\frac{8\pi kT}{\mu}} (r_1 + r_2)^2 \exp(-E^* / kT). \quad (7)$$

Ймовірність хімічного перетворення при зіткненні враховують стеричним множником p :

$$\omega = p \frac{n_i n_j}{\sigma_{ij}} \sqrt{\frac{8\pi kT}{\mu}} (r_1 + r_2)^2 \exp(-E^* / kT), \quad (8)$$

або з урахуванням (1)

$$\omega = p \frac{n_i n_j}{\sigma_{ij}} \sqrt{\frac{8\pi kT}{\mu}} (r_1 + r_2)^2 \exp(-\mu v_n^2 N_a / 2RT), \quad (9)$$

де v_{n^*} – мінімальне значення нормальної складової швидкості частки, при якому відбувається хімічна реакція, м/с; N_a – число Авогадро, молекул/моль; R – універсальна газова стала, Дж/моль·К.

При потраплянні зарядженої частки в магнітне поле на неї діє сила Лоренца [1]:

$$F = qBv \sin \alpha, \quad (10)$$

де q – заряд частки, Кл; B – магнітна індукція, Тл; v – швидкість руху частки, м/с; α – кут між напрямком поля і рухом частки, град.

Під дією сили Лоренца рух частки відбувається колом радіуса

$$r = \frac{mv}{qB}. \quad (11)$$

При цьому змінюється нормальна складова швидкості:

$$\Delta v_n = v_{n^*} - v_n, \quad (12)$$

де v_{n^*} – нормальна складова швидкості частки, при якій відбувається хімічна реакція:

$$v_{n^*} = v \cos \beta_m, \quad (13)$$

де β_m – кут між вектором швидкості і лінією, яка з'єднує центри часток, при магнітній обробці, град.

Тоді зміна нормальної складової швидкості частки становитиме:

$$\Delta v_n = v(\cos \beta_m - \cos \beta), \quad (14)$$

де β_m – кут між вектором швидкості і лінією, яка з'єднує центри часток, при магнітній обробці, град.

З урахуванням (14) при $\alpha=0$:

$$\Delta v_n = rqB(\cos \beta_m - \cos \beta) / m = KB, \quad (15)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від концентрації та виду іонів, а також кількості перемагнічувань, м/с·Тл.

Внаслідок зміни нормальної складової швидкості частки при магнітній обробці зміниться кінетична енергія відносного руху часток вздовж лінії центрів. Тому в хімічну реакцію будуть вступати частки зі швидкістю, меншою за критичне значення v^* . При цьому зростає швидкість хімічної реакції ω_m :

$$\omega_m = p n_i n_j \exp(-\mu(v_{n^*} - \Delta v_n)^2 N_a / 2RT). \quad (16)$$

або

$$\omega_m = p n_i n_j \exp(-\mu(v_{n^*} - KB)^2 N_a / 2RT). \quad (17)$$

Вираз (17) можна записати так:

$$\omega_m = \omega \exp(\mu(K^2 B^2 + 2KBv_n) N_a / 2RT). \quad (18)$$

Отже, швидкість хімічних реакцій під дією магнітного поля зростає і визначається квадратом магнітної індукції і нормальною складовою швидкості руху частки.

Процес розчинення електролітів характеризується ступенем електролітичної дисоціації, який можна подати у вигляді:

$$\alpha = \frac{n}{N} = \frac{\omega t}{C}, \quad (19)$$

де n – кількість молекул, яка розпалася на іони; N – загальне число молекул; ω – швидкість реакції електролітичної дисоціації, моль/л·с; t – час реакції, с; C – загальна концентрація розчину, моль/л.

При дії магнітного поля на розчин за рахунок зростання швидкості хімічної реакції зростає ступінь електролітичної дисоціації:

$$\alpha_m = \frac{\omega t \exp(\mu(K^2 B^2 + 2KBv_n)N_a / 2RT)}{C}, \quad (20)$$

або

$$\alpha_m = \alpha \exp(\mu(K^2 B^2 + 2KBv_n)N_a / 2RT), \quad (21)$$

де α_m і α – ступінь електролітичної дисоціації речовини після і до обробки у магнітному полі.

Як випливає із формули (21), зміна ступеня електролітичної дисоціації при магнітній обробці залежать від величини магнітної індукції та нормальної складової кутової швидкості іонів.

Дія магнітного поля на розчинність солей помітніша для розчинів слабких електролітів, бо у розчинах сильних електролітів практично всі молекули розпадаються на іони і ступінь електролітичної дисоціації близький до одиниці.

Висновки

При магнітній обробці розчинів зростає ступінь електролітичної дисоціації, що сприяє кращому розчиненню солей і амінокислот. Оскільки рослини споживають мінеральні елементи у дисоційованому стані, у вигляді іонів, то це сприяє стимуляції росту і розвитку рослин.

Список літератури

1. Классен В.И. Омагничивание водных систем / В.И. Классен. – [2-е изд.]. – М.: Химия, 1982. – 296 с.
2. Физическая химия. Теоретическое и практическое руководство / [Б.П. Никольский, Н.А. Смирнова, М.Ю. Панов и др.]; под ред. акад. Б.П.Никольского. – Л.: Химия, 1987. – 880 с.
3. Хмельницкий Р.В. Физическая и коллоидная химия / Р.В. Хмельницкий. – М.: Высш. шк., 1988. – 400 с.

Проведено исследование изменения растворимости солей и минеральных удобрений под действием магнитного поля. Установлены зависимости степени электролитической диссоциации от характеристик магнитного поля.

Магнитная индукция, скорость химической реакции, растворимость, степень электролитической диссоциации.

The investigation of changes in the solubility of salts and fertilizers under the influence of a magnetic field are carried out. The dependences of the

degree of electrolytic dissociation of the magnetic field characteristics are established.

Magnetic induction, the chemical reaction rate, solubility, degree of electrolytic dissociation.

УДК 631.15: 004.9

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ БАЛАНСИРОВАНИЯ РАЦИОНОВ КОРМЛЕНИЯ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

***А.Г. Сеньков, Е.В. Галушко, К.М. Шестаков,
кандидаты технических наук
Белорусский государственный аграрный технический
университет, г. Минск***

Предложена математическая модель и алгоритм расчета сбалансированного рациона кормления крупного рогатого скота.

Крупный рогатый скот, рацион, оптимизация, система поддержки принятия решений.

Качественное кормление молочных коров является важным условием их высокой продуктивности. Поэтому составление сбалансированного по питательности рациона – это практическая задача, с которой постоянно приходится иметь дело специалисту-зоотехнику. Традиционно суть задачи оптимизации рациона кормления заключается в нахождении рациона с минимальной стоимостью при гарантированном обеспечении потребности животного во всех питательных компонентах. Недостатком такого подхода является перекорм животного, так как предполагается, что содержание в рационе каждого питательного компонента должно быть не меньше нормы. Кроме того, большое практическое значение имеет возможность задания в качестве исходных данных структуры рациона, т.е. планируемого процентного содержания того или иного из выбранных для составления рациона кормов.

Цель исследований – разработка математической модели и алгоритма расчета сбалансированного рациона кормления крупного рогатого скота (КРС), соответствующего научно разработанным нормам потребления по всем основным питательным компонентам.

Материалы и методика исследований. Исходными данными для расчета рациона молочной коровы, в соответствии с методиками, принятыми в Республике Беларусь, являются масса животного и удой: суточный удой – для лактирующих коров либо прогнозируемый удой за лакта-

degree of electrolytic dissociation of the magnetic field characteristics are established.

Magnetic induction, the chemical reaction rate, solubility, degree of electrolytic dissociation.

УДК 631.15: 004.9

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ БАЛАНСИРОВАНИЯ РАЦИОНОВ КОРМЛЕНИЯ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

***А.Г. Сеньков, Е.В. Галушко, К.М. Шестаков,
кандидаты технических наук
Белорусский государственный аграрный технический
университет, г. Минск***

Предложена математическая модель и алгоритм расчета сбалансированного рациона кормления крупного рогатого скота.

Крупный рогатый скот, рацион, оптимизация, система поддержки принятия решений.

Качественное кормление молочных коров является важным условием их высокой продуктивности. Поэтому составление сбалансированного по питательности рациона – это практическая задача, с которой постоянно приходится иметь дело специалисту-зоотехнику. Традиционно суть задачи оптимизации рациона кормления заключается в нахождении рациона с минимальной стоимостью при гарантированном обеспечении потребности животного во всех питательных компонентах. Недостатком такого подхода является перекорм животного, так как предполагается, что содержание в рационе каждого питательного компонента должно быть не меньше нормы. Кроме того, большое практическое значение имеет возможность задания в качестве исходных данных структуры рациона, т.е. планируемого процентного содержания того или иного из выбранных для составления рациона кормов.

Цель исследований – разработка математической модели и алгоритма расчета сбалансированного рациона кормления крупного рогатого скота (КРС), соответствующего научно разработанным нормам потребления по всем основным питательным компонентам.

Материалы и методика исследований. Исходными данными для расчета рациона молочной коровы, в соответствии с методиками, принятыми в Республике Беларусь, являются масса животного и удой: суточный удой – для лактирующих коров либо прогнозируемый удой за лакта-

цию – для сухостойных коров [1]. Считается, что от значений этих двух величин, в основном, зависит норма суточного потребления коровой основных питательных компонентов (сухое вещество, обменная энергия, протеин, жир, клетчатка и т.д.). Обозначим как вектор $\vec{D} = D_1, \dots, D_M = D_j \quad j=1, \dots, M$ – требуемую норму суточного потребления коровой j -го питательного компонента, где M – количество учитываемых при оптимизации рациона питательных компонентов.

Результаты исследований. Пусть специалистом-зоотехником выбрано N из имеющихся в хозяйстве кормов. Из выбранных N кормов необходимо составить такой рацион кормления, который должен удовлетворить потребности животного в M питательных компонентах в соответствии с требуемыми нормами.

Для математической формализации описанных требований для каждого из включенных в рацион кормов введем следующие обозначения:

a_{ij} – содержание j -го питательного компонента в 1 кг i -го корма ($i = 1, \dots, N$);

c_i – стоимость 1 кг i -го корма;

x_i – искомое суточное потребление i -го корма.

Вектор $\vec{R} = \vec{R}_1, \dots, \vec{R}_M = R_j \quad j=1, \dots, M$ – это вектор содержания в рассчитываемом рационе каждого из M питательных компонентов, причем j -й элемент вектора R_j определяется следующим выражением:

$$R_j = \sum_{i=1}^N a_{ij} \cdot x_i. \quad (1)$$

Тогда относительное отклонение содержания в рационе j -го питательного компонента от суточной нормы его потребления – это разность, деленная на значение суточной нормы, и в векторной форме может быть выражена так:

$$\vec{\delta} = \left\{ \frac{D_j - R_j}{D_j} \right\}_{j=1, \dots, M}. \quad (2)$$

Таким образом, вектор $\vec{\delta}$ – это вектор отклонений питательности рациона от нормы по отдельным питательным компонентам. Чем точнее питательность рациона будет соответствовать требуемым нормам, тем меньше должно быть значение нормы вектора $\vec{\delta}$. Поэтому в качестве целевой функции предлагается использовать норму вектора $\vec{\delta}$, определяемую как взвешенная сумма модулей его элементов:

$$Z_{\vec{x}} = \|\vec{B} \cdot \vec{\delta}^T\| = \sum_{j=1}^M \left| B_j \cdot \frac{\left(\sum_{i=1}^N a_{ij} \cdot x_i - D_j \right)}{D_j} \right|, \quad (3)$$

где $\vec{B} = B_j \quad j=1, \dots, M$, $B_j \geq 0$, $\sum_{j=1}^M B_j = 1$ – вектор нормировочных коэффициентов, значения которых пропорциональны степени важности отклонений

рациона от нормы по тому или иному питательному компоненту. Значения коэффициентов B_j определяются методом экспертных оценок.

Таким образом, математическая формулировка задачи оптимизации рациона имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{\min i} \leq x_i \leq X_{\max i}, \quad i=1, \dots, N; \\ \langle p_i = P_i \rangle, \quad i=1, \dots, N; \\ \sum_{i=1}^N a_{iCB} \cdot x_i \geq D_{CB}, \\ \sum_{i=1}^N a_{iOЭ} \cdot x_i \geq D_{OЭ}, \end{array} \right. \quad (4)$$

$$Z \vec{x} \rightarrow \min,$$

где $X_{\min i}$, $X_{\max i}$ – начальные ограничения на минимальное и максимальное значение массы i -го корма в суточном рационе, задаваемые при необходимости пользователем;

$$p_i = \frac{a_{iCB} \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N a_{iCB} \cdot x_i} \quad \text{либо} \quad p_i = \frac{a_{iOЭ} \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N a_{iOЭ} \cdot x_i} \quad - \text{процент от сухого вещества}$$

либо обменной энергии всего рациона, обеспечиваемый i -м кормом (структура рациона);

P_i – задаваемые при необходимости пользователем начальные ограничения на допустимые значения p_i , определяющие желаемую процентную структуру рациона по сухому веществу либо по обменной энергии, фигурные скобки “ $\langle \rangle$ ” означают, что данное ограничение не обязательно присутствует в системе;

индексы «CB», «OЭ» – обозначают, соответственно, «сухое вещество» и «обменная энергия».

Задача (4) представляет собой задачу линейного программирования и может быть решена симплекс-методом с искусственным базисом [3]. Подробное описание алгоритма решения задачи (4) с использованием симплекс-метода с искусственным базисом приведено авторами настоящей статьи в работе [2].

Результатом решения задачи (4) будет рацион $\vec{x}$, оптимизированный по питательности, для которого сумма отклонений от требуемых норм питательности по основным учитываемым питательным компонентам будет минимальна. Т.е., рацион $\vec{x}$ будет максимально приближен по содержанию основных питательных компонентов к требуемым нормам.

Предложенный подход к расчету оптимального рациона был использован в Белорусском государственном аграрном техническом университете (г. Минск) при создании компьютерной программы поддержки принятия решений при расчете рационов кормления молочных коров. Ее практическая апробация в хозяйствах Минской области Республики Беларусь показала, что при оптимизации рациона одновременно по 8 показателям (сухое вещество, обменная энергия, сырой протеин, сырая клет-

чатка, сырой жир, кальций, фосфор, соль поваренная) практически всегда достигается весьма точное совпадение питательности рассчитанного рациона с требуемыми нормами по двум-трем основным показателям (сухое вещество, обменная энергия, протеин), отклонения от нормы по которым не превышают 1 %. В то же время в некоторых случаях отклонения от нормы по остальным показателям могут быть достаточно большими, по кальцию, фосфору, клетчатке, например, отклонения от нормы могут достигать 10 – 15 %. Поэтому в качестве альтернативы описанной методики расчета рациона в данной работе предлагается также подход, суть которого состоит в поиске рациона, для которого отклонения питательности от нормы по всем учитываемым показателям лежали бы в некоторых допустимых границах. Математическая формулировка такого подхода имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{\min i} \leq x_i \leq X_{\max i}, \quad i = 1, \dots, N; \\ \langle p_i = P_i \rangle, \quad i = 1, \dots, N; \\ 0 \leq \frac{\sum_{i=1}^N a_{iCB} \cdot x_i - D_{CB}}{D_{CB}} \leq L_{CB}, \\ 0 \leq \frac{\sum_{i=1}^N a_{iOЭ} \cdot x_i - D_{OЭ}}{D_{OЭ}} \leq L_{OЭ}, \\ \left| \frac{\sum_{i=1}^N a_{ij} \cdot x_i - D_j}{D_j} \right| \leq L_j, \quad j = 1, \dots, M, \quad j \neq 'CB', \quad j \neq 'OЭ', \\ Z \vec{x} \rightarrow \min, \end{array} \right. \quad (5)$$

где L_j – допустимые границы (в процентах) отклонения питательности рациона от нормы по j -му учитываемому параметру.

Значения L_j , подобно значениям коэффициентов B_j в (3), отражают степень важности совпадения питательности рациона с нормой по j -му компоненту: чем меньше L_j , тем точнее должно быть совпадение с нормой. Значения L_j следует определять методами экспертного оценивания. В данной работе предложено значения L_j определять обратно пропорционально значениям коэффициентов B_j :

$$\frac{L_j}{L_{CB}} = \frac{B_{CB}}{B_j}, \quad j = 1, \dots, M, \quad j \neq 'CB'. \quad (6)$$

Алгоритм расчета рациона следующий.

Шаг 1. Задается минимально допустимое значение границы отклонения питательности рациона от нормы по сухому веществу: 0,5 %.

Шаг 2. По формуле (6) определяются соответствующие значения границ отклонения питательности рациона от нормы по остальным учитываемым питательным компонентам L_j , $j = 1, \dots, M$, $j \neq 'CB'$.

Шаг 3. С помощью алгоритма симплекс-метода с искусственным базисом выполняется поиск решения оптимизационной задачи (5).

Шаг 4. Если решение не найдено, то значение границы отклонения по сухому веществу L_{CB} необходимо увеличить на 0.5 % и перейти к шагу 2.

Поиск повторяется до тех пор, пока не будет найдено решение оптимизационной задачи (5).

Выводы

Основным достоинством предложенной математической модели расчета рациона кормления коров является то, что специалист-зоотехник при составлении рациона имеет возможность, при необходимости, планировать его желаемую процентную структуру, исходя из зоотехнических требований, имеющихся в хозяйстве запасов данного корма и прочих условий.

Также следует отметить и то, что путем введения весовых коэффициентов B_j и L_j учитывается степень важности совпадения с нормой содержания питательных компонентов в рационе, т.е. балансирование рациона будет выполняться с максимальной точностью по основным питательным компонентам (обменная энергия, сухое вещество и т.д.), в то время как по остальным компонентам возможны отклонения от нормы в некоторых допустимых пределах.

Список литературы

1. Нормы кормления крупного рогатого скота: справ. / [Н.А.Попков, И.И. Горячев, В.К. Гурин и др.]. – Жодино: РУП «Научно–практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству», 2011. – 260 с.
2. Сеньков А.Г. Решение задачи расчета сбалансированного рациона кормления КРС методом линейного программирования / А.Г. Сеньков. // Вестник ВНИИМЖ. – 2013. – №3(11).– С. 144–147.
3. Bunday B.D. (1984): Basic Linear Programming. London WC1B 3DQ, Edward Arnold (Publishers) Ltd, 41 Bedford Square.

Запропоновано математичну модель та алгоритм розрахунку збалансованого раціону годівлі великої рогатої худоби.

Велика рогата худоба, раціон, оптимізація, система підтримки прийняття рішень.

This paper looks at mathematical model and algorithm of computation a well balanced ration for cattle feeding.

Cattle, feed ration, optimization, decision support system.

НОВАЯ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ БОРЬБЫ С ЗАРАСТАНИЕМ ТРАСС ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В ЛЕСНЫХ ЗАПОВЕДНЫХ РАЙОНАХ

*Л.А. Чернышова, аспирантка**

В.А. Чернышов, кандидат технических наук

С. А. Родимцев, доктор технических наук

Орловский государственный аграрный университет

Представлен критический анализ использования известных способов расчистки трасс линий электропередачи применительно к лесным заповедным районам. Предложен альтернативный, более дешевый и энергоэффективный способ расчистки, не причиняющий вреда окружающей среде.

Надежность электроснабжения, расчистка охранной зоны, трасса линий электропередачи, лесной заповедный район, биотехническое мероприятие, топинамбур.

Надежность электроснабжения удаленных сельскохозяйственных районов зависит от качества обслуживания электрических сетей. Одной из проблем, которую ежегодно приходится решать энергетикам при эксплуатации линий электропередачи (ЛЭП), является своевременная расчистка ее охранной зоны от поднимающихся молодых деревьев и кустарников.

Заращение трассы значительно осложняет контроль за ее состоянием, делает труднодоступными аварийные участки, что способствует преждевременному выходу из строя элементов ЛЭП. Эта проблема дает о себе знать через 5–10 лет, в зависимости от преобладающих пород деревьев. Объемы площадей, которые приходится ежегодно освобождать от деревьев и кустарников в местах прохождения трасс ЛЭП, и расходы, связанные с этой трудоемкой процедурой, значительны [1].

Цель исследований – обоснование комплексной целесообразности высаживания топинамбура под проводами ЛЭП, проходящих по лесным заповедным районам и привлечение внимания специалистов лесного и сельского хозяйства, а также специалистов электросетевых предприятий к принципиально новой, энергоэффективной, биотехнической технологии.

Материалы и методика исследований. Существующие методы расчистки трассы ЛЭП – ручной и механизированный, как правило, энергоемки и малоэффективны. Более того, широко применяемые «бульдозерные» технологии (рис.1) экологически вредны, приводят к потере верхнего гумусового слоя почв и формированию крупных раскорчеванных валов. После такого удаления надземных побегов происходит более интенсивное восстановление фитомассы от сохранивших жизнеспособность

* Научный руководитель – доктор технических наук, профессор С.А. Родимцев.

корневых систем. Данное обстоятельство обусловлено тем, что корни кустарника и молодых деревьев дают более густые побеги, которые к тому же быстро растут, что вызывает необходимость повторно обрабатывать территорию [6].

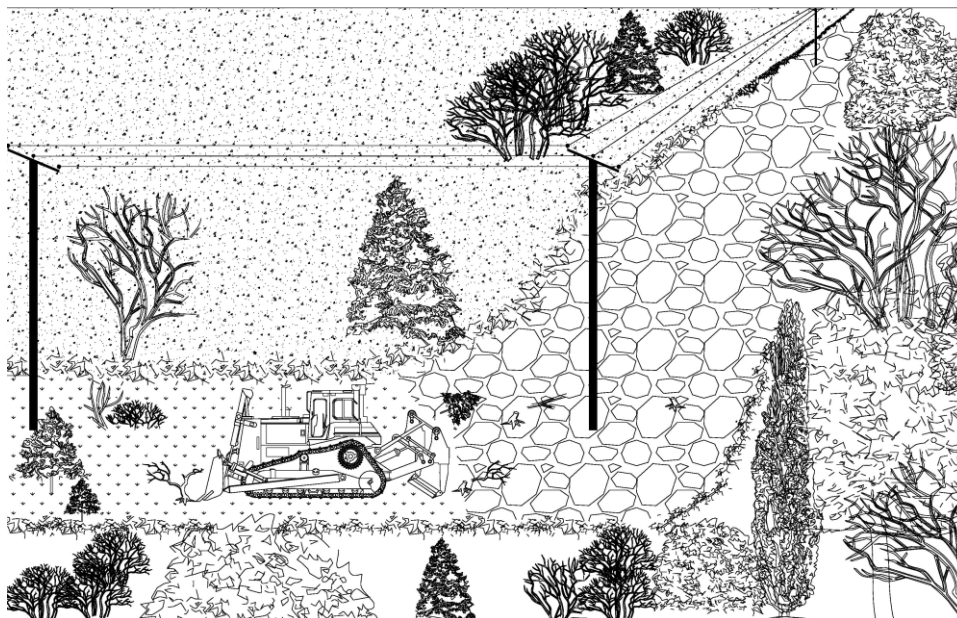


Рис.1. Удаление наземных побегов в охранной зоне ЛЭП механизированным способом

Химический способ борьбы с ростом деревьев и кустарников является более эффективным и менее затратным мероприятием, однако и он может причинить существенный вред окружающей среде.

Несмотря на то, что современные гербициды считаются экологически безопасными, высокая скорость вымывания данных препаратов из почв может оказывать крайне неблагоприятное действие (попадать в водоемы, накапливаться в растительных кормах и т.п.). Экологические последствия обработок гербицидами для многих видов диких животных, в том числе занесенных в Красную книгу, могут быть весьма значительными и необратимыми.

При прохождении трасс ЛЭП по лесным заповедным зонам, паркам с ценными лесными породами, где неприемлемы механизированный и химический способы очистки с владельцем лесного фонда должны быть согласованы габариты, сроки и графики обрезки деревьев, обеспечивающие безаварийную работу ЛЭП в данных районах. В случае невозможности согласования работ по расчистке, а также значительных затратах на компенсацию ущерба, в инвестиционных программах электроснабжающих организаций должны быть внесены корректировки, с учётом расходов на замену неизолированных проводов дорогостоящими изолированными или самонесущими.

В последние годы, в связи с финансовыми трудностями и намерением экономить, энергетики чаще стали задумываться над необходимос-

тью смены ориентиров и признания предпочтительными более экономичных способов хозяйствования. Таким образом, разработка новых, более дешевых и эффективных способов борьбы с зарастанием трассы ЛЭП является актуальной задачей, особенно для труднодоступных лесных районов [2].

Решением этой задачи может являться принципиально новый, энергоэффективный способ борьбы с зарастанием трассы ЛЭП, позволяющий содержать ее охранную зону в нормальном техническом состоянии без использования экологически опасных физических и химических методов.

Согласно предлагаемому способу [4] на предварительно подготовленную охранную зону ЛЭП, очищенную от деревьев и кустарников высаживают топинамбур, который в последствии очень быстро разрастается по всей площади охранной зоны ЛЭП и вытесняет не только бурьян, но и молодые побеги деревьев и кустарников.

Необычная живая изгородь под ЛЭП, проходящих вдоль автотрасс, подарит участникам движения не только хорошее настроение, но и предотвратит накопление токсичных веществ сельскохозяйственными растениями, т.к. цветущий, двухметровый забор будет надежно задерживать проникновение выхлопных газов на сельскохозяйственные угодья.

При этом, плотная посадка топинамбура в охранной зоне ЛЭП затруднит передвижение людей под проводами, что в значительной степени повысит безопасность электрических сетей, только для этого необходимо выращивать кормовые сорта топинамбура, не имеющие для человека пищевой ценности. При этом ревизию элементов ЛЭП можно проводить в холодный и переходный периоды года, когда отсутствует наземная часть растений.

Также стоит отметить и тот факт, что посадки топинамбура в охранной зоне ЛЭП, несомненно привлекут к себе диких кабанов, популяции которых на сегодняшний день в России настолько выросли, что в некоторых регионах они приносят существенный вред сельскохозяйственным угодьям. Так как кормовой базой кабанов являются корневища, клубни, корни и луковичи различных растений, то охранная зона ЛЭП, будет являться излюбленным местом их кормления. Отыскивая корнеклубнеплоды топинамбура, кабаны своей «роющей» деятельностью, будут уничтожать семена многих деревьев, а также уже проросшие растения, тем самым, препятствуя естественному процессу разрастания различных пород деревьев в охранной зоне ЛЭП. При этом посадки топинамбура будут также являться надежным щитом, защищающим посевы от разорения [3]. Таким образом, сельскохозяйственные производители прежде всего будут заинтересованы в надежном электроснабжении, а также в сохранности посевов, следовательно, от них можно ожидать поддержку в реализации данного мероприятия.

Авторская зарисовка (рис. 2) наглядно иллюстрирует предлагаемый способ противодействия зарастанию охранной зоны ЛЭП.

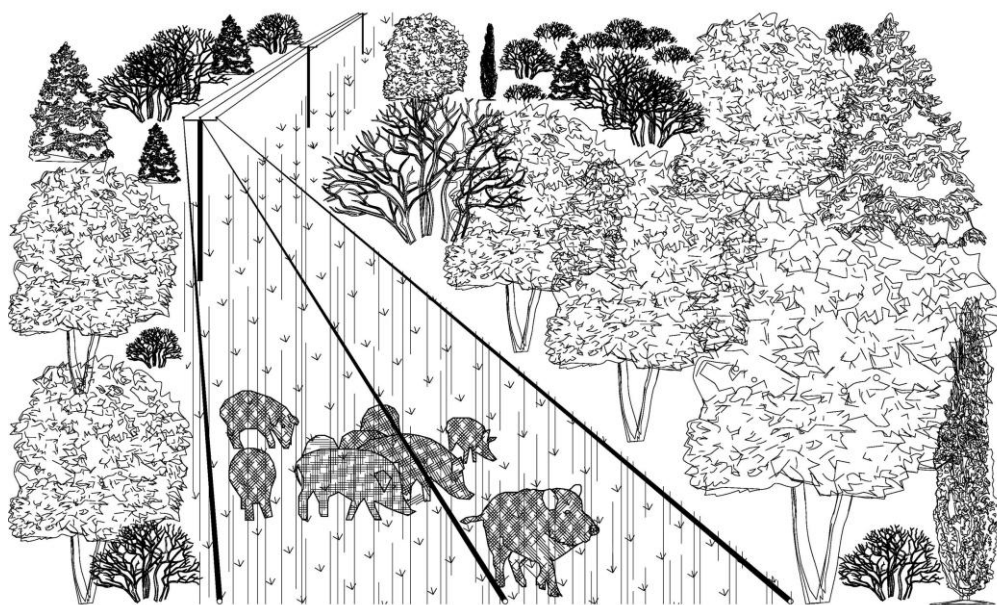


Рис.2. Охранная зона ЛЭП, защищенная посадками топинамбура

Результаты исследований. Учитывая вышеизложенное, выращивание топинамбура в охранной зоне ЛЭП является энергоэффективным биотехническим мероприятием.

Необходимо также отметить, что предлагаемое новое, энергоэффективное мероприятие основывается не только на теоретических аспектах, но и имеет практическую доказательную базу.

Весной 2012 г. была произведена экспериментальная посадка топинамбура на участке охранной зоне ЛЭП, напряжением 10 кВ, проходящей по территории ФГУ Национальный парк «Орловское полесье».

Между заинтересованными сторонами – представителями ФГБОУ ВПО Орел ГАУ, ФГУ Национальный парк «Орловское полесье», Хотынецкого РЭС филиала «Орелэнерго» ОАО «МРСК Центра, заключен договор о творческом сотрудничестве и взаимодействии, составлена и подписана программа экспериментальных исследований.

Показатели способов расчистки трасс воздушных ЛЭП [5]

№ п/п	Показатель	Единица измерения	Способы расчистки трасс ЛЭП			
			Ручной	Механизированный	Химический	Биологический
1	Удельные затраты	руб/га	16500	18000	13000	12000
2	Периодичность проведения	лет	4 – 5	5 – 6	6 – 8	8 – 10
3	Повреждение покрова почвы	-	Нет	Есть	Нет	Нет
4	Накопление вредных веществ в почве	-	Нет	Нет	Есть	Нет
5	Вытеснение и гибель фауны	-	Есть	Есть	Есть	Нет

По единогласному мнению специалистов предварительные результаты экспериментальных исследований полностью подтверждают комплексную целесообразность данного мероприятия.

Предварительный анализ различных способов предотвращения за-растания трасс ЛЭП показал, что самым дешевым и энергоэффективным является тот способ расчистки, который не наносит вреда окружающей среде (таблица).

Выводы

Остается надеяться, что совместное приложение творческих усилий всех заинтересованных сторон не пропадет даром, а позволит экспериментально апробировать и внедрить в массовую практику принципиально новую энергоэффективную биотехническую технологию, направленную на повышение экологичности, безопасности и надежности воздушной электропередачи на территориях лесных заповедных районов.

Список литературы

1. Ерошенко Г.П. Эксплуатация энергооборудования с/х предприятий: учебник для вузов. / Ерошенко Г.П., Медведько Ю.А., Таранов М.А. – Ростов н/Дону: ООО «Терра»; НПК «Гефест», 2001. – 592 с.
2. Комплексная областная программа «Энергосберегающие технологии в сфере агропромышленного комплекса, природопользования и экологии на территории Орловской области». – Орел, 2011.
3. Кочнев Н.К. Топинамбур - биоэнергетическая культура XXI века / Н.К. Кочнев, М.В. Калиничева. – М.: Типография "Арес", 2002. – 76 с.
4. Пат. № 2441365 Российская Федерация, МПК A01G 23/00. Способ предотвращения повреждений на воздушных линиях электропередачи, проходящих по лесным труднодоступным просекам / Гавриченко А.И., Чернышов В.А., Печагин Е.А., Чернышова Л.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Тамбов. гос. техн. ун-т. – № 2010131306/13; заявл. 26.07.2010; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4.
5. Чернышов В.А. Проблема зарастания трассы ЛЭП в удаленных сельскохозяйственных районах и альтернативный вариант ее разрешения / В.А. Чернышов, Л.А. Чернышова // Журнал «Менеджер-эколог». – 2011. – №5–6. – С.55–59.
6. Чехов В.И. Экологические аспекты передачи электроэнергии / В.И. Чехов; под ред. Г. К. Зарудского. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 44 с.

Подано критичний аналіз використання відомих способів розчищення трас ліній електропередачі стосовно до лісових заповідних районів. Запропоновано альтернативний, більш дешевий і енергоефективний спосіб розчищення, що не завдає шкоди навколишньому середовищу.

Надійність електропостачання, розчищення охоронної зони, траса ліній електропередачі, лісовий заповідний район, біотехнічний захід, топинамбур.

A critical analysis of the use of known techniques clearing routes of transmission lines, in relation to forest reservation areas. Proposed

alternativny, cheaper and more energy-efficient way of clearing is not harmful to the environment.

Reliability of power supply, clearing the buffer zone, the route of transmission lines, forest reserve areas, biotech activities, artichoke.

УДК 621.316.1

АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК ВЕЛИЧИН СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ «ELPLEK»

***О.В. Гай, кандидат технічних наук
С.О. Діденко, студент***

Проведено обґрунтування доцільності застосування автоматизованого розрахунку аварійних режимів електричних мереж середнього класу напруги. Наведено приклади та поставлено завдання подальших досліджень.

Система електропостачання, автоматизований програмний продукт, струми короткого замикання.

У рамках науково-практичної діяльності фахівців у сфері електроенергетики доволі часто виникає необхідність у розрахунку величин струмів короткого замикання в електричних мережах різного рівня напруги. Розглянемо один із варіантів автоматизованого розрахунку в програмному забезпеченні «Elplek». Автором програми є Ilkka Leikkonen (Kokkola, Finland). Зі слів автора: "Elplek is the result of some discussions that I once had with a big company. Their idea was to have a tool, or a program that shows what happens when there is a fault in a network. The program should answer the question: if there is a fault in a given position in the network, which relay will react first, which next, and so on?" [1]. ("Elplek – це результат однієї моєї дискусії з дуже великою компанією. Ідея була в тому, щоб мати такий інструмент або програму, яка б показувала, що трапляється при аваріях в енергосистемі. Програма повинна була відповісти на питання: якщо відбудеться пошкодження на ділянці мережі, яке реле спрацює першим, яке другим і т.д.").

Мета досліджень – аналіз доцільності використання автоматизованих методів розрахунку для визначення аварійних параметрів режиму в системах електропостачання та формування завдань подальших досліджень.

Матеріали та методика досліджень. «Elplek» – це одна з кращих безкоштовних програм, призначених для розрахунків всіх видів струмів короткого замикання (трифазний, міжлінійний, замикання на землю, між-

alternativny, cheaper and more energy-efficient way of clearing is not harmful to the environment.

Reliability of power supply, clearing the buffer zone, the route of transmission lines, forest reserve areas, biotech activities, artichoke.

УДК 621.316.1

АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК ВЕЛИЧИН СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ «ELPLEK»

***О.В. Гай, кандидат технічних наук
С.О. Діденко, студент***

Проведено обґрунтування доцільності застосування автоматизованого розрахунку аварійних режимів електричних мереж середнього класу напруги. Наведено приклади та поставлено завдання подальших досліджень.

Система електропостачання, автоматизований програмний продукт, струми короткого замикання.

У рамках науково-практичної діяльності фахівців у сфері електроенергетики доволі часто виникає необхідність у розрахунку величин струмів короткого замикання в електричних мережах різного рівня напруги. Розглянемо один із варіантів автоматизованого розрахунку в програмному забезпеченні «Elplek». Автором програми є Ilkka Leikkonen (Kokkola, Finland). Зі слів автора: "Elplek is the result of some discussions that I once had with a big company. Their idea was to have a tool, or a program that shows what happens when there is a fault in a network. The program should answer the question: if there is a fault in a given position in the network, which relay will react first, which next, and so on?" [1]. ("Elplek – це результат однієї моєї дискусії з дуже великою компанією. Ідея була в тому, щоб мати такий інструмент або програму, яка б показувала, що трапляється при аваріях в енергосистемі. Програма повинна була відповісти на питання: якщо відбудеться пошкодження на ділянці мережі, яке реле спрацює першим, яке другим і т.д.").

Мета досліджень – аналіз доцільності використання автоматизованих методів розрахунку для визначення аварійних параметрів режиму в системах електропостачання та формування завдань подальших досліджень.

Матеріали та методика досліджень. «Elplek» – це одна з кращих безкоштовних програм, призначених для розрахунків всіх видів струмів короткого замикання (трифазний, міжлінійний, замикання на землю, між-

лінійне замикання на землю), для знаходження залишкових напруг у мережі, а також для симуляції дій пристроїв релейного захисту.

Крім того, Elplek можна використовувати для розрахунків поточкорозподілу потужності в мережі. Розрахунки для знаходження струмів коротких замикань можна виконувати, кількома методами, а саме – методом накладання (метод суперпозиції) або згідно зі стандартом IEC-60909.

Але при розрахунку відповідно до стандарту IEC-60909 у програмі є деяке незначне обмеження. Це обмеження пов'язано з тим, що струм усталеного стану I_k'' , як функція часу не розраховується, а отже, для проведення такого розрахунку потрібно використовувати метод суперпозиції.

Доаварійний стан для методу суперпозиції може бути отримано з розрахунку витрат навантаження або з прямого рішення в мережі. Якщо початковий стан розраховується за допомогою методу суперпозиції, то струми розраховуються як функція часу після виникнення пошкодження в мережі. Крім того, відображається активація релейного захисту.

До переваг програмного забезпечення належать:

- простота у використанні і зрозумілий інтерфейс;
- отримання результатів щодо початкових струмів короткого замикання методом суперпозиції або відповідно до стандарту IEC-60909;
- розрахунок струмів короткого замикання як функції часу;
- відображення активації реле максимального струмового захисту та дистанційних реле (у стандарті IEC-60909 відсутнє);
- є можливості використання різних захисних реле: з незалежною витримкою часу, зі зворотним часом, PQG реле максимального струмового захисту та інших реле;
- присутність кілька десятків MC3 кривих реле, запрограмованих у IEC, ANSI (ABB, Westinghouse, English Electric і т.д.);
- відображення фазових струмів та напруг.

Зазначимо, що Elplek має широкий діапазон застосовування. У цій статті програма буде використовуватися для знаходження трифазних струмів короткого замикання та ударних струмів. Для більш наочного ознайомлення з можливостями програми «Elplek» розглянемо задачу [2], яка містить всі необхідні дані та розв'язки.

Умовою завдання є обчислення значення струмів при трифазному КЗ для точки K_1 , а потім – у точці K_2 СЕП, електрична схема та параметри якої зображено на рис. 1, а, схема заміщення – на рис.1, б. Електроустановки напругою 0,4 кВ живляться через струмовід типу ШМА73.

Результати розрахунку такі.

Початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ у точці K_1 :

$$I_{\Pi, t=0, K1} = 0,4 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 15,6) = 14,8 \text{ кА.}$$

Ударний струм КЗ у точці K_1 :

$$i_{y, K1} = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi, t=0, K1} [1 + \exp(-0,04 / T_{a, K1})] = \sqrt{2} \cdot 14,8 [1 + \exp(-0,04 / 0,0033)] = 21 \text{ кА,}$$

де $T_{a, K1} = 11,2 / (\sqrt{3} \cdot 314 \cdot 10,8) = 0,0033 \text{ с.}$

Початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ у точці K_2 :

$$I_{\Pi, t=0, K_2} = 0,4 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 23,53) = 9,83 \text{ кА.}$$

Ударний струм КЗ у точці K_2 :

$$i_{y, K_2} = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi, t=0, K_2} [1 + \exp(-0,04 / T_{a, K_2})] = \sqrt{2} \cdot 9,83 [1 + \exp(-0,04 / 0,0023)] = 14,1 \text{ кА,}$$

де $T_{a, K_2} = 11,2 / (\sqrt{3} \cdot 314 \cdot 18,98) = 0,0023 \text{ с.}$

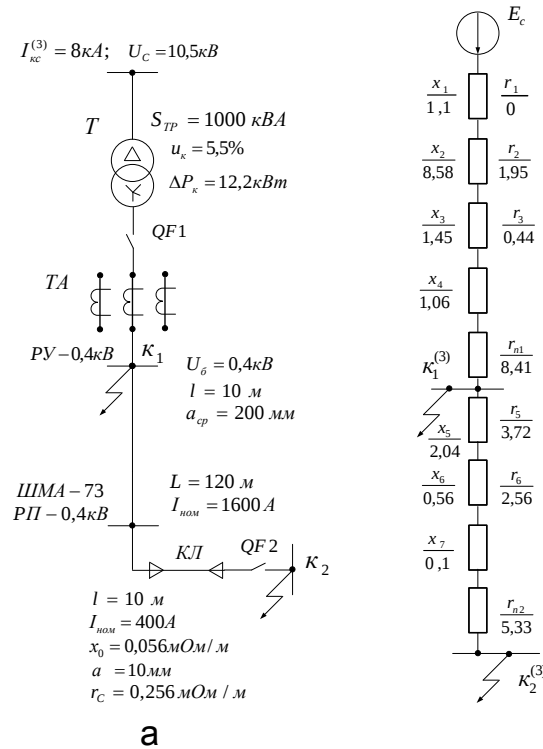


Рис. 1. Електрична схема (а) та схема заміщення (б) тестової системи електропостачання

Після того, коли ми розглянули задачу, перейдемо до самого програмного забезпечення і вирішимо цю ж задачу, але перед тим як приступити до її вирішення ознайомимось з методикою побудови схем у програмі.

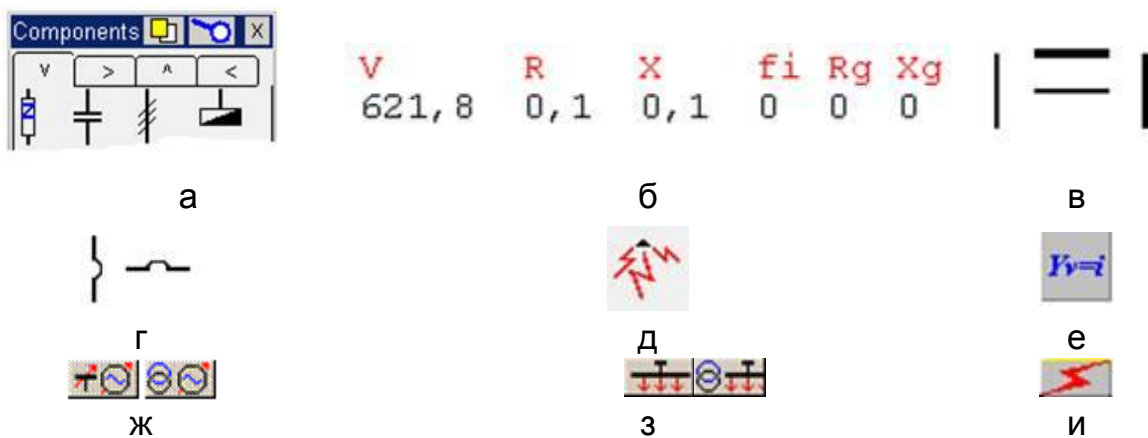


Рис. 2. Зовнішній вигляд графічних зображень елементів меню в ПЗ «Eirplek»

Для формування розрахункової схеми необхідно вибрати необхідний елемент з меню компонентів (Components), рис. 2, а. Компоненти в схемі обертати неможливо. Замість цього потрібно вибрати компоненти з необхідною орієнтацією однієї з чотирьох сторінок в меню компонентів. На кожній вкладці меню компонентів є також компоненти, які мають тільки одну орієнтацію (ті ж самі компоненти на кожній сторінці).

Значення параметрів. При перенесенні елемента з меню компонентів на схему і при одночасному натисканні на елемент на однолінійній схемі на екрані, значення параметрів (рис.2, б) компонента з'являються або в маленькому вікні, або в рядку внизу екрана разом з рядком, що містить символи параметрів. Значення в рядку можуть бути додані також як і в рядку текстового редактора. Параметри після зміни зберігаються після натискання на кнопку ОК або на будь-яку точку екрана програми, на інший компонент, одну з кнопок розрахунку на панелі інструментів. Вікно, що містить таблицю параметрів, може бути приховано за допомогою "View | Parameter windows..." в рядку меню. Параметри деяких компонентів (лінія електропередачі, двообмотковий трансформатор тощо) можуть бути показані як в таблиці так і на лінії внизу екрана.

Одиниці. Ця програма використовує основні одиниці для всіх параметрів (В, А, Вт, Ом). Єдиний виняток стосується лінії електропередачі, яка вимірюється в кілометрах. Однак, для більшості компонентів параметри можуть також бути введені, використовуючи примітку для одиниць.

З'єднувальні проводи та шини. Провід (тонкі лінії) і шини (товсті лінії) є тільки сполучними лініями (рис.2,в). У них немає ніяких параметрів. Вони додаються в схему так само як інші компоненти, при переміщенні і відпуску. Вони можуть бути збільшені або зменшені. Необхідно помістити курсор до одного з кінців шини або проводу так, щоб курсор перетворився на подвійну стрілку та натиснути ліву кнопку миші, і перемістити мишу, щоб збільшити або скоротити провід або шину до необхідної довжини.

Перетин проводів. Перетинальні проводи можуть пересікати проводи без з'єднання (рис.2,г). Це – лише лінії, які не мають жодних параметрів. Вони не можуть бути збільшені (вкорочені). Інші елементи можуть бути приєднані тільки до кінця проводу (якщо пересікаються два дроти або шини, то вони – з'єднані).

Коротке замикання. Точка короткого замикання може бути встановлена на потрібне місце шляхом переміщення елемента «коротке замикання» (fault) (рис.2,д). В елемента «коротке замикання» (fault) немає ніяких параметрів.

Розрахунки. Є окрема кнопка для кожного типу розрахунку. Після розрахунку результати не показуються, якщо не використовується індикатор, описаний в пункті "Індикатор результатів" (нижче) (рис.2,е).

Розрахунок електричної мережі. Проводиться, розглядаючи генератори та фідери як джерела живлення з деяким внутрішнім опором. Параметр напруги генератора або фідера – внутрішня міжфазна напруга (рис.2,ж). Необхідно встановити напругу (без відведення chagners або з перемикачами відгалужень).

Розрахунок потоку розподілу (рис.2,з) (без відгалужень, або з відгалуженнями). Параметр напруги генераторів і фідерів – міжфазна вихідна напруга. Фаза – як параметр генераторів не використовується в розрахунку потоку розподілу.

Розрахунок трифазного короткого замикання (рис.2,и). Струми і напруги всієї електричної мережі розраховані. Коротке замикання знахо-

диться там, де встановлений компонент короткого замикання:



Цей компонент може бути переміщений і встановлений як звичайний елемент.  – Розрахунок міжфазного короткого замикання.  – Розрахунок замикання на землю.  – Розрахунок міжфазного короткого замикання через землю. Коли одна з семи кнопок розрахунків, зазначених вище, натиснута, зображення кнопки з'являється поруч із заголовком електричної мережі, як нагадування про останню операцію. Зображення може бути приховане, після натискання на маленький «х» в лівому верхньому кутку зображення.

Розв'язання задачі за допомогою програми

Ознайомившись та навчившись будувати схеми, переходимо до пошуку струмів короткого замикання для схеми, зображеної на рис. 1, а) з використанням програмного забезпечення «Elplek».

Для введення деяких даних у ПЗ «Elplek» необхідно попередньо здійснити перетворення:

$x_{gs} = 0,75797 \text{ Ом}$ – індуктивний опір системи – для елемента GS;

$r_{gs} = 0 \text{ Ом}$ – активний опір системи – для елемента GS;

$x_T = \left(\frac{10500^2}{400^2} \right) \times 8,58 = 5,91216 \text{ Ом}$ – індуктивний опір трансформатора –

для елемента T1;

$r_T = \left(\frac{10500^2}{400^2} \right) \times 11,95 = 1,34367 \text{ Ом}$ – активний опір трансформатора – для

елемента T1;

$x_{gf1} = 0,06 \text{ мОм} = 0,00006 \text{ Ом}$ – індуктивний опір струмової котушки розчіплювача автомата GF1 – для елемента Z3;

$r = 8,41 \text{ мОм} = 0,00841 \text{ Ом}$ – перехідний опір K3 у точці K₁ – для елемента Z5;

$x_{gf2} = 0,1 \text{ мОм} = 0,0006 \text{ Ом}$ – індуктивний опір струмової котушки розчіплювача автомата GF2 – для елемента Z4;

$x_0 = 0,145 \text{ Ом}$ – індуктивний опір ділянки шин від введів трансформатора – для елемента TL1;

$r_0 = 0,044 \text{ Ом}$ – активний опір ділянки шин від введів трансформатора – для елемента TL1;

$x_0 = 0,017 \text{ Ом}$ – індуктивний опір ділянки шин від введів трансформатора – для елемента TL2;

$r_0 = 0,031 \text{ Ом}$ – активний опір ділянки шин від введів трансформатора – для елемента TL2;

$x_0 = 0,056$ Ом – індуктивний опір ділянки шин від введів трансформатора – для елемента TL3;

а

б

Номинальна напруга генератора

Опір генератора

Parameter	Value	Parameter	Value
Vpp	10,5e3	Z1	0,75797
III(°)	0	III1(°)	90,0
R1	0	Z0	0
X1	0,75797	III0(°)	0
R0	0	Z2	0
X0	0	III2(°)	0
R2	0	Zg	0
X2	0	IIIg(°)	0
Rg	0		
Xg	0		

в

Номинальна напруга первинної і вторинної обмоток двообмоткового трансформатора

Опори двообмоткового трансформатора

Потужність двообмоткового трансформатора

Parameter	Value	Parameter	Value
V1	10,5e3	A, V, Ohm	
V2	400		
X	5,91216		
R	1,34367		
te1	0		
X0	0		
R0	0		
Xg2	1e6		
Rg2	1e6		
tap	0		
+30?	0		
VAn	1e6		
Vs1	0		
Vs2	0		
tmin	1		
tmax	1		
parall	1		

г

Довжина лінії ЛЕП

Опори проводів ЛЕП

Parameter	Value	Parameter	Value
Length	0,01	Z1	0,15153
R1	0,044	III1(°)	73,12
X1	0,145	Z0	0,0
R0	0	III0(°)	0,0
X0	0		
B	1E-6	k0 = 0.3333 > 180°	

д

Parameter	Value	Parameter	Value
Length	0,12	Z1	0,03536
R1	0,031	III1(°)	28,74
X1	0,017	Z0	0,0
R0	0	III0(°)	0,0
X0	0		
B	1E-6	k0 = 0.3333 > 180°	

е

Parameter	Value	Parameter	Value
Length	0,01	Z1	0,26205
R1	0,256	III1(°)	12,339
X1	0,056	Z0	0,0
R0	0	III0(°)	0,0
X0	0		
B	1E-6	k0 = 0.3333 > -180°	

Рис. 3. Розрахунок за допомогою ПЗ «Elplek»:

а – схема заміщення; б – введення даних до елемента генератора GS; в – введення даних до елемента трансформатора T1; г – введення

даних до елемента трифазної ЛЕП TL1; д – введення даних до елемента трифазної ЛЕП TL2; е – введення даних до елемента трифазної ЛЕП TL3
 $r_0 = 0,256 \text{ Ом}$ – активний опір ділянки шин від вводів трансформатора – для елемента TL3;

$r = 1,89 \text{ мОм} = 0,00189 \text{ Ом}$ – перехідний опір КЗ у точці K_2 – для елемента Z4;

Розглянута вище схема при її створенні в ПЗ «Elplek» має такий вигляд (рис.3).

Для отримання розрахунку необхідно натиснути на елемент КЗ на схемі заміщення, потім кнопку трифазного короткого замикання в рядку меню зверху.

Результати розрахунку струмів КЗ в ПЗ «Elplek» наведемо на рис. 4.

```
(X|xx)  a
V"      0
fii"    0,0
I"      14,78
fii"    -75,8
Voltages as..
..sqrt(3)*(III-n)
```

а

```
(X|xx)  a
I"      15443,0
Ip"     23510,3
Ib"     15443,0
```

б

```
(X|xx)  a
V"      0
fii"    0,0
I"      9,787
fii"    -66,1
Voltages as..
..sqrt(3)*(III-n)
```

в

```
(X|xx)  a
I"      10249,3
Ip"     15033,2
Ib"     10249,3
```

г

Рис. 4. Розрахунок КЗ для K_1 та K_2 у ПЗ «Elplek»:

а, в – розрахунок за методом накладання; б, г – розрахунок струмів КЗ за стандартом IEC

Результати досліджень. У розглянутій в літературному джерелі [2] задачі значення періодичної складової струму КЗ від всіх джерел становить у точці K_1 та K_2 відповідно:

$$I_{K3} = 14,8 \text{ кА}, I_{K3} = 9,83 \text{ кА},$$

а ударний струм КЗ становить:

$$i_y = 21 \text{ кА}, i_y = 14,1 \text{ кА}.$$

За методом накладання в програмному забезпеченні отримано:
 для точки K_1 та K_2 :

$$I_{K3} = 14,78 \text{ кА}; I_{K3} = 9,787 \text{ кА}.$$

Ударний струм у точці короткого замикання за допомогою розв'язку методом накладання не розраховується, тому для його знаходження скористаємося стандартом IEC.

За стандартом IEC ударний струм КЗ становить в ПЗ:
 для точки K_1 та K_2 :

$$i_y = 23,510 \text{ кА}; i_y = 15,033 \text{ кА}.$$

Отже, ми бачимо, що отриманий струм короткого замикання та ударний струм дещо відрізняються від результатів у [2]. Це пов'язано з тим, що розрахунок ударного струму у роботі [2] виконується за формулою:

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{п0} K_{уд},$$

де $K_{уд}$ – ударний коефіцієнт, $K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$, T_a – постійна часу, $T_a = \frac{X_{ЭК}}{\omega_c R_{ЭК}}$.

Ми бачимо, що в [2] використовуються спрощені вирази, які достовірні за умови $X_{ЭК}/R_{ЭК} \geq 5$, а в ПЗ використовується більш повна формула, і вона є достовірнішою, а саме:

$$K_{уд} = 1,02 + 0,98 e^{-\frac{3}{X_{ЭК}/R_{ЭК}}}.$$

Із внесенням всіх вище перерахованих поправок отримуємо, що ударний струм для точки K_1 та K_2 становить:

$$i_y = 22455,44699 \text{ А}; i_y = 14343,18 \text{ А}$$

У ПЗ розрахунок ударного струму короткого замикання проводиться з урахуванням коефіцієнта $c = 1,05$, який суттєво впливає на подальший розрахунок:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k}$$

Таким чином, враховуючи коефіцієнт при розрахунку ударних струмів короткого замикання, отримуємо:

для точки K_1 та K_2 :

$$i_y = 22455,44699 \cdot 1,05 = 23578,21934 \text{ А}; i_y = 14,826 \cdot 1,05 = 15060,34 \text{ А}.$$

Отже, результати відрізняються несуттєво, похибка в розрахунку складає приблизно 0,3 %.

Висновки

Розглянувши цей програмний продукт, ми переконалися, що «Elplek» доволі таки проста у використанні програма, має деякі недоліки, вона не може виводити дані щодо ударного струму при здійсненні розрахунків методом накладання та при розрахунку за стандартом IEC-60909 струм усталеного стану I_k'' як функція часу не розраховується. Але вона також має і багато переваг – програма безкоштовна, має достатньо простий та зрозумілий інтерфейс, досить великий вибір пристроїв релейного захисту тощо.

Список літератури

1. Program Elplek: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://pp.kpnet.fi/ijl>.
2. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для вузів. / Г.Г. Півняк, В.М. Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І. Несен; за ред. акад. НАН України Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий ун-т, 2002. – 597 с.
3. РЗА. Все о релейной защите: [Электронный ресурс] / Расчет релейной защиты. ELPLEK. Русская версия помощи – 2011. – Режим доступа: http://rza.org.ua/elplek/view/Raschet-releynoy-zashchiti--ELPLEK--Russkaya-versiya-pomoshchi_2.html

Проведено обоснование целесообразности применения автоматизированного расчета аварийных режимов электрических сетей среднего класса напряжения. Приведены примеры и поставлены задачи дальнейших исследований.

Система электроснабжения, автоматизированный программный продукт, токи короткого замыкания.

A rationale for the use of automated calculation of emergency operation of electric network voltage class. The examples and tasks for future research.

Electricity, automated software, short-circuit currents.

УДК 621. 3. 066

ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ МЕТОДОМ ГАЗОПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ

І.П. Радько, кандидат технічних наук

Наведено результати досліджень технологій відновлення і зміцнення контакт-деталей електричних апаратів. Обґрунтовано доцільність застосування технології відновлення контакт-деталей методом газоплазмового напилення.

Контакт-деталі, напилення, плазма, електрична дуга, контактні матеріали.

Нині актуальною є проблема розробки технології відновлення і зміцнення контакт-деталей електричних апаратів.

Методи, що застосовувалися раніше для відновлення і зміцнення контактних апаратів, розробки технології нанесення покриттів не враховували особливостей формування і будови плазмових покриттів.

Мета досліджень – обґрунтування технології відновлення і зміцнення контакт-деталей електричного обладнання, яка є найбільш екологічно ефективною.

Матеріали та методика досліджень. Електричні комутаційні апарати є важливим засобом електрифікації та автоматизації виробничих процесів у агропромисловому комплексі, особливо в тваринництві. Відмова електрообладнання в електроустановках тваринництва призводить до великих втрат продукції, зниження її якості, тому за наслідками цю відмову можна порівняти із втратою об'єктом енергопостачання. Так, відмова обладнання технологічних систем молочних ферм призводить до знижен-

Проведено обоснование целесообразности применения автоматизированного расчета аварийных режимов электрических сетей среднего класса напряжения. Приведены примеры и поставлены задачи дальнейших исследований.

Система электроснабжения, автоматизированный программный продукт, токи короткого замыкания.

A rationale for the use of automated calculation of emergency operation of electric network voltage class. The examples and tasks for future research.

Electricity, automated software, short-circuit currents.

УДК 621. 3. 066

ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ МЕТОДОМ ГАЗОПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ

І.П. Радько, кандидат технічних наук

Наведено результати досліджень технологій відновлення і зміцнення контакт-деталей електричних апаратів. Обґрунтовано доцільність застосування технології відновлення контакт-деталей методом газоплазмового напилення.

Контакт-деталі, напилення, плазма, електрична дуга, контактні матеріали.

Нині актуальною є проблема розробки технології відновлення і зміцнення контакт-деталей електричних апаратів.

Методи, що застосовувалися раніше для відновлення і зміцнення контактних апаратів, розробки технології нанесення покриттів не враховували особливостей формування і будови плазмових покриттів.

Мета досліджень – обґрунтування технології відновлення і зміцнення контакт-деталей електричного обладнання, яка є найбільш екологічно ефективною.

Матеріали та методика досліджень. Електричні комутаційні апарати є важливим засобом електрифікації та автоматизації виробничих процесів у агропромисловому комплексі, особливо в тваринництві. Відмова електрообладнання в електроустановках тваринництва призводить до великих втрат продукції, зниження її якості, тому за наслідками цю відмову можна порівняти із втратою об'єктом енергопостачання. Так, відмова обладнання технологічних систем молочних ферм призводить до знижен-

ня надоїв молока на 40 %, а захворюваність худоби зростає до 78 %, що додатково знижує продуктивність тварин ще на 12 %.

Надійність електричних комутаційних апаратів – одна із складних і багатогранних технічних проблем, яка пояснюється такими об'єктивними причинами:

- різким збільшенням складності і багатофункціональності сучасних технологічних систем;
- екстремальністю умов, в яких експлуатуються електричні комутаційні апарати (високі швидкості, значні прискорення, висока температура, вібрація, наявність хімічно активних реагентів у повітряному середовищі тощо);
- збільшенням відповідальності функцій, які виконує апарат, високою технічною та економічною вартістю відмови.

Статистичний матеріал, який зібрано декількома науково-дослідними організаціями та інститутами, свідчить про те, що в сільському господарстві кожен рік виходить з ладу 20–25 % електродвигунів, а більш як 80 % їх відмов пояснюється недосконалістю технічних рішень та алгоритмів функціонування комутаційно-захисної апаратури з врахуванням специфіки сільськогосподарського виробництва. Це підтверджується щорічним виходом з ладу до 17 % електромагнітних пускатрів і 15 % автоматичних вимикачів, а термін служби комутаційних апаратів, які експлуатуються в електроустановках тваринництва, в середньому, становить 0,5–3,0 роки, що значно нижче їх технічного ресурсу, при цьому частота відмов у 2–2,5 рази більша, ніж для аналогічних апаратів у промисловості.

Контакт-деталі електричних апаратів виготовляються з матеріалів на основі срібла, вартість якого складає 45–60 % вартості апарата в цілому. Підвищення надійності роботи апаратів в електроустановках сільського господарства нерозривно пов'язано зі створенням та впровадженням нових контактних матеріалів, які можуть забезпечити задані показники надійності контакт-деталей, зниження матеріальних витрат на виробництво та експлуатацію реле, економію благородних металів.

В умовах України, де срібло не видобувається і за різкого підвищення цін на благородні метали, виникає гостра потреба заміни срібних і срібловмістких контакт-деталей на нові контакти, що виготовлені з менш дефіцитних та більш технологічних контактних матеріалів.

Результати досліджень. Для відновлення контакт-деталей електричних апаратів використовують різні способи, але всі вони зводяться до напилення робочої поверхні [5].

Нині існує багато різних типів установок, призначених для напилення. Зі зміною характеру та збільшенням масштабу виробництва підвищуються потужності і розміри апаратів для напилення, зростає їх виробництво та удосконалюється механізація процесів напилення.

За типом джерела теплової енергії, яка використовується для розповсюдження напилюваного матеріалу, існуючі конструкції апаратів в основному можна розділити на два види: газовогняні та електричні. В газовогняних апаратах використовується теплота, яка виділяється при горінні

суміші горючий газ - кисень. Електричні – базуються на використанні теплоти електричної дуги.

Газотермічне напилення дає можливість нанести покриття будь-якої необхідної товщини: 0,01–5 мм [2, 3].

Процес напилення при нормальних умовах і режимах проводиться з нагріванням до температури не більше 100 °С, що виключає можливість небезпечного температурного впливу на основний метал контактотримачів, що має місце при зварюванні [4].

Найбільше застосовується метод газовогняного напилення. Він використовується для напилення і подальшого оплавлення покриттів із самофлюсуючих сплавів на основі нікелю та кобальту, а також для напилення керамічних та інших тугоплавких матеріалів. Одним із спеціальних видів газовогняного напилення є напилення, при якому використовується енергія детонації суміші ацетилену з киснем. Цей вид напилення дозволяє наносити покриття із матеріалів з надто високою температурою плавлення.

Із електричних видів напилення найпершим почав застосовуватися метод електродугової металізації. На початку розвитку цього методу при електрометалізації використовували дугу, яка горить на змінному струмі, що не дозволяло отримати стійкий процес розпилення дроту. Зараз в електрометалізаційних апаратах для створення дуги використовують постійний струм, що забезпечує кращу стабільність роботи.

В останні роки були розроблені і почались застосовуватись у промисловості плазмові розпилювачі та установки для високочастотного індукційного напилення, які в порівнянні з раніше існуючими методами мають більш широкі технологічні можливості для напилення покриттів і деталей практично із будь-якого матеріалу.

При газовогняному напиленні джерелом теплової енергії є полум'я, яке утворюється в результаті горіння суміші кисень - горючий газ. Напилення, залежно від стану напилюваного матеріалу, може бути трьох типів: провідникове, пруткове та порошкове. Крім цього, до газовогняного методу належить детонаційне напилення, основане на використанні енергії детонації суміші кисень – горючий газ [1].

Нанесення покриттів газоплазмовим напиленням – один із методів підвищення надійності та терміну служби контактів і деталей електрообладнання та найбільш простий, економічно-доцільний і розвинений процес відновлення розмірів зношених поверхонь, зокрема робочих поверхонь контакт-деталей електричних комутаційних апаратів.

Газоплазмове покриття являє собою шарований матеріал, який складається з сильно деформованих частинок, що закристалізувалися з великою швидкістю. Воно характеризується високою міцністю та електроерозійною стійкістю. Для його нанесення використовується не досить складне в експлуатації, але вартісне технологічне обладнання.

Висновки

Газоплазмове напилення дозволяє отримувати покриття з різноманітними типами контактних матеріалів, які характеризуються високою міцні-

стю та електроерозійною стійкістю. Розробка і впровадження у виробництво технологічного процесу газоплазмового напилення для відновлення контактних вузлів має перспективний характер і дає можливість отримати експлуатаційні характеристики апаратів, які не поступаються новим апаратам за відповідними показниками основного виробництва.

Список літератури

1. Витязь П.А. Теория и практика газоплазменного напыления / П.А. Витязь, В.С. Иванько. – Минск: Наука и техника, 1993 – 295 с.
2. Канцевичский В.А. Применение газотермических покрытий при изготовлении и ремонте машин / В.А. Канцевичский. – К.: Техника, 1989. – 176 с.
3. Кулик А.Я. Газотермическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик, Ю.С. Борнов, А.С. Мидхин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.
4. Куприянов И.Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И.Л. Куприянов, М.А. Геллер. – Минск: Наука и техника, 1990. – 175 с.
5. Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Зразки для випробування на розтягування: ДСТУ 3670-97 (ISO 2740-86). – [Чинний від 1999-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 1997. – 7 с.

Представлены результаты исследований технологии обновления и упрочнения контакт-деталей электрических аппаратов. Обоснована целесообразность применения технологии обновления контакт-деталей методом газоплазменного напыления.

Контакт-детали, напыление, плазма, электрическая дуга, контактные материалы.

The presented results of researches of technologies of renewal and strengthening of pin details of electric vehicles. Expediency of application of technologies of proceeding in pin details is reasonable by the method of gas-plasma evaporation .

Pin - details, evaporation, plasma, voltaic arc , pin materials.

УДК 631.3:628.8

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРА ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ВИКИДІВ ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ

***Ю.В. Герасимчук, кандидат технічних наук
Національний науковий центр “Інститут механізації та електрифікації сільського господарства” НААН України***

Запропоновано методичний підхід та розроблено математичну модель рекуперативного теплоутилізатора вентиляційних викидів

стю та електроерозійною стійкістю. Розробка і впровадження у виробництво технологічного процесу газоплазмового напилення для відновлення контактних вузлів має перспективний характер і дає можливість отримати експлуатаційні характеристики апаратів, які не поступаються новим апаратам за відповідними показниками основного виробництва.

Список літератури

1. Витязь П.А. Теория и практика газоплазменного напыления / П.А. Витязь, В.С. Иванько. – Минск: Наука и техника, 1993 – 295 с.
2. Канцевичский В.А. Применение газотермических покрытий при изготовлении и ремонте машин / В.А. Канцевичский. – К.: Техника, 1989. – 176 с.
3. Кулик А.Я. Газотермическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик, Ю.С. Борнов, А.С. Мидхин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.
4. Куприянов И.Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И.Л. Куприянов, М.А. Геллер. – Минск: Наука и техника, 1990. – 175 с.
5. Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Зразки для випробування на розтягування: ДСТУ 3670-97 (ISO 2740-86). – [Чинний від 1999-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 1997. – 7 с.

Представлены результаты исследований технологии обновления и упрочнения контакт-деталей электрических аппаратов. Обоснована целесообразность применения технологии обновления контакт-деталей методом газоплазменного напыления.

Контакт-детали, напыление, плазма, электрическая дуга, контактные материалы.

The presented results of researches of technologies of renewal and strengthening of pin details of electric vehicles. Expediency of application of technologies of proceeding in pin details is reasonable by the method of gas-plasma evaporation .

Pin - details, evaporation, plasma, voltaic arc , pin materials.

УДК 631.3:628.8

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРА ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ВИКИДІВ ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ

***Ю.В. Герасимчук, кандидат технічних наук
Національний науковий центр “Інститут механізації та електрифікації сільського господарства” НААН України***

Запропоновано методичний підхід та розроблено математичну модель рекуперативного теплоутилізатора вентиляційних викидів

тваринницьких приміщень з урахуванням конденсації водяної пари на теплообмінній поверхні в викидних каналах.

Математична модель, рекуперативний теплоутилізатор, вентиляційні викиди, теплообмін.

У результаті переведення на промислові методи виробництва продукції тваринництва і птахівництва виникло ряд важливих проблем, які потребують вирішення. Одна з них пов'язана з підтриманням у виробничих приміщеннях такого повітряного середовища, яке забезпечує ефективне використання тваринами і птицею поживних речовин кормів для отримання максимальної їх продуктивності. Але в холодний і перехідний періоди року підтримання у тваринницьких і птахівничих приміщеннях параметрів мікроклімату, які гарантують максимальну і рентабельну реалізацію генетичного потенціалу продуктивності тварин і птиці, потребує значних енергетичних витрат. Скорочення цих витрат до 80 % забезпечують теплоутилізатори вентиляційних викидів у системах вентиляції тваринницьких і птахівничих приміщень. Для таких приміщень доцільно використання теплоутилізаторів рекуперативного типу із зустрічним рухом повітряних потоків, в яких теплообмін між потоками припливного повітря і вентиляційних викидів здійснюється через теплообмінну поверхню, що унеможливорює потрапляння в потік припливного повітря водяних парів та мікробного і бактеріального забруднення з потоку вентиляційних викидів. Разом з тим, в холодний період року при температурах повітря зовнішнього середовища менше нуля градусів можливе обмерзання теплообмінної поверхні і втрата працездатності теплоутилізаторів. Для оцінки енергетичної ефективності застосування рекуперативних теплоутилізаторів та доцільності використання засобів захисту від обмерзання теплообмінної поверхні необхідні аналітичні залежності, які відображають взаємозв'язок між параметрами повітряних потоків на входах і виходах припливних і викидних каналів теплоутилізатора і його показниками призначення. Отже, створення математичної моделі теплообміну між потоками припливного повітря і вентиляційних викидів тваринницьких і птахівничих приміщень у рекуперативних теплоутилізаторах є важливою і актуальною задачею.

Мета досліджень – встановлення взаємозв'язку між температурою і відносною вологістю повітряних потоків на входах і виходах припливних і викидних каналів та показниками призначення рекуперативних теплоутилізаторів вентиляційних викидів тваринницьких і птахівничих приміщень.

Матеріали та методика досліджень. В рекуперативних теплоутилізаторах перенесення енергії від потоку повітря вентиляційних викидів до потоку припливного повітря може здійснюватись як в процесі явного теплообміну, так і в процесі з масообміном [7]. Математична модель рекуперативного теплоутилізатора з явним процесом теплообміну при рівних витратах повітря через припливні і викидні канали має вигляд такої системи рівнянь [6]:

$$\eta_t = \frac{t_{K2} - t_{П2}}{t_{П1} - t_{П2}}; \quad (1)$$

$$t_{K2} - t_{П2} = t_{П1} - t_{П2}, \quad (2)$$

де η_t – коефіцієнт температурної ефективності теплоутилізатора; t_{K2} – температура повітря на виході припливних каналів теплоутилізатора, °С; $t_{П1}$ – температура повітря на вході викидних каналів теплоутилізатора, °С; $t_{П2}$ – температура повітря на вході припливних каналів, °С.

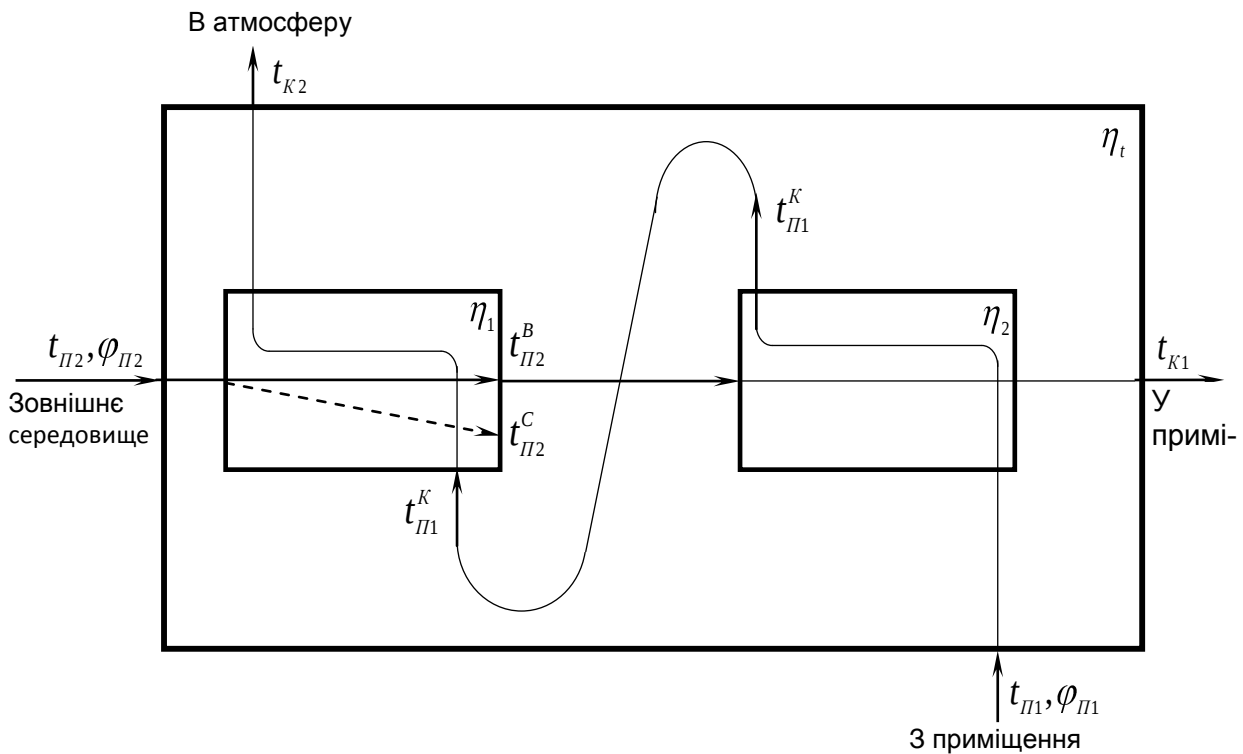
Характерним для рекуперативних теплоутилізаторів вентиляційних викидів тваринницьких приміщень є конденсація водяної пари на теплообмінній поверхні збоку викидних каналів. Математична модель теплообміну “сухого” режиму роботи теплоутилізаторів не враховує реальні умови їх експлуатації в тваринницьких приміщеннях. Тому, при проведенні розрахунків процесу теплообміну з конденсацією водяної пари на теплообмінній поверхні до цього часу використовують графоаналітичний метод [3] або метод кінцевих елементів та $h-d$ діаграми вологого повітря, що стримує застосування сучасної обчислювальної техніки.

Результати досліджень. У тваринницьких і птахівничих приміщеннях до викидних каналів рекуперативних теплоутилізаторів надходить повітря, відносна вологість якого згідно з галузевими нормами технологічного проектування [1–2], знаходиться в межах 40–85 %. Таке повітря у викидних каналах теплоутилізатора, віддаючи теплову енергію потоку припливного повітря, охолоджується, а на теплообмінній поверхні конденсується водяна пара. Початок конденсації водяної пари, як правило, відбувається не при вході у викидні канали теплоутилізатора, а на деякій відстані від входу. Причому, на тій частині теплообмінної поверхні, яка примикає до входу викидних каналів теплоутилізатора відбувається процес явного теплообміну між потоками припливного і викидного повітря, а на іншій частині – процес з конденсацією водяної пари. Отже, рекуперативний теплоутилізатор із зустрічним рухом повітряних потоків в умовах тваринницьких і птахівничих приміщень можна представити в вигляді двох послідовно з'єднаних, один з яких працює в “сухому” режимі роботи, а другий – з конденсацією водяної пари на теплообмінній поверхні. Схема повітряних потоків теплоутилізатора з таким розподілом показана на рисунку.

Температура конденсації водяної пари $t_{П1}^K$, °С, у повітряному потоці викидних каналів теплоутилізатора при відомих температурі і відносній вологості повітря у приміщенні визначається з умови рівності вологомісткостей повітря на вході у викидні канали теплоутилізатора і на ділянці, де починається конденсація водяної пари, за формулою:

$$t_{П1}^K = \frac{\beta \cdot \left(\ln \frac{\varphi_{П1}}{100} \cdot (\beta + t_{П1}) + \alpha \cdot t_{П1} \right)}{\beta \cdot \alpha - \ln \frac{\varphi_{П1}}{100} \cdot (\beta + t_{П1})}, \quad (3)$$

де $\varphi_{П1}$ – відносна вологість повітря на вході в викидні канали теплоутилізатора (відносна вологість повітря в приміщенні), %; α і β – постійні коефіцієнти, згідно з [5] $\alpha = 17,5045$, $\beta = 241,2$.



**Схема повітряних потоків рекуперативного теплоутилізатора
вентиляційних викидів тваринницьких приміщень з розподілом
на дві послідовно з'єднані частини**

Методичний підхід розподілу рекуперативного теплоутилізатора з коефіцієнтом температурної ефективності η_t на два послідовно з'єднані базується на використанні визначеної за формулою (3) температури конденсації водяної пари $t_{П1}^K$. Така температура підтримується на виході викидних каналів теплоутилізатора η_2 і на вході викидних каналів теплоутилізатора η_1 . Цим забезпечується "сухий" режим роботи теплоутилізатора η_2 , а теплоутилізатора η_1 – з конденсацією водяної пари на теплообмінній поверхні.

Тепловий потік $Q_{ВП}$, кВт, який утворюється у викидних каналах теплоутилізатора η_1 у результаті конденсації водяної пари, визначається за формулою:

$$Q_{ВП} = r \cdot G_1 \cdot (d_{П1} - d_{К1}), \quad (4)$$

де r – питома теплота пароутворення, кДж/кг_{вп}; G_1 – витрата повітря через викидні канали теплоутилізатора, кг_{сп}/с; $d_{П1}$ – вологомисткість повітряного потоку на вході викидних каналів теплоутилізатора, кг_{вп}/кг_{сп}; $d_{К1}$ – вологомисткість повітряного потоку на виході викидних каналів теплоутилізатора, кг_{вп}/кг_{сп}.

Відносна вологість повітряного потоку на вході в припливні канали теплоутилізатора така, як у приміщенні, а на виході припливних каналів за рахунок конденсації водяної пари досягає 100 %. Тоді вологомисткість по-

вітряних потоків на вході і на виході викидних каналів визначаються за формулами:

$$d_{\Pi 1} = \frac{0,622 \cdot \varphi_{\Pi 1} \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{\Pi 1}}{\beta + t_{\Pi 1}}\right)}{P_a - \varphi_{\Pi 1} \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{\Pi 1}}{\beta + t_{\Pi 1}}\right)}; \quad (5)$$

$$d_{K1} = \frac{62,2 \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{K1}}{\beta + t_{K1}}\right)}{P_a - 100 \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{K1}}{\beta + t_{K1}}\right)}, \quad (6)$$

де P_a – атмосферний тиск, Па; P_0 – постійний коефіцієнт, згідно з [5] $P_0 = 6,1121$ гПа; t_{K1} – температура потоку повітря на виході викидних каналів теплоутилізатора, °С.

Тепловий потік $Q_{\text{вп}}$ підвищує температуру повітря в викидних каналах теплоутилізатора η_1 за рахунок переходу неявної теплової енергії водяної пари в явну. При цьому збільшується різниця температур між повітряними потоками викидних та припливних каналів теплоутилізатора η_1 і таким чином потік повітря в припливних каналах теплоутилізатора η_1 отримує частину теплового потоку конденсації водяної пари $Q_{\text{вп}}$.

$$Q_{\text{пп}} = \xi \cdot Q_{\text{вп}}, \quad (7)$$

де $Q_{\text{пп}}$ – тепловий потік припливного повітря, отриманий за рахунок конденсації водяної пари в викидних каналах теплоутилізатора, кВт; ξ – коефіцієнт використання теплоти конденсації водяної пари викидного повітря.

Коефіцієнт ξ , як і коефіцієнт температурної ефективності η_t є показниками призначення теплоутилізаторів вентиляційних викидів тваринницьких приміщень [8]. Методика їх визначення наведена в [7].

Тепловий потік $Q_{\text{пп}}$ підвищує температуру припливного повітря на виході теплоутилізатора η_1 від температури $t_{\Pi 2}^C$, °С, яка була б при явному теплообміні між потоками викидного і припливного повітря (див. рисунок), до температури $t_{\Pi 2}^B$, °С, яка встановлюється при конденсації водяної пари в викидних каналах. При цьому має місце така залежність:

$$Q_{\text{пп}} = c \cdot G_2 \cdot t_{\Pi 2}^B - t_{\Pi 2}^C, \quad (8)$$

де c – питома теплоємність сухого повітря, кДж/(кг_{сп}·К); G_2 – витрата повітря через припливні канали теплоутилізатора, кг_{сп}/с.

З урахуванням формул (4), (7), (8) і при рівних витратах повітря у припливних і викидних каналах отримуємо взаємозв'язок між показником призначення теплоутилізатора ξ та параметрами повітряних потоків у вигляді такої залежності:

$$t_{\Pi 2}^B - t_{\Pi 2}^C = \xi \cdot \frac{r}{c} \cdot d_{\Pi 1} - d_{K1} . \quad (9)$$

Взаємозв'язок між коефіцієнтом температурної ефективності теплоутилізатора η_t (див. рисунок) і коефіцієнтами температурної ефективності η_1 і η_2 двох послідовно з'єднаних теплоутилізаторів отримують із системи рівнянь, які відображають процес явного теплообміну між потоками припливного і викидного повітря. Для цього необхідно доповнити систему рівнянь (1) і (2) очевидними залежностями, які впливають з рисунка:

$$t_{K2} - t_{\Pi 2}^B = \eta_2 \cdot t_{\Pi 1} - t_{\Pi 2}^B ; \quad (10)$$

$$t_{K2} - t_{\Pi 2}^B = t_{\Pi 1} - t_{\Pi 1}^K ; \quad (11)$$

$$t_{\Pi 2}^B - t_{\Pi 2} = \eta_1 \cdot t_{\Pi 1}^K - t_{\Pi 2} ; \quad (12)$$

$$t_{K1} = -t_{\Pi 2} . \quad (13)$$

Рішення системи рівнянь (1), (2), (10) – (13) щодо визначення взаємозв'язку між коефіцієнтом температурної ефективності рекуперативного теплоутилізатора η_t і коефіцієнтами температурної ефективності η_1 і η_2 двох послідовно з'єднаних теплоутилізаторів, має такий вигляд:

$$\eta_t = \frac{\eta_1 + \eta_2 - 2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}{1 - \eta_1 \cdot \eta_2} . \quad (14)$$

Таким чином, методичний підхід щодо розподілу рекуперативного теплоутилізатора на два послідовно з'єднані забезпечив отримання взаємозв'язків між параметрами повітряних потоків і параметрами призначення теплоутилізатора в вигляді аналітичних залежностей (9) – (11), (14), (15). Остання залежність впливає з визначення коефіцієнта температурної ефективності η_1 для “сухого” режиму роботи і згідно з позначеннями на рисунку має такий вигляд:

$$t_{\Pi 2}^C - t_{\Pi 2} = \eta_1 \cdot t_{\Pi 1}^K - t_{\Pi 2} . \quad (15)$$

У результаті синтезу отриманих аналітичних залежностей шляхом вилучення параметрів η_1 , η_2 , $t_{\Pi 2}^B$, $t_{\Pi 2}^C$ встановлено взаємозв'язок між параметрами повітряних потоків на входах і виходах рекуперативного теплоутилізатора та його показниками призначення в вигляді такого аналітичного виразу:

$$t_{K2} - t_{\Pi 2} = \eta_t \cdot t_{\Pi 1} - t_{\Pi 2} + \xi \cdot r \cdot d_{\Pi 1} - d_{K1} \cdot \frac{\eta_t \cdot t_{\Pi 1} - t_{\Pi 1}^K + t_{\Pi 1}^K - t_{K2}}{c \cdot t_{\Pi 1} - t_{K2}} . \quad (16)$$

Крім того, в рекуперативному теплоутилізаторі згідно з законом збереження енергії кількість теплової енергії, яку в результаті теплообміну втрачає потік викидного повітря, дорівнює кількості теплової енергії, яку отримує потік припливного повітря. В аналітичній формі це має вигляд рівняння різниці питомих ентальпій повітряних потоків на вході і виході припливних каналів та виході і вході викидних каналів теплоутилізатора. З урахуванням аналітичних виразів питомих ентальпій [4] запис закону збереження енергії для рекуперативного теплоутилізатора має такий вигляд:

$$t_{K2} - t_{П2} \cdot c + c_B \cdot d_{П2} = c \cdot t_{П1} - t_{K1} + c_B \cdot t_{П1} \cdot d_{П1} - t_{K1} \cdot d_{K1} + r \cdot d_{П1} - d_{K1}, \quad (17)$$

де c_B – питома теплоємність водяної пари, кДж/(кг·К); $d_{П2}$ – вологомисткість повітряного потоку на вході припливних каналів теплоутилізатора, кг_{вп}/кг_{сп}, яка визначається за формулою:

$$d_{П2} = \frac{0,622 \cdot \varphi_{П2} \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{П2}}{\beta + t_{П2}}\right)}{P_a - \varphi_{П2} \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{П2}}{\beta + t_{П2}}\right)}, \quad (18)$$

де $\varphi_{П2}$ – відносна вологість повітря на вході в припливні канали теплоутилізатора (відносна вологість повітря зовнішнього середовища), %.

Адекватність отриманої математичної моделі рекуперативного теплоутилізатора, в вигляді аналітичних залежностей (16) і (17), базується на коректному використанні закономірностей теорії теплопровідності та закону збереження енергії. Крім того, якщо в цій математичній моделі забезпечити умови для процесу явного теплообміну між потоками припливного і викидного повітря, а це відсутність конденсації водяної пари в викидних каналах і рівність вологомисткостей повітряних потоків, то аналітичні залежності (16) і (17) приймають вигляд рівнянь (1) і (2) “сухого” режиму роботи рекуперативних теплоутилізаторів.

Висновки

Методичний підхід щодо розподілу рекуперативного теплоутилізатора вентиляційних викидів тваринницьких приміщень на два послідовно з’єднані з аналізом і синтезом взаємозв’язків між параметрами повітряних потоків та показниками призначення забезпечили створення його математичної моделі. Її характерною особливістю є можливість врахування відносної вологості повітря на входах припливних і викидних каналів рекуперативного теплоутилізатора та оцінки впливу величини відносної вологості на температуру повітряних потоків на виходах припливних і викидних каналів.

Список літератури

1. Відомчі норми технологічного проектування. Підприємства птахівництва: ВНТП-АПК-04.05. – К.: Мінагрополітики України, 2005. – 90 с.
2. Відомчі норми технологічного проектування. Свилярські підприємства (комплекси, ферми, малі ферми): ВНТП-АПК-02.05. – К.: Мінагрополітики України, 2005. – 98 с.
3. Рекомендации по расчету и проектированию систем обеспечения микроклимата животноводческих и птицеводческих зданий при новом строительстве и реконструкции с учетом экономии топливно-энергетических ресурсов. – К. УкрНИИАгропроект, 1986. – 82 с.
4. Строй А. Ф. Теплоснабжение и вентиляция сельскохозяйственных зданий и сооружений / А.Ф. Строй. – К.: Вища шк., 1983. – 215 с.

5. Таблицы психрометрические. Построение, содержание, расчетные соотношения: ГОСТ 8.524-85. – [Чинний від 1986-07-01]. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. – 34 с.

6. Теплоутилізатори. Методи випробувань: ДСТУ 2671-94. – [Чинний від 1995-07-01]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 11 с. – (Національні стандарти України).

7. Теплоутилізатори. Типи та основні параметри: ДСТУ 2677-94 (ГОСТ 30179-94). – [Чинний від 1998-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 6 с. – (Національні стандарти України).

8. Техніка сільськогосподарська. Рекуперативні теплоутилізатори вентиляційних викидів тваринницьких приміщень. Основні параметри й загальні технічні вимоги: СОУ 29.3–37–448:2006. – К.: Мінагрополітики України, 2006. – 13 с.

9. Техніка сільськогосподарська. Рекуперативні теплоутилізатори вентиляційних викидів тваринницьких приміщень. Методи випробувань: СОУ 74.3-37-265-2005. – К.: Мінагрополітики України, 2005. – 37 с.

Предложен методический подход и разработана математическая модель рекуперативного теплоутилизатора вентиляционных выбросов животноводческих помещений с учетом конденсации водяного пара на теплообменной поверхности в выбросных каналах.

Математическая модель, рекуперативный теплоутилизатор, вентиляционные выбросы, теплообмен.

The methodical approach has been proposed and the mathematical model of regenerative heat utilizer vent emissions from the cattle breeding premises considering the condensation of water vapor on heat transfer surfaces in the exhaust ducts has been developed.

Mathematical model, recuperative heat utilizer, ventilation exhausts, heat transfer.

УДК 536.24

ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ТА АКУМУЛЯТОРІВ ТЕПЛОТИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛИЦЬ

***В. Г. Горобець, доктор технічних наук
Є. О. Антипов, аспірант***

Розроблено енергозберігаючу систему теплопостачання теплиць з використанням сонячної енергії та сезонного акумулятора теп-

5. Таблицы психрометрические. Построение, содержание, расчетные соотношения: ГОСТ 8.524-85. – [Чинний від 1986-07-01]. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. – 34 с.

6. Теплоутилізатори. Методи випробувань: ДСТУ 2671-94. – [Чинний від 1995-07-01]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 11 с. – (Національні стандарти України).

7. Теплоутилізатори. Типи та основні параметри: ДСТУ 2677-94 (ГОСТ 30179-94). – [Чинний від 1998-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 6 с. – (Національні стандарти України).

8. Техніка сільськогосподарська. Рекуперативні теплоутилізатори вентиляційних викидів тваринницьких приміщень. Основні параметри й загальні технічні вимоги: СОУ 29.3–37–448:2006. – К.: Мінагрополітики України, 2006. – 13 с.

9. Техніка сільськогосподарська. Рекуперативні теплоутилізатори вентиляційних викидів тваринницьких приміщень. Методи випробувань: СОУ 74.3-37-265-2005. – К.: Мінагрополітики України, 2005. – 37 с.

Предложен методический подход и разработана математическая модель рекуперативного теплоутилизатора вентиляционных выбросов животноводческих помещений с учетом конденсации водяного пара на теплообменной поверхности в выбросных каналах.

Математическая модель, рекуперативный теплоутилизатор, вентиляционные выбросы, теплообмен.

The methodical approach has been proposed and the mathematical model of regenerative heat utilizer vent emissions from the cattle breeding premises considering the condensation of water vapor on heat transfer surfaces in the exhaust ducts has been developed.

Mathematical model, recuperative heat utilizer, ventilation exhausts, heat transfer.

УДК 536.24

ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ТА АКУМУЛЯТОРІВ ТЕПЛОТИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛИЦЬ

***В. Г. Горобець, доктор технічних наук
Є. О. Антипов, аспірант***

Розроблено енергозберігаючу систему теплопостачання теплиць з використанням сонячної енергії та сезонного акумулятора теп-

лоти, що працює на фазових перетвореннях теплоакumuлюючого матеріалу.

Теплиця, сонячна енергія, сезонний акумулятор теплоти, теплообмінні процеси, фазовий перехід, зарядка та розрядка акумулятора.

Одним із актуальних питань сучасної енергетики є заміна традиційних джерел енергії, що базуються на використанні природного газу, нафти, вугілля тощо, альтернативними джерелами, які використовують енергію навколишнього середовища, наприклад вітрову та сонячну енергію, теплову енергію землі та водних ресурсів.

Сонячна енергія – це майже невичерпне джерело екологічно чистої енергії. Завдяки природним і кліматичним умовам наша країна має значні перспективи у використанні енергії Сонця. Це обумовлено тим, що близько 60 % енергії у виробництві і побуті витрачається на низькопотенційні процеси з температурою до 100 °С, а сонячна енергетика може забезпечити таку потребу в цьому температурному діапазоні.

Одним із напрямів розробки енергозберігаючих систем опалення та гарячого водопостачання житлових, промислових та сільськогосподарських об'єктів з використанням альтернативних джерел енергії є розробка системи сонячного енергозабезпечення будівель, яка здатна перетворювати енергію сонячної радіації в інші види енергії (наприклад, у теплову) з подальшою її акумуляцією [1, 3–6].

У сільському господарстві є великі можливості для застосування сонячних установок у рослинництві, тваринництві і садівництві. Це насамперед використання сонячної енергії в геліотеплицях, сушильних установках, для гарячого водопостачання та опалювання будинків, ферм, підігріву води в басейнах для розведення риби, холодильних установок тощо. Економічно доцільне використання сонячної енергії для гарячого водопостачання сезонних користувачів типу баз відпочинку, дачних поселень, а також для обігріву відкритих та закритих плавальних басейнів, спортивних споруд тощо [8].

Мета досліджень – розробка екологічно чистих, енергозберігаючих систем теплопостачання теплиць з використанням сонячної енергії та сезонного акумулятора теплоти.

Матеріали та методика досліджень. Для добового акумулювання в системах опалення та гарячого водопостачання використовуються акумулятори теплоти ємнісного типу, що працюють у діапазоні температур від 30 до 100 °С. Нижня межа температур, що становить близько 30 °С, характерна для повітряного опалення, температурні діапазони 30 ... 90 °С та 40 ... 60 °С, відповідно характерні для водяного опалення і гарячого водопостачання. До недоліків використання акумуляторів ємнісного типу належить їх велика маса і, як наслідок, потреба у великих площах для їх розміщення. Тому, для акумуляції теплової енергії у найбільш тривалий період, пропонується застосування теплоакumuляторів, що працюють на фазовому переході теплоакumuлюючого матеріалу (ТАМу), масо-габаритні показники яких при однаковій кількості акумульованої енергії суттєво кращі.

У роботі розроблена система теплопостачання, яка базується на використанні теплового акумулятора, що накопичує теплову енергію навколишнього середовища в літній період, відібрану сонячними колекторами, в системі обігріву теплиць на коротко- або довгостроковий період часу. В першому випадку використовують акумулятори теплоти невеликої потужності, якої вистачає для обігріву об'єктів на одну або кілька діб. При акумуляуванні теплоти на довгостроковий період, наприклад протягом кількох місяців, необхідно використовувати теплові акумулятори великої потужності, так звані сезонні акумулятори теплоти (САТ). У таких пристроях як гарячий теплоносіє може використовуватися вода, розчин етиленгліколю [9] або водно-сольові розчини [10]. Такий теплоносіє за допомогою насосного обладнання циркулює в контурі системи опалення в осінньо-зимово-весняний період, а влітку система обігріву може бути відключена і відбувається процес накопичення теплової енергії в сезонному акумуляторі теплоти, з подальшим її використанням у холодний період року.

Вибір конструкції теплового акумулятора та теплоакumuлюючого матеріалу відіграє важливу роль, оскільки визначає необхідний об'єм, габарити та цінові показники такого акумулятора. Відомо кілька принципів щодо акумуляування теплоти, наприклад нагрів речовин, що мають велику теплоємність (вода, спеціальні матеріали), використання теплоти фазового та хімічного перетворення речовин, у результаті якого в ній накопичується теплота [7]. Акумуляція прихованої теплоти є дуже зручною для систем сонячного опалення. Температура фазових переходів ТАМів вибирається невисокою, що відповідає необхідній температурі для системи обігріву теплиць. При цьому, як ТАМ, підбираються речовини з температурою плавлення в діапазоні від 30 до 40 °С.

Основна перевага акумуляторів з фазовим переходом (АФП) – висока питома густина акумуляованої енергії, завдяки чому істотно зменшуються об'ємні та вагові характеристики акумулятора теплоти в порівнянні з акумуляторами ємнісного типу.

Аналіз сучасного стану та існуючих систем сонячного обігріву теплиць. В Україні споживання енергії в теплицях складає 1 – 1,5 % загальнонаціонального енергоспоживання і сягає 20 – 35 % загального споживання енергії в сільському господарстві.

Теплиці – це біолого-теплотехнологічні пристрої, вони можуть бути істотно вдосконалені, якщо їх перетворити на геліотеплиці, які часто називають сонячними, при досить невеликих площах можуть забезпечити по два урожаї овочів на рік при мінімальних затратах на підігрів у зимовий період.

Сонячна теплиця має кілька особливостей конструкції. Її обов'язково ставлять лицевою частиною на південь, а задню (північну) стіну роблять глухою та утеплюють сучасними теплоізолюючими матеріалами. Маючи невелику товщину такі матеріали здатні забезпечити необхідний температурний режим в теплицях при дуже низьких температурах навколишнього середовища. Для прикладу, стінка з такого матеріалу товщиною в 1 см має такий же термічний опір, як і стінка з цегли товщиною 34 см.

Розміщувати геліотеплицю необхідно на південному схилі під кутом від 5 до 30 °. Враховуючи оптичні особливості розповсюдження сонячних променів, це дає можливість у будь-якому регіоні країни, концентрувати надходження значно більшої кількості сонячної теплової енергії в теплицю, порівняно з її звичайним розташуванням.

Геліотеплиця працює як пасивна геліосистема. Широко розповсюджені геліотеплиці з подвійним склом (рис. 1), теплоізовлюваною північною стінкою, що має відбивне покриття на внутрішній поверхні, яке дозволяє концентрувати теплові потоки сонячної енергії і перешкоджає їх тепловтраті.

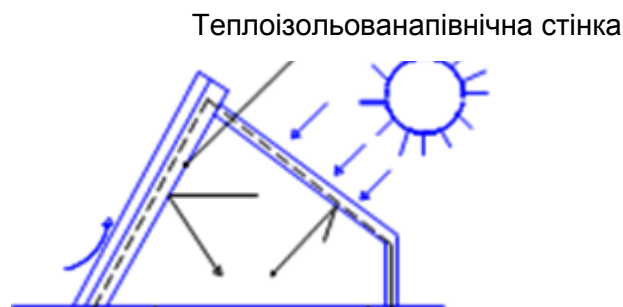


Рис.1. Принципова схема геліотеплиці

Звичайна плівкова теплиця може бути оснащена *підґрунтовим акумулятором теплоти* (рис.2), який розташований під теплицею, виконаний у вигляді ями, яка заповнена шматками граніту і має цегляні канали, які сполучаються з теплицею повітропроводами.

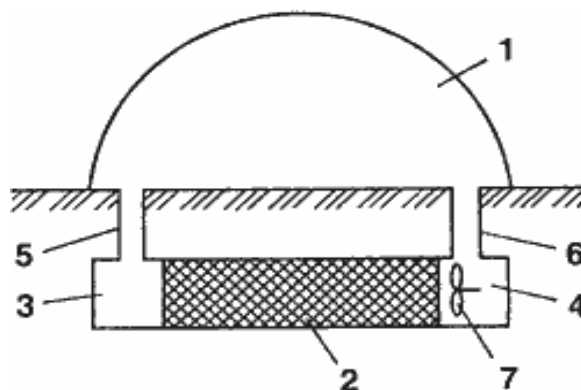


Рис.2. Плівкова теплиця з підґрунтовим акумулятором теплоти:
1 – теплиця; 2 – акумулятор; 3,4 – канали; 5,6 – труби; 7 – вентилятор

Тепле повітря з теплиці проходить першим каналом, а потім вентилятором продувається через цегляні канали підґрунтового (гранітного) акумулятора, віддаючи частину теплоти АТ, та повертається через другий канал до теплиці [2].

Вдень акумулятор заряджається теплотою, а вночі розряджається. Витрата енергії в теплицях зменшується при застосуванні подвійного скління, рухомої захисної теплової ізоляції тощо.

Основним недоліком таких геліотеплиць є короткострокове (добове)

акумулювання теплової енергії, що не дає можливості проводити їх обігрів при зниженні рівня сонячної інсоляції в зимовий період і викликає необхідність застосовувати цей період систему дублюючого підігріву теплоносія.

Розробка геліосистеми для обігріву теплиць з використанням сезонного акумулятора теплоти та аналіз її роботи. Геліосистемаз САТ (рис. 3) призначена для підвищення економічної ефективності системи обігріву теплиць за рахунок використання сонячної енергії та сезонного акумулятора теплоти.

Нагрітий теплоносієм з геліоколекторів 1, які знаходяться поруч з теплицею на окремому майданчику, надходить до теплообмінника 5. Конструктивно останній являє собою теплоізовану ємність із змішувачем (контур сонячних колекторів) та тепловим електричним нагрівником (ТЕ-Ном) 6, який є дублюючим джерелом підігріву води при зниженні рівня інтенсивності сонячного випромінювання або підвищеній хмарності. Накопичене тепло циркуляційним насосом 8 переміщується по контуру теплообмінник – САТ.

Сам акумулятор являє собою ємність 12, виготовлену із сталі з тепловою ізоляцією (13), заповнену теплоакумуючим матеріалом (ТАМом) 14. Температура фазового переходу ТАМу вибирається такою, що забезпечує підтримку необхідної робочої температури в системі теплопостачання. Всередині корпусу акумулятора знаходяться пучки труб 15, по яких протікає теплоносієм. Він може протікати по двох контурах – контур зарядки та контур розрядки акумулятора.

Контур зарядки з'єднує джерело теплоти (сонячний колектор) через теплообмінник 5 з акумулятором, і використовується для накопичення теплоти в акумуляторі теплоти. Контур розрядки з'єднує систему обігріву теплиці 16 (колектор нагрівних труб) із сезонним тепловим акумулятором і застосовується для підігріву повітря в теплиці.

При протіканні нагрітого теплоносія в контурі зарядки по системі нагрівних труб, через їх стінку (теплообмінну поверхню) спочатку відбувається нагрів ТАМу, а при досягненні температури плавлення останнього – процес фазового перетворення з твердої фази в рідку, що супроводжується акумулюванням теплоти. З часом міжфазна поверхня переміщається всередину ТАМу в результаті чого теплоакумуюча речовина розплавляється. При охолодженні ТАМу процес відбувається у зворотній послідовності, спочатку тверда фаза утворюється біля теплообмінної поверхні, а потім поступово у повному об'ємі ТАМу, причому теплоносієм віддається акумульована теплота. Таким чином, *розроблена енергозберігаюча система теплопостачання теплиць з використанням сонячної енергії та сезонного акумулятора теплоти*, що працює на фазових перетвореннях теплоакумуючого матеріалу, *усуває основний недолік геліотеплиць – короткострокове (добове) акумулювання теплової енергії.*

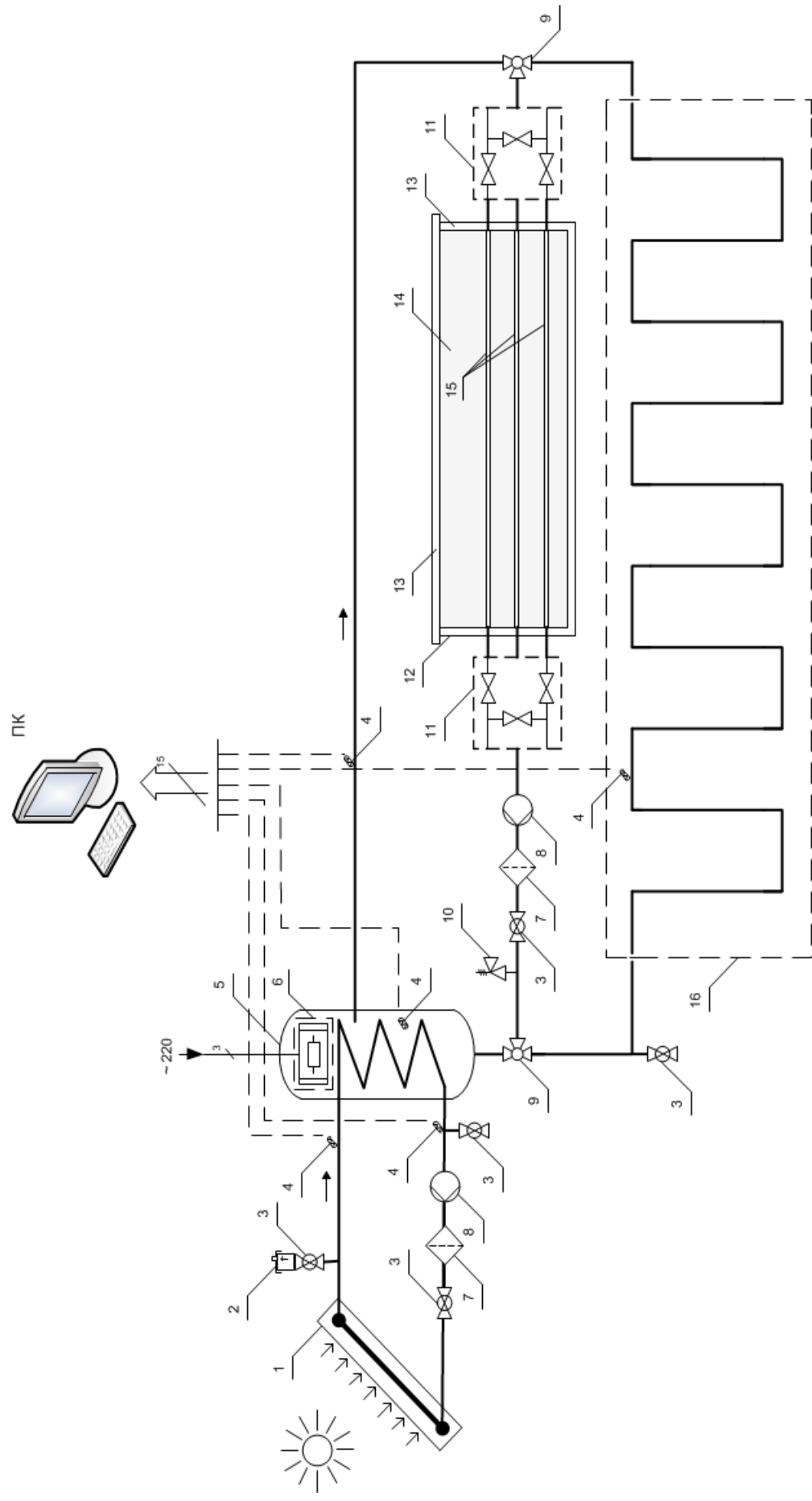


Рис. 3. Гідралічна схема системи теплозабезпечення теплиці:

1- геліоколектор; 2- повітряпускник; 3- шаровий вентиль; 4- накладний датчик температури; 5- теплообмінник; 6- дублююче джерело підігріву (ТЕН); 7- сітчастий фільтр; 8- циркуляційний насос; 9- триходовий шаровий вентиль; 10- запобіжний клапан; 11- розподільний колектор; 12- сезонний акумулятор теплоти; 13- шар теплоізоляції; 14- теплоакumuлюючий матеріал; 15- трубний пучок; 16- колектор нагрівних труб у теплиці

Висновки

1. Застосування геліосистем в Україні є перспективним напрямом використання альтернативних джерел теплової енергії з метою її акумулювання та подальшого використання для опалення та гарячого водопостачання об'єктів АПК.

2. Розроблено систему обігріву теплиць за рахунок використання сонячної енергії та сезонного акумулятора теплоти, що дає можливість значно зменшити енерговитрати для підтримання оптимального мікроклімату в теплицях.

3. Показано, що використання теплових акумуляторів з фазовими перетвореннями теплоакumuлюючого матеріалу має суттєві переваги порівняно з використанням ємнісних теплових акумуляторів.

4. При розробці системи опалення теплиць були враховані такі фактори:

а) розміщувати геліотеплицю необхідно на південному схилі під кутом від 5 до 30 °, що дає можливість суттєво збільшити кількість поглинутої сонячної енергії;

б) використання сучасних теплоізолюючих матеріалів в зовнішніх огорожувальних конструкціях дає можливість зменшити тепловтрати та покращити масогабаритні характеристики теплиць.

5. Розроблена система теплопостачання теплиць з використанням геліоколекторів та сезонних теплових акумуляторів дозволяє скоротити поточні економічні витрати в тепличних комплексах до 50 %.

Список літератури

1. Бекман Г. Тепловое аккумулярование энергии / Г. Бекман, П. Гилли; пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 272 с.

2. Брикворт Б.Д. Солнечно-энергетические установки / Б.Д. Брикворт. – М.: Мир, 1976. – 288 с.

3. 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. тр. – М.: Изд-во ЦНИИЭПИО, 1984. – С.75–90.

4. Горобец В.Г. Теплообмен при обтекании неизотермических развитых поверхностей теплообмена / В.Г. Горобец. – К.: «ЦП «Компринт», 2011. – 353 с.

5. Гулиа Н.В. Накопители энергии / Н. Гулиа. – М.: Мир, 1980. – 253 с.

6. Данилин В.Н. Физическая химия тепловых аккумуляторов / В.Н. Данилин. – Краснодар: КПИ, 1981. – 347 с.

7. Елистратов В.В. Аккумуляирование солнечной энергии / В.В. Елистратов // Нетрадиционная энергетика и технология: материалы междунар. конф., 20–25 ноября 1975 г. – Ч. 1. – Владивосток: ДВО РАН, 1975. – С. 32.

8. Дверняков В.С. Сонце – енергія та життя / В.С. Дверняков. – К.: Наук. думка, 1991. – 176 с.

9. Низкотемпературный носитель для систем солнечного теплоснабжения / М.Д. Абдулаева, В.П. Баранник, С.И. Смирнов, Т.Х.Чен // Гелиотехника. – 1988. – №1. – С. 32 – 35.

10. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / [под ред. З.В. Сарнацкого и С.А. Чистовича]. – М.: Стройиздат, 1990. – 328 с.

Разработана энергосберегающая система теплоснабжения теплиц с использованием солнечной энергии и сезонного аккумулятора теплоты, работающего на фазовых превращениях теплоаккумулирующего материала.

Теплица, солнечная энергия, сезонный аккумулятор теплоты, теплообменные процессы, фазовый переход, зарядка и разрядка аккумулятора.

Energy-saving heating system of greenhouses using solar energy and seasonal heat accumulator, working on phase transformations heat accumulating material are developed.

Greenhouse, solar energy, seasonal heat accumulator, heat transfer processes, phase transition, charging and discharging of the battery.

УДК 681.517.631

**ПРОГРАМНО-АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДСИСТЕМИ
МОНІТОРИНГУ ЗОВНІШНІХ ТЕМПЕРАТУРИ І ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ
ПРИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОМУ КЕРУВАННІ МІКРОКЛІМАТОМ У ТЕПЛИЦІ**

***В.П. Лисенко, В.М. Решетюк, В.М. Штепа,
кандидати технічних наук
А.А. Руденський, В.М. Пуха, інженери
Т.І. Лендєл, А.О. Дудник, аспіранти***

Обґрунтовано доцільність розробки програмно-апаратних засобів підсистеми моніторингу технологічних параметрів у теплиці: температури та вологості повітря. Встановлено технологічні вимоги до технічних засобів такої підсистеми. Спроектовано принципову електричну схему та друковані плати; здійснено калібрування сприймаючих елементів. Синтезовано алгоритмічно-програмне забезпечення керування відповідним обладнанням. Досліджено, із використанням осцилограм, якість роботи технічних засобів автоматики. Проведено виробничу перевірку підсистеми моніторингу зовнішніх температури та вологості.

Система керування, підсистема моніторингу, вологість, температура, сприймаючі елементи, надійність.

У результаті проведених досліджень розроблено схему системи керування процесом вирощування рослин у теплиці [1–3]. У ній блок нейромережевого моделювання і прогнозування часових рядів (БНМПЧР) (рис.

Разработана энергосберегающая система теплоснабжения теплиц с использованием солнечной энергии и сезонного аккумулятора теплоты, работающего на фазовых превращениях теплоаккумулирующего материала.

Теплица, солнечная энергия, сезонный аккумулятор теплоты, теплообменные процессы, фазовый переход, зарядка и разрядка аккумулятора.

Energy-saving heating system of greenhouses using solar energy and seasonal heat accumulator, working on phase transformations heat accumulating material are developed.

Greenhouse, solar energy, seasonal heat accumulator, heat transfer processes, phase transition, charging and discharging of the battery.

УДК 681.517.631

ПРОГРАМНО-АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДСИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЗОВНІШНІХ ТЕМПЕРАТУРИ І ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ ПРИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОМУ КЕРУВАННІ МІКРОКЛІМАТОМ У ТЕПЛИЦІ

***В.П. Лисенко, В.М. Решетюк, В.М. Штепа,
кандидати технічних наук
А.А. Руденський, В.М. Пуха, інженери
Т.І. Лендєл, А.О. Дудник, аспіранти***

Обґрунтовано доцільність розробки програмно-апаратних засобів підсистеми моніторингу технологічних параметрів у теплиці: температури та вологості повітря. Встановлено технологічні вимоги до технічних засобів такої підсистеми. Спроектовано принципову електричну схему та друковані плати; здійснено калібрування сприймаючих елементів. Синтезовано алгоритмічно-програмне забезпечення керування відповідним обладнанням. Досліджено, із використанням осцилограм, якість роботи технічних засобів автоматики. Проведено виробничу перевірку підсистеми моніторингу зовнішніх температури та вологості.

Система керування, підсистема моніторингу, вологість, температура, сприймаючі елементи, надійність.

У результаті проведених досліджень розроблено схему системи керування процесом вирощування рослин у теплиці [1–3]. У ній блок нейромережевого моделювання і прогнозування часових рядів (БНМПЧР) (рис.

1) створюється на основі нейронної мережі типу багатошаровий персептрон і прогнозування температурного часового ряду та часового ряду сонячної радіації.

З використанням блока оптимізації із застосуванням генетичного алгоритму відбувається оптимізація нейронної мережі.

Прогнозоване значення збурень передається в блок прийняття рішень (БПР), у базі даних якого зберігаються можливі варіанти дій керування й показники якості (B_6) для кожної дії за продуктивністю виробництва, матеріальними та енергетичними витратами у фізичних одиницях. У БПР вводяться дані вартості складових прибутку C , і далі на основі критерію оптимізації здійснюється вибір оптимальної стратегії управління (U_p). За допомогою блок управління (БУ) проводиться зміна заданої дії $U_{зад}$ у, з врахуванням вологості повітря локальний автоматичний управляючий пристрій (ЛАУП).

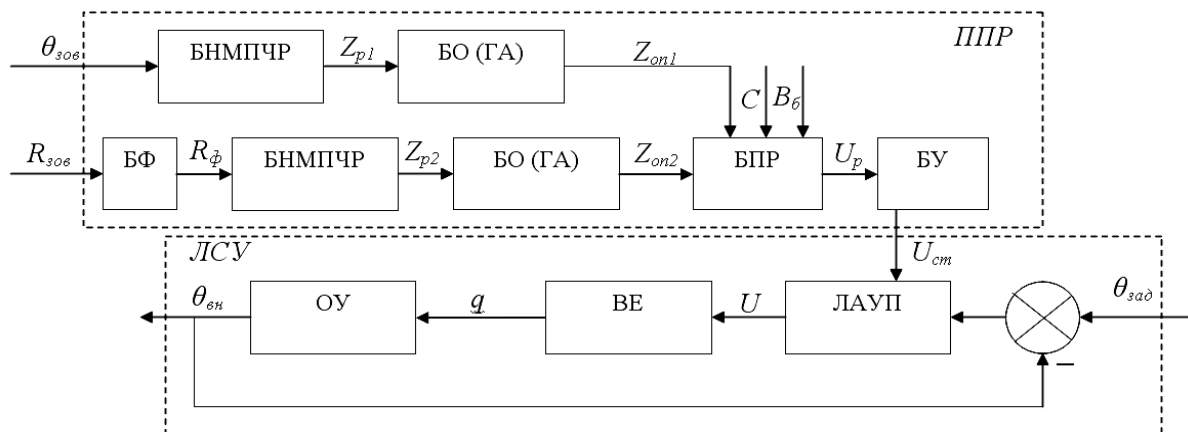


Рис. 1. Структурна схема системи керування процесом вирощування рослин в теплиці:

ППР – підсистема прийняття рішень; БФ – блок фільтрації інтенсивності сонячної радіації; БНМПЧР – блок нейромережевого моделювання і прогнозування часових рядів; БО (ГА) – блок оптимізації на основі генетичного алгоритму; БПР – блок прийняття рішень; БУ – блок управління; ЛСУ – локальна система управління; ЛАУП – локальний автоматичний управляючий пристрій; ВЕ – виконавчі елементи; ОУ – об’єкт управління

Додатковими вважаємо блок фільтрації для часового ряду інтенсивності сонячної радіації, а також блок оптимізації налаштувань нейронних мереж з використанням генетичного алгоритму.

Очевидно, що для ефективного функціонування такої системи (див. рис. 1) обов’язковою умовою є наявність адекватного та надійного програмно-апаратного забезпечення підсистем збору, перетворення та передачі технологічної інформації від об’єкта до блоків інтелектуального керування.

Мета досліджень – розробка та дослідження програмно-апаратного забезпечення підсистеми моніторингу зовнішніх температури і вологості повітря.

Матеріали та методика досліджень. Технологічні вимоги до підсистеми моніторингу потребують вимірювання: температури з точністю 1 °С, відносної вологості повітря з точністю 2 %. Вимірювання слід здійснювати в теплиці в зоні розташування рослин на висоті 1, 2 і 3 м, а також зовні теплиці. Передбачається дані про виміри кожні 5 хв передавати в комп'ютер верхнього рівня для накопичення інформації у базі даних і передачі через мережу Інтернет.

Підсистема моніторингу температури та вологості повітря складається з чотирьох цифрових датчиків температури DS18B20, двох датчиків відносної вологості повітря HH-3610-004, мікросхем мікроконтролера PIC16F873A, зв'язку з COM-портом MAX232, стабілізатора напруги 5 В 7805, кварцового резонатора з частотою 4 МГц для задання тактової частоти мікроконтролера, чотирьох світлодіодів сигналізації, джерела живлення 9 В, 0,5 А, запобіжника, електричних опорів та конденсаторів.

Результати досліджень. Електрична принципова схема (рис. 2) живиться від стабілізованого джерела G1 напругою 9 В з електронним захистом від короткого замикання. Мікросхема U1 7805 на виході 3 стабілізує напругу 5 В, від якої живляться мікросхеми та датчики. Датчики U4 та U5 відповідно зовнішньої та внутрішньої відносної вологості повітря перетворюють цей параметр у електричну напругу, яка надходить на входи модуля аналого-цифрового перетворення (АЦП) мікроконтролера U2. Сигнали цифрових датчиків зовнішньої (U6) і внутрішньої (U7...U9) температури за однопровідним інтерфейсом MicroLAN передаються до входів RA2 та RA4 порту А мікроконтролера U2. Обмін даними між мікроконтролером і комп'ютером верхнього рівня здійснюється кожні 5 хв за допомогою мікросхеми U3 через COM-порт (рознімач P1).

Кварцовий резонатор X2 разом з конденсаторами C5, C6 забезпечує стабільну тактову частоту $F_{\text{ген}} = 4$ МГц генератора мікроконтролера. Світлодіоди VD5...VD8 з обмежувальними резисторами R8...R11 призначені для сигналізації початкового запуску мікроконтролера та можливих помилок у процесі роботи підсистеми.

Підтягувальні резистори R6, R7 забезпечують високий рівень напруги, коли відсутня передача та прийом "нуля" з ліній інтерфейсу MicroLAN. Конденсатори C1...C3 монтуються поряд з мікросхемами для зменшення перешкод. Через рознімач J1 здійснюється внутрішньосхемне програмування пам'яті програм мікроконтролера U2.

Друковану плату мікропроцесорної підсистеми моніторингу розроблено в середовищі Sprint Layout (рис. 3).

Згідно з технічним описом датчиків вологості [4] залежність електричної напруги від відносної вологості повітря є лінійною. Перетворення напруги в код АЦП також є лінійним. Для калібрування кожного датчика визначено по дві точки статичної характеристики датчиків.

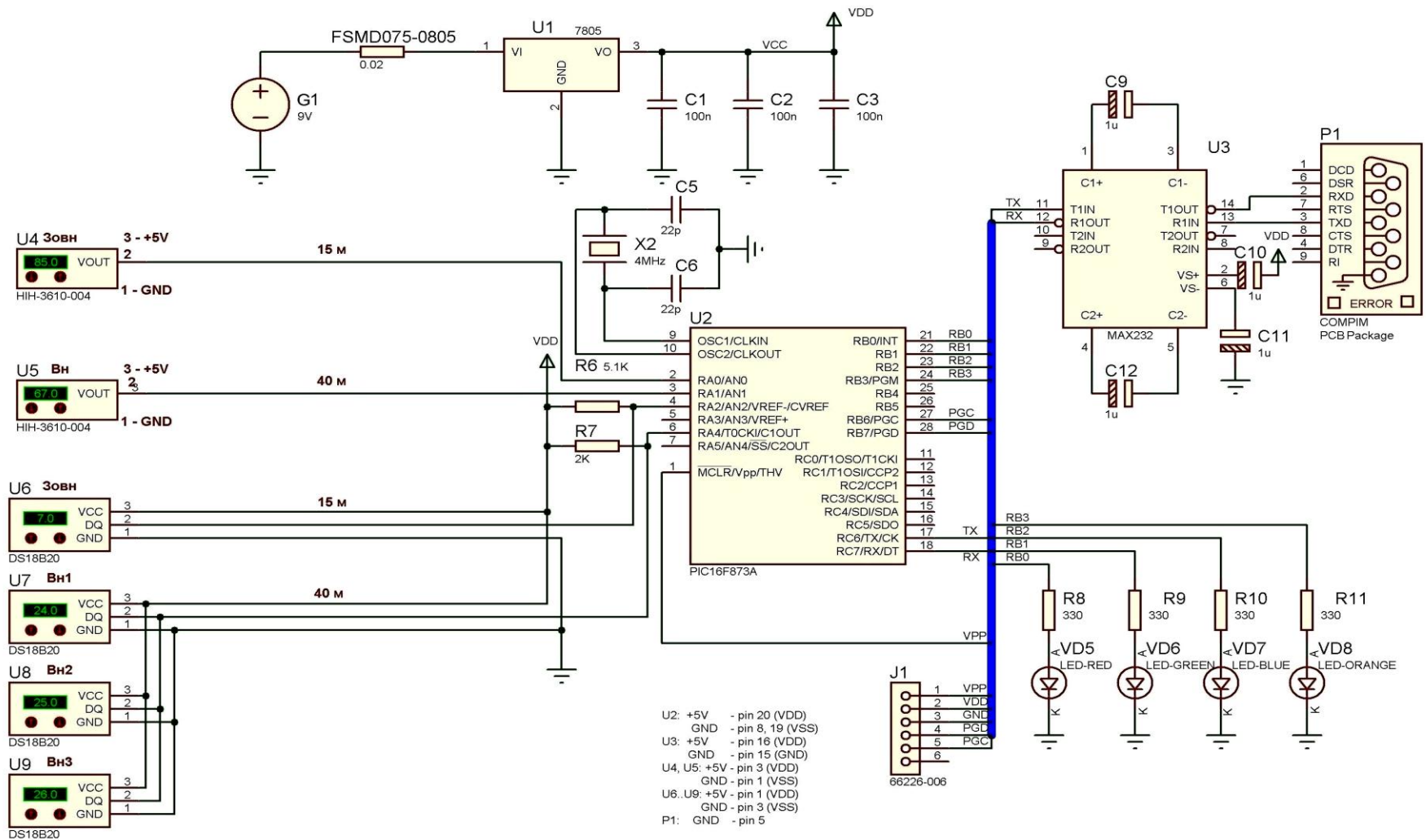


Рис. 2. Електрична принципова схема підсистеми моніторингу температури та вологості в теплиці

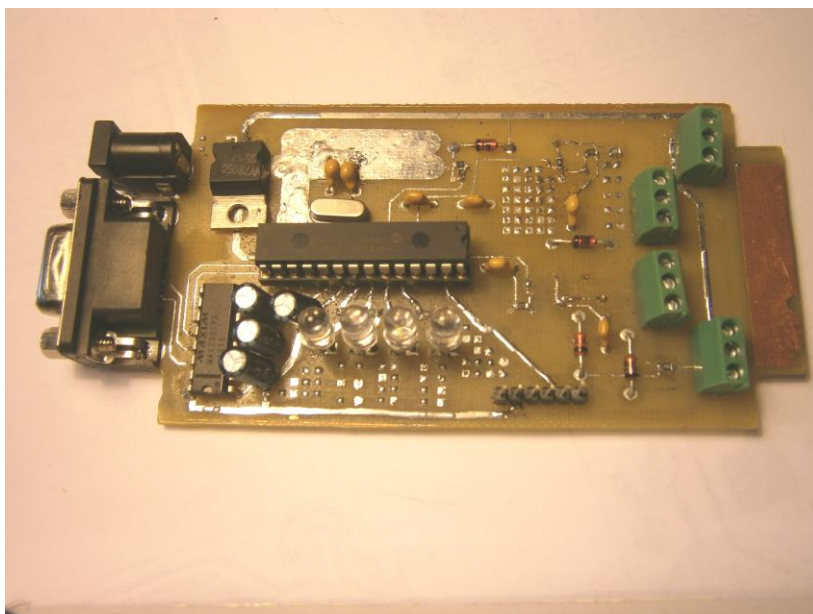


Рис. 3. Друкована плата мікропроцесорної підсистеми моніторингу

Перша точка отримана в середовищі лабораторії з використанням зразкового аспіраційного психрометра МВ-4М. Друга точка отримана у середовищі над насиченим розчином NaCl, де згідно зі стандартом ISO 483-88 відносна вологість повітря становить 75 % (таблиця).

Із цих даних отримані такі калібрувальні залежності:

Датчик вологості № 421: $\varphi = 0,606 \cdot C - 32,67$,

Датчик вологості № 420: $\varphi = 0,606 \cdot C - 39,34$,

де φ – відносна вологість повітря, %;

C – код АЦП.

Калібрувальні дані датчиків відносної вологості повітря НІН-3610-004

Датчик відносної вологості зовнішнього повітря № 421		Датчик відносної вологості зовнішнього повітря № 420	
Відносна вологість, %	Код АЦП	Відносна вологість, %	Код АЦП
34,6	111	34,6	122
75,0	178	75,0	189

Цифрові датчики температури DS18B20 калібрують при їх виготовленні [5]. Результат перетворення передається до мікроконтролера в градусах Цельсія з дозволяючою здатністю 0,0625 °C. Дані програмно заокруглюються до цілих.

Алгоритм роботи підсистеми моніторингу складається з двох основних частин:

- основна програма;
- підпрограма обробки переривання.

Основна програма передбачає такі блоки.

1. Ініціалізація зовнішніх портів, модулів АЦП, таймера TMR2, USART послідовного обміну з комп'ютером за інтерфейсом RS232. Початкові установки регістрів та прапорців ознак.

2. Якщо встановлено ознаку вимірювання $F_m=1$, перейти до п. 4, інакше – п. 3.

3. Якщо встановлено ознаку $F_{tx}=1$ передачі до комп'ютера, перейти до п. 5, інакше – до п. 2.

4. Вимірювання відносної вологості повітря від двох датчиків HIH-3610-004 та температури повітря від чотирьох датчиків DS18B20. $F_m=0$. Перейти до п. 2.

5. Розрахунок середніх значень виміряних параметрів за 5 хв, розпаковка та запис їх у форматі ASCII кодів, підрахунок контрольної суми, передача масиву ASCII кодів за інтерфейсом RS232 до комп'ютера для накопичення бази даних. $F_{tx}=0$.

Алгоритм підпрограми обробки переривання містить такі блоки.

1. Збереження контексту.

2. Якщо ознака $TMR2IF=1$, перейти до п. 4, інакше – до п. 3.

3. Якщо накопичено 19 с, встановити ознаку $F_m=1$, почати відрахунок часу спочатку та перейти до п. 4, інакше – перейти до п. 4.

4. Якщо відраховано 5 хв, $F_{tx}=1$, почати відрахунок часу спочатку та перейти до п. 5, інакше – перейти до п. 5.

5. Відновлення контексту та повернення з підпрограми переривання.

Програмне забезпечення створено та налагоджено у середовищі MPLAB 8.92 з використанням програматора-налагоджувача PICKIT 2. Приклад осцилограми сигналів датчиків DS18B20 подано на рис. 5.

Програма керування вентиляторами регулює роботу рециркуляційних вентиляторів залежно від:

- часу їх включення і виключення;
- положення екрана;
- температури зовнішнього повітря.

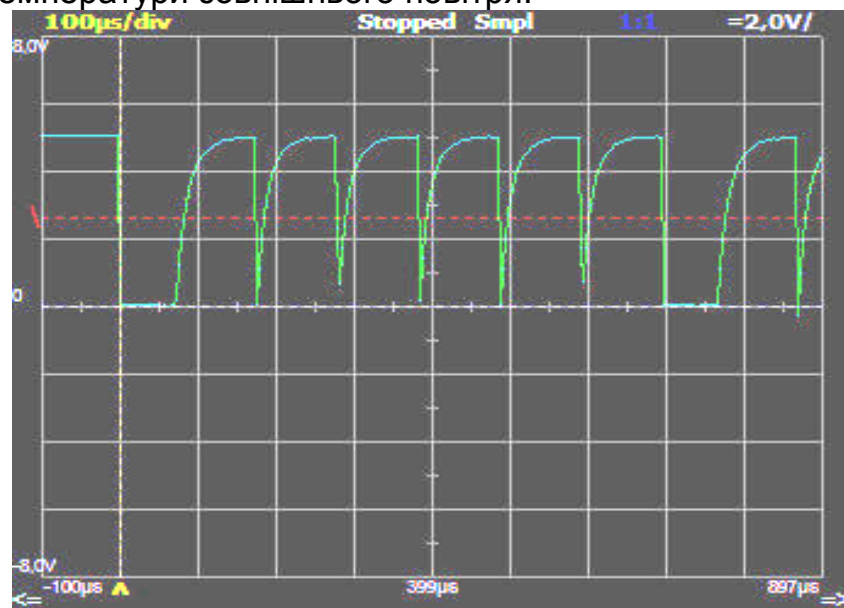


Рис. 5. Осцилограма фрагмента сигналу датчика температури

Відповідну систему було змонтовано та апробовано на базі ПАТ «Комбінат «Тепличний» (рис. 6). У процесі функціонування вона показала технологічно обґрунтовані швидкодію та надійність.



Рис. 6. Фотофакти впровадження підсистеми моніторингу на виробництві ПАТ «Комбінат «Тепличний»

Висновки

Обґрунтовано, розроблено та виробничо апробовано програмно-апаратні засоби підсистеми моніторингу зовнішніх температури та вологості повітря системи енергоефективного керування мікрокліматом у теплицях. З точки зору надійності та функціональних параметрів їх доцільно застосовувати на виробничих об'єктах.

Список літератури

1. Лисенко В.П. Метод оцінки ефективності роботи систем управління умовами утримання біологічних об'єктів для промислового виробництва сільсько-сподарської продукції / В.П. Лисенко, Б.Л. Головінський // Аграрна наука та освіта. – К.: НАУ, 2005. – Т.6. - № 3–4. – С. 127 – 133.
2. Лисенко В.П. Ймовірнісна (Байєсівська) нейронна мережа класифікації температурних образів / В.П. Лисенко, В.М. Штепа, А.О. Дудник // Вісник аграрної науки. – К.: НААН. – 2011. – № 4. – С. 53–56.
3. Лисенко В.П. Нейромережеве прогнозування часових рядів температури навколишнього природного середовища / В.П. Лисенко, Н.А. Заєць, В.М. Штепа, А.О. Дудник // Біоресурси і природокористування. – К.: НУБіП України, 2011. – Т.3. – № 3 – 4. – С. 102 – 108.
4. <http://powerware.eaton.com/Ukraine/Products-services>
5. <http://www.ukrrele.com/thermo-regulator.htm>

Обоснована целесообразность разработки программно - аппаратных средств подсистемы мониторинга технологических параметров в теплице: температуры и влажности воздуха. Установлены технологические требования к техническим средствам такой под-

системы. Спроектированы принципиальная электрическая схема и соответствующие печатные платы; осуществлены калибровки воспринимающих элементов. Синтезировано алгоритмически-программное обеспечение управления соответствующим оборудованием. Исследовано, с использованием осциллограмм, качество работы технического обеспечения автоматики. Проведена производственная проверка подсистемы мониторинга внешних температуры и влажности.

Система управления, подсистема мониторинга, влажность, температура, воспринимающие элементы, надежность.

The expediency of development of software and hardware subsystem monitoring process parameters in the greenhouse: temperature and humidity. The technological requirements of means of this subsystem. Designed schematic diagrams and printed circuit boards, by perceiving calibration elements. Synthesized algorithmically software controls the equipment. Investigated, using oscillograms, the quality of engineering of automation. A check of the production subsystem monitor external temperature and humidity.

Control system, a subsystem monitoring, humidity, temperature, perceiving elements, reliability.

УДК 504.064:625.711

ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ В ЕКОЛОГІЧНОМУ УПРАВЛІННІ

**Г.М. Желновач, кандидат технічних наук
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

Розглянуто особливості застосування інформаційних систем в екологічному управлінні. Встановлено доцільність використання нейромережевого моделювання для розробки системи екологічного моніторингу на прикладі екологічного моніторингу придорожнього простору автомобільних доріг.

Екологічне управління, інформаційна система, екологічний моніторинг, автомобільна дорога.

Головною особливістю екологічного управління є гармонізація двох надскладних динамічних систем – природної та антропогенної, які мають велику кількість внутрішніх взаємозв'язків між елементами і підсистемами.

Необхідність формування та вдосконалення інформаційних систем екологічного управління обумовлена як внутрішніми (інформаційне забезпечення процесів прийняття екологічно безпечних управлінських рішень

системы. Спроектированы принципиальная электрическая схема и соответствующие печатные платы; осуществлены калибровки воспринимающих элементов. Синтезировано алгоритмически-программное обеспечение управления соответствующим оборудованием. Исследовано, с использованием осциллограмм, качество работы технического обеспечения автоматики. Проведена производственная проверка подсистемы мониторинга внешних температуры и влажности.

Система управления, подсистема мониторинга, влажность, температура, воспринимающие элементы, надежность.

The expediency of development of software and hardware subsystem monitoring process parameters in the greenhouse: temperature and humidity. The technological requirements of means of this subsystem. Designed schematic diagrams and printed circuit boards, by perceiving calibration elements. Synthesized algorithmically software controls the equipment. Investigated, using oscillograms, the quality of engineering of automation. A check of the production subsystem monitor external temperature and humidity.

Control system, a subsystem monitoring, humidity, temperature, perceiving elements, reliability.

УДК 504.064:625.711

ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ В ЕКОЛОГІЧНОМУ УПРАВЛІННІ

**Г.М. Желновач, кандидат технічних наук
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

Розглянуто особливості застосування інформаційних систем в екологічному управлінні. Встановлено доцільність використання нейромережевого моделювання для розробки системи екологічного моніторингу на прикладі екологічного моніторингу придорожнього простору автомобільних доріг.

Екологічне управління, інформаційна система, екологічний моніторинг, автомобільна дорога.

Головною особливістю екологічного управління є гармонізація двох надскладних динамічних систем – природної та антропогенної, які мають велику кількість внутрішніх взаємозв'язків між елементами і підсистемами.

Необхідність формування та вдосконалення інформаційних систем екологічного управління обумовлена як внутрішніми (інформаційне забезпечення процесів прийняття екологічно безпечних управлінських рішень

щодо реалізації національної екологічної стратегії, екологічної політики), так і зовнішніми (дотримання міжнародних екологічних зобов'язань) потребами.

Мета досліджень – обґрунтування специфічних особливостей застосування інформаційних систем при організації екологічного управління, зокрема екологічного моніторингу, на локальному, регіональному, національному та міжнародному рівнях.

Матеріали та методика досліджень. В Україні формування інформаційних систем екологічного управління, як і інших складових національної інформаційної інфраструктури, має відбуватися відповідно до певних міжнародних вимог.

Розвиток інформаційних систем у суспільних науках та екології зокрема відбувався у три етапи.

1-й етап. Системи першого покоління, які за кордоном називаються «Системи електронної обробки даних» (Data processing systems), а в Україні – «Автоматизовані системи управління» (АСУ), базуються на застосуванні «заданого підходу». Тобто для вирішення кожної проблеми в системі окремо формувалися дані і створювалася відповідна алгоритмічна модель. Недоліками таких систем є їх інформаційна та алгоритмічна надмірність, оскільки вони занадто прикладні та орієнтовані на автоматизацію «паперових» технологій.

2-й етап. Системи другого покоління відомі під назвою «Управлінські інформаційні системи» (Management information systems). Структура таких систем орієнтована на операційну обробку даних, для яких характерний структурований потік інформації, інтеграція задач з обробки даних. Перевагою таких систем є можливість колективного доступу до даних, тобто створення єдиної бази даних з централізованим управлінням. Такі системи також називаються – «Системи управління базами даних» (СУБД). Основним недоліком систем з такою структурою є наявність надлишкової бази даних та проблеми опису самих даних. Нині відбувається інтенсивний розвиток і широке розповсюдження інформаційних систем, основою яких є СУБД.

3-й етап. Структура інформаційних систем третього покоління (діють нині) орієнтована на загальний аналіз даних та алгоритмічні моделі вироблення рішень, які називаються «Системи підтримки прийняття рішень» (Decision Support Systems). Вони являють собою комп'ютерні автоматизовані системи, метою яких є допомога людям, котрі приймають рішення в складних умовах для повного та об'єктивного аналізу предметної діяльності. Системи підтримки прийняття рішень (СППР) виникли в результаті злиття управлінських інформаційних систем і систем управління базами даних [2].

Для аналізу та подання пропозицій в СППР використовуються різні методи: інформаційний пошук, інтелектуальний аналіз даних, пошук знань у базах даних, міркування на основі прецедентів, імітаційне моделювання, еволюційні обчислення, генетичні алгоритми, нейронні мережі, ситуаційний аналіз, когнітивне моделювання та ін. Деякі з цих методів розробля-

ються в рамках штучного інтелекту і носять назву інтелектуальних СППР або ІСППР [4, 5].

Першочерговою задачею при організації системи екологічного моніторингу придорожного простору автомобільних доріг є виявлення екологічно небезпечних та потенційно екологічно небезпечних ділянок автомобільної дороги для розміщення на них пунктів екологічного моніторингу. Враховуючи складність та тривалість проведення експериментальних досліджень; нелінійність зміни вхідних параметрів та фактичну неможливість внутрішнього відстеження змін систем зв'язків доцільно синтезувати відповідну нейронну мережу, яка б за умов неповноти та розмитості інформації розраховувала якість придорожного простору – здійснювала дорадчо-експертні функції, використовуючи як критерій достовірності та реальності результатів результати експериментальних досліджень.

Результати досліджень. Згідно з вимогами побудови цієї моделі були виділені 5 змінних параметрів, що будуть у неї закладені. Працюватиме модель за визначених стабільних умов відносно зони дорожньо-кліматичного районування, категорії дороги та типу покриття.

У процесі синтезу ймовірнісної нейронної мережі оцінки якості придорожного простору як вхідні використали величини: середню швидкість руху транспортного потоку; рівність; інтенсивність; міжремонтні строки експлуатації; поздовжній похил (таблиця).

Фактичні та нормативні діапазони зміни вхідних величин

С, км/год	Р, см/км	І, авт./добу	М, роки	П, ‰
23 – 105	45 – 160	839 – 11162	1 – 29	0 – 20

Вхідними даними для мережі є номер категорії (образу), до якої належить одержаний набір вхідних величин. Нейромережевий шар додавання має по одному елементу для кожної категорії з навчальної множини даних – 3. До всіх елементів цього шару йдуть зв'язки тільки від елементів шару зразків, що належать до відповідного образу. Активність елемента шару зразків визначається за формулою.

$$O_j = \exp\left(-\frac{\sum (w_{ij} - x_i)^2}{\sigma^2}\right), \quad (1)$$

де w – значення вагових коефіцієнтів; σ – параметр, який задає ширину функцій; x_i – невідомий вхідний зразок.

Вагові значення зв'язків, що йдуть від елементів шару зразків до елементів шару додавання, фіксуються рівними 1. Елемент шару додавання підсумовує вихідні значення елементів шару зразків. Ця сума дає оцінку значення функції щільності розподілу ймовірності для сукупності примірників відповідній категорії. Вихідні елементи являють собою дискримінатори порогової величини, що вказують елемент шару додавання з максимальним значенням активації (тобто вказують на одну із 3-х категорій).

У контексті завдань роботи необхідна не стільки дискретна класифікація, скільки отримання значення виходу шару додавання, який вираховує щільності розподілу ймовірності для сукупності примірників відповідної категорії. Тобто на виході цього шару є можливість відслідковувати динаміку зміни або потенційної зміни належності до однієї з 3-х категорій. При цьому воно відбуватиметься не суворим вказанням категорій, а ймовірності належності. Створивши певну градувальну шкалу, можна з точки зору Байєсівської статистики знати кількісну оцінку забрудненості.

Певним недоліком такого підходу є відсутність статистичної бази, яка б охоплювала весь теоретично можливий діапазон значень оцінки якості придорожнього простору: 1,0 – 4,0 балів. Однак для дослідження вибрано типові ділянки автомобільних доріг, за якими можна з певною вірогідністю робити висновок про інші у межах відповідного регіону. Враховуючи особливість моделювання із використанням нейронних мереж, їхню здатність до узагальнюючого, неформалізованого та наближеного висновку, можна стверджувати, що достатньо точне моделювання здійснюватиметься у діапазоні більшому як мінімум на 20 % від опрацьовуваного: 1,35 – 3,45 балів.

Для синтезу та дослідження відповідної нейронної мережі використовувався програмний пакет Statistica 7.0 Neural Networks. Функціональним критерієм є мінімізація помилки нейронної мережі за відсутності її перенавчання.

З метою перевірки роботи нейронної мережі у кожному із категоріальних блоків під час навчання довільно були виключені по два набори вхідних даних та вихідних змінних для їх використання при перевірці роботи синтезованої ймовірнісної нейронної мережі.

Архітектура ймовірнісної мережі, побудована у рамках роботи, містить: 5 нейронів вхідного шару, 51 нейрон шару розрахунку щільності розподілу та 3 вихідних нейрони (рис. 1).

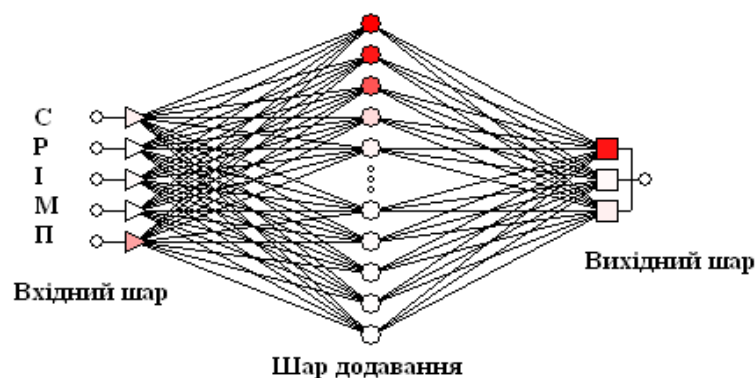


Рис. 1. Архітектура ймовірнісної нейронної мережі оцінки якості придорожнього простору

Оптимізація параметрів нейромоделі здійснюється на основі лінійних підходів та методу імітації «відпалювання» стосовно розподілу ймовірностей Гіббса:

$$P(\bar{x}^* \rightarrow \bar{x}_{i+1} | \bar{x}_i) = \begin{cases} 1, F(\bar{x}^*) - F(\bar{x}_i) < 0 \\ \exp\left(-\frac{F(\bar{x}^*) - F(\bar{x}_i)}{Q_i}\right), F(\bar{x}^*) - F(\bar{x}_i) \geq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

де $Q_i > 0$ – елементи довільно спадаючої до нуля послідовності; $F(x)$ – функція щільності ймовірностей.

Виходячи з емпіричних міркувань, значення коефіцієнта згладжування – 0,25.

Провівши створення та навчання ймовірнісної нейронної мережі оцінки якості придорожного простору, одержали такі значення середньоквадратичної похибки навчання в одиницях виходу: навчальний блок – 0,16 %; контрольний блок – 0,17 %; тестовий блок – 0,15 %. Тобто, нейронна мережа «не завчила» вибірку навчальних даних, точність класифікації становить 96,1 %. Якість моделювання, одержана при навчанні, задовольняє технологічним вимогам.

При цьому аналіз графіків розподілу ймовірностей показує, що нейронна мережа «відчуває» певну спорідненість ділянок «А» та «С» (рис. 2).

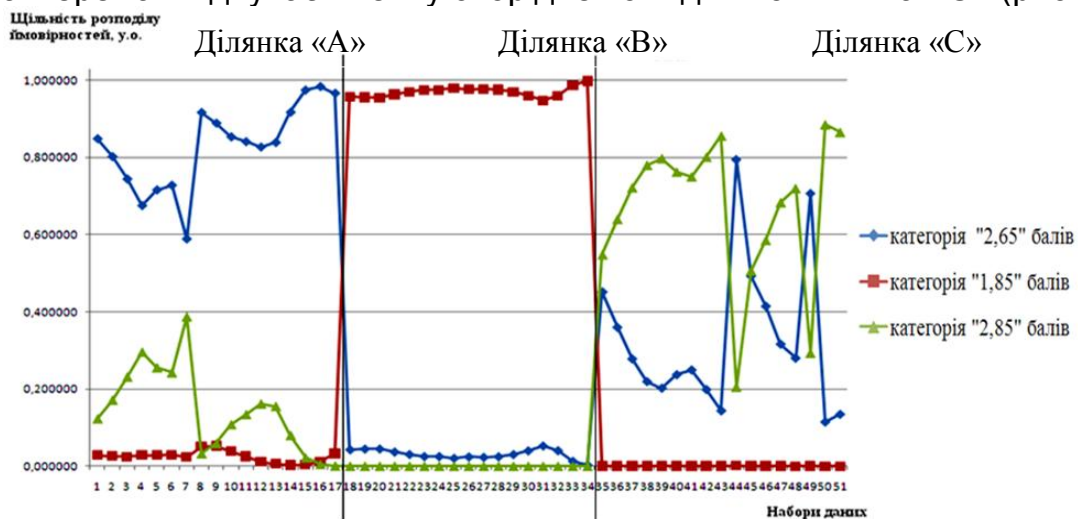


Рис. 2. Графіки щільності розподілу ймовірностей

Аналіз результатів, які були одержані під час перевірки роботи нейронної мережі на вибірках даних, які не використовувались під час навчання, показав погіршення якості моделювання, що є звичайним при опрацюванні мережею невідомих наборів. З шести наборів даних вірно класифіковано 5: точність функціонування створеної ймовірнісної нейронної мережі – 83,3 %. Також на 10 – 25 % зменшились значення щільності розподілу ймовірностей категорій-переможців. Однак у цілому якість моделювання залишилась достатньою для практичного застосування створеної нейронної мережі.

Наступним кроком є створення дорадчої системи генерування програмного коду нейронної мережі, який можна використовувати в інших середовищах, для чого були застосовані функціональні можливості пакета Statistica Neural Networks та перекодовано нейронну мережу на мову про-

грамування C++. Однак, враховуючи недостатню наповненість проблемної області експериментальними даними, на початковому етапі використання лише нейромережевої моделі для якісного аналізу буде недостатнім. Тому опрацювання виходу нейронної мережі здійснюватиме відповідне рівняння регресії (рис. 3), яке було одержано шляхом опрацювання вхідних даних (рис. 2).

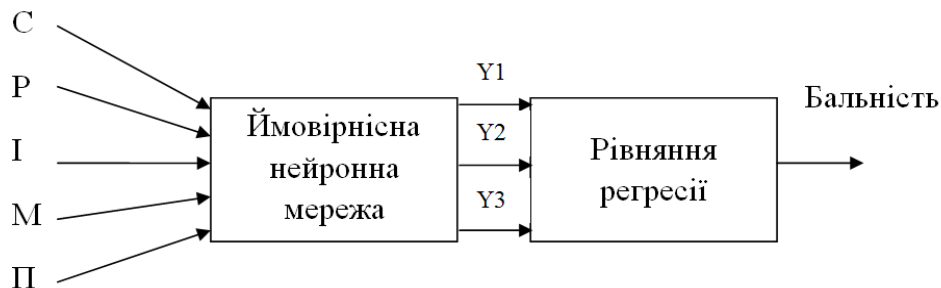


Рис. 3. Структура нейромережево-регресійної моделі оцінки якості придорожнього простору

Незалежними змінними є виходи трьох шарів додавання нейронної мережі (Y1, Y2, Y3), які вираховують щільності розподілу ймовірності для сукупності примірників відповідної категорії, залежною змінною – значення бальності.

Обробка експериментальних даних здійснювалась у програмному пакеті Statistica 7.0 Neural Network, одержано нелінійне рівняння регресії для бальності; при рівні ймовірності 0,95, коефіцієнті множинної детермінації 0,997, коефіцієнті множинної кореляції 0,998, стандартному відхиленні оцінки 0,126 (рис. 4).

$$B = -3,60804 + 13,02108 \cdot Y1 - 6,76729 \cdot Y1^2 - 0,8476 \cdot Y2 + 6,26728 \cdot Y2^2 + 6,45207 \cdot Y3^2 \quad (4)$$

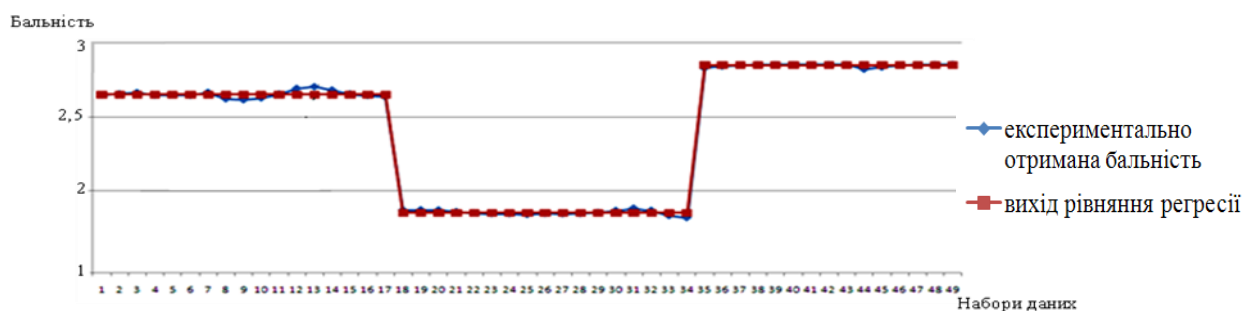


Рис. 4. Порівняння експериментальних даних із виходом рівняння регресії

Практичне використання включатиме ряд етапів (рис. 5), завдання яких, виходячи з недостатньої кількості інформації, буде напрацювання нових даних та підлаштування вже створеної ймовірнісної нейронної мережі [1, 3, 6].

Експертна оцінка проводитиметься при недостатності статистичних матеріалів, виходячи із щільності розподілу ймовірностей щодо відомих категорій (балів) – близькості до них. При відносній однаковості розподілу

вибиратиметься група схожих категорій, до яких буде найближчою апостеріорна ймовірність.

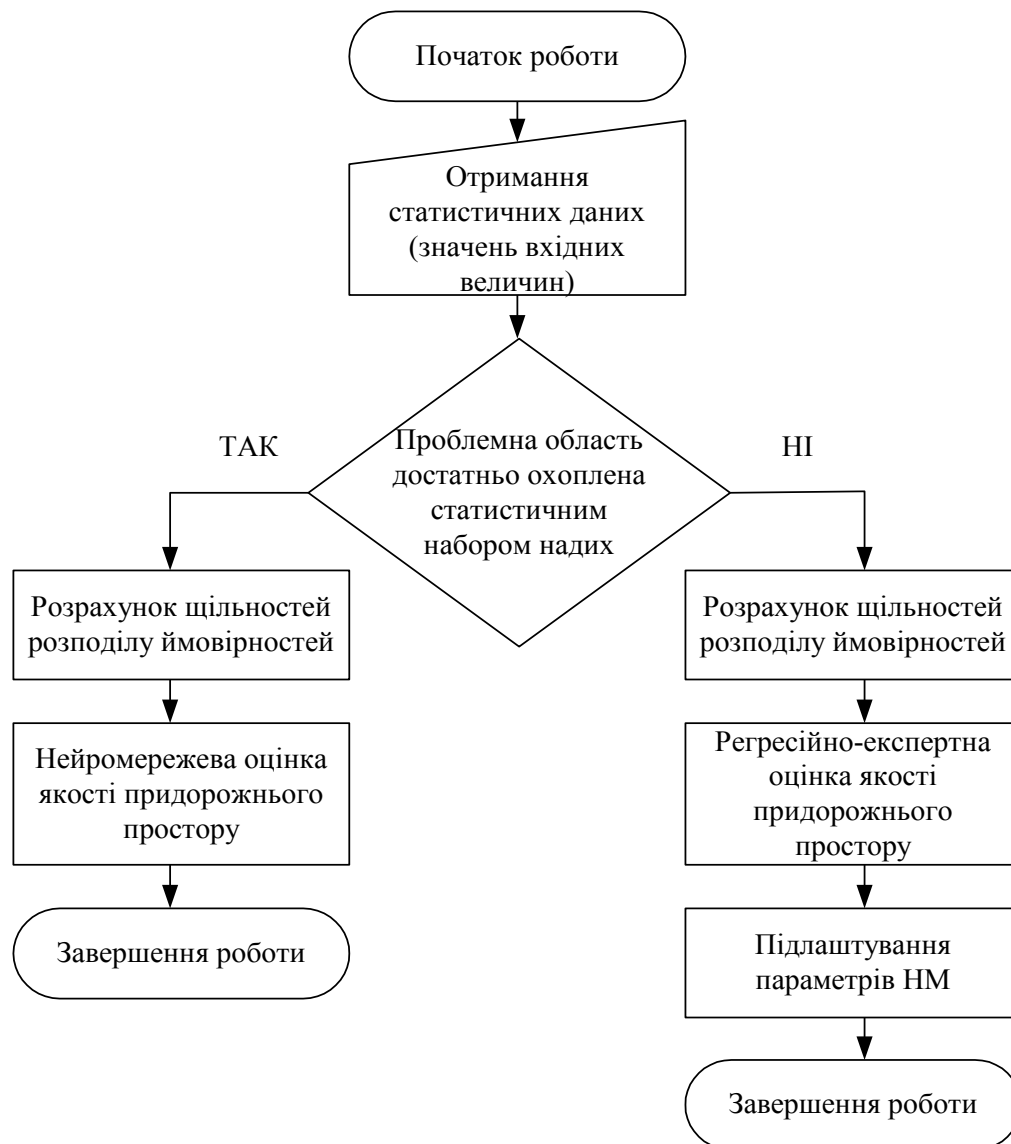


Рис. 5. Блок-схема алгоритму використання неймережевої оцінки якості придорожнього простору

Отже, ймовірнісні нейронні мережі доцільно використовувати для оцінки якості придорожнього простору, що підтверджується якістю моделювання на навчальних (точність – 96,1 %) та вибірках, що раніше не досліджувалися (точність – 83,3 %). Практичне використання розробленої ймовірнісної нейронної мережі вимагатиме значного доповнення статистичних матеріалів проблемної області.

Висновки

1. Саме інформаційні системи третього покоління за своїми можливостями і потужністю відповідають класу задач, що стоять перед системами екологічного управління. Впровадження таких систем має на меті надати нову якість управлінню, підвищити його оперативність, ефективність і за своїм ха-

рактором більше відповідає особливостям екологічного управління. В Україні такі методи мають у більшій мірі теоретичне застосування.

2. Більш практичне значення нині для систем вітчизняного екологічного управління має модернізація і розвиток спеціалізованих інформаційних систем екологічного спрямування, розглянутих ранише, а саме – державні природні кадастри, системи екологічного моніторингу, екологічного картографування, еколого-господарські баланси територій, геоінформаційні системи та інше.

3. Доведено доцільність застосування нейромережевого модулювання для розробки системи екологічного моніторингу автомобільних доріг в умовах неповноти та розмитості інформації.

Список літератури

1. Внукова Н. В. Вибір екологічно значимих параметрів автотранспортних систем для оцінки екологічної небезпеки придорожного простору / Н. В. Внукова, Г. М. Желновач // Екологічна безпека. – Кременчук: КрНУ, 2011. – №12. – С. 119–123.

2. Екологічне управління / [В.Я. Шевчук, Ю.М. Саталкін, О.Г. Білявський та ін.]. – К.: Либідь, 2004. – 432 с.

3. Желновач Г.М. Інформаційно-дорадча система аналізу стану придорожного середовища / Г.М. Желновач // Тези доповідей Міжнародної наук.-техн. конф. молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК». – К.: НУБіП України, 2013. – С. 75–76.

4. Круглов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.

5. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.

6. Штепа В. М. Ймовірнісна нейромережева модель оцінки стану придорожного середовища / В.М Штепа, Н.А. Заєць, Г.М. Желновач // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Серія "Технічні науки." – Харків: СПДФО «Черв'як», 2011. – Вип. 117 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – С. 120–122.

Рассмотрены особенности применения информационных систем в экологическом управлении. Установлена целесообразность использования нейросетевого моделирования для разработки системы экологического мониторинга на примере экологического мониторинга придорожного пространства автомобильных дорог.

Екологічне управління, інформаційна система, екологічний моніторинг, автомобільна дорога.

There was examined the features of information systems in environmental management. There was established the feasibility of neural network modeling for the environmental monitoring development as an example for environmental monitoring of highways roadside area.

Environmental management, information systems, environmental monitoring, highway.

РАСЧЁТ МАГНИТНОГО ПОТОКА ОТ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА В ФОРМЕ ЦИЛИНДРА ПРИ НАЛИЧИИ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

А.В. Жильцов, доктор технических наук
В.В. Ликтей, аспирантка*

Решена задача расчёта однородно-намагниченного постоянного магнита, расположенного между двумя ферромагнитными телами цилиндрической формы.

Магнитный поток, постоянные магниты, краевая задача, ферромагнетик.

В веществе вырезана бесконечно длинная цилиндрическая плоскость радиуса R_3 (статор). На её оси расположены два коаксиальных бесконечно длинных цилиндра с радиусами R_1 и R_2 (ротор), причем $R_1 < R_2 < R_3$ (рис.1).

Введем цилиндрическую систему координат с центром в точке O , расположенной на оси цилиндров. Пространство, задаваемое условием $r < R_1$ заполнено ферромагнетиком ($\mu = \infty$), условием $R_1 < r < R_2$ постоянным магнитом с заданным вектором намагниченности $\vec{J}$ (система отсчёта выбрана таким образом, чтобы вектор $\vec{J}$ был перпендикулярен плоскости $\alpha = 0$), условием $R_2 < r < R_3$ — веществом с проницаемостью μ_0 , условием $r > R_3$ — ферромагнетиком ($\mu = \infty$) (см. рис.1). Обозначим выделенные области соответственно I, II, III, IV.

Цель исследований — постановка и решение краевой задачи расчёта магнитного поля однородно-намагниченного постоянного магнита цилиндрической формы в ферромагнетной полости.

Материалы и методика исследований. Задача состоит в отыскании потока Φ вектора магнитной индукции $\vec{B}$ через поверхность S_3' , которая (в цилиндрической системе координат) задается системой уравнений (см. рис.1):

$$\begin{cases} r = R_3; \\ 0 \leq \alpha \leq \pi; \\ 0 \leq z \leq 1. \end{cases} \quad (1)$$

Поток вектора $\vec{B}$ через S_3' определяется следующим образом [3]:

$$\Phi = \int_{S_3'} \vec{B} d\vec{s}. \quad (2)$$

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

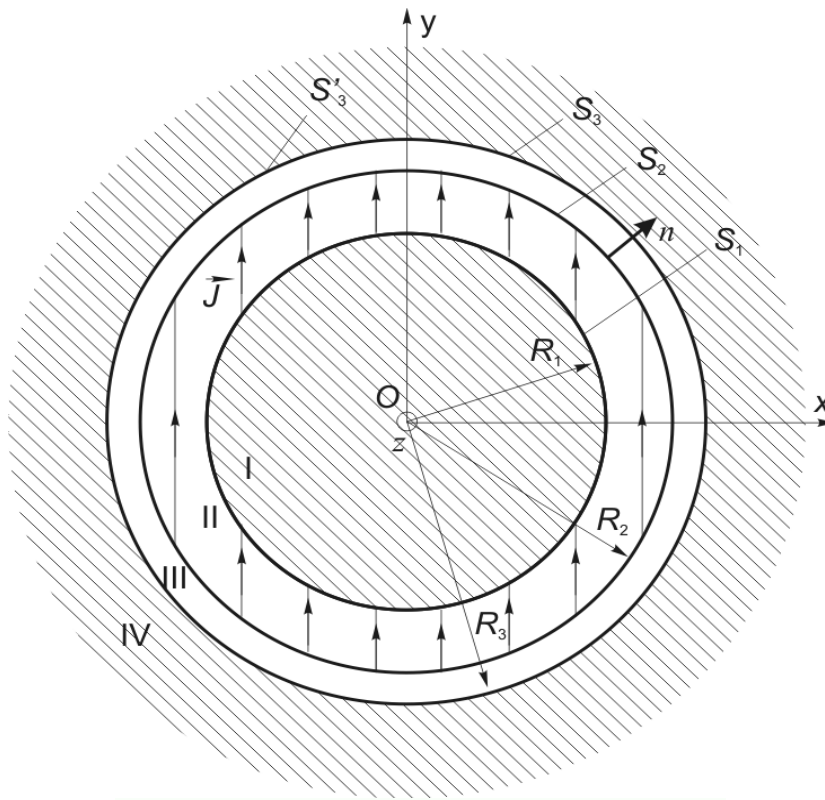


Рис 1. Сечение магнитной системы

Откуда видна необходимость знания поля $\vec{B}$ на S'_3 или, что тоже самое, в области III. Найти его однозначно, не зная его распределения в области II, не предоставляется возможным в силу теоремы однозначности разрешимости уравнений Максвелла [2]. Таким образом, задача сводится к отысканию поля $\vec{B}$ в кольце $R_1 < r < R_3$.

Для расчета магнитной индукции воспользуемся уравнениями Максвелла, записанными для постоянного магнитного поля:

$$\text{rot} \vec{H} = 0; \quad (3)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0; \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}. \quad (5)$$

Из первого уравнения этой системы следует, что для векторного поля $\vec{H}$ можем ввести скалярный магнитный потенциал φ по правилу:

$$\vec{H} = -\text{grad} \varphi. \quad (6)$$

При подстановке соотношения (6) в систему уравнений (3)–(5) первое из её уравнений удовлетворяется автоматически, а из второго уравнения получаем уравнение Лапласа:

$$\Delta \varphi = 0. \quad (7)$$

Запишем его для каждой из областей II и III:

$$\Delta \varphi_1 = 0; \quad (8)$$

$$\Delta \varphi_2 = 0, \quad (9)$$

где φ_1 – потенциал в области II; φ_2 – потенциал в области III.

Запишем граничные условия для скалярного потенциала φ . В силу принципа непрерывности потенциала на границе раздела двух сред имеем:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \text{ на } S_2, \quad (10)$$

где S_2 – граница раздела сред II и III.

Из условия непрерывности нормальной составляющей вектора $\vec{B}$ на границе раздела двух сред, имеем:

$$B_{2n} = B_{3n} \text{ на } S_2, \quad (11)$$

где B_{2n}, B_{3n} – нормальная компонента на границе S_2 при стремлении к ней соответственно из второй и третьей областей.

Учитывая уравнение связи (5), а так же то, что в области III $J=0$, получаем:

$$\mu_0 H_{2n} + \mu_0 \vec{j} \vec{n} = \mu_0 H_{3n} \text{ на } S_2, \quad (12)$$

где $\vec{n}$ – внешняя к поверхности S_2 нормаль (см. рис. 1).

Из (6), (12) следует второе граничное условие для скалярного магнитного потенциала:

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial n} - \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = -\vec{j} \vec{n}. \quad (13)$$

Пусть S_1 – граница между средами I и II; S_3 – средами III и IV (см. рис.1). В областях I и IV считаем $\mu=\infty$, т.е. напряженность магнитного поля H_1, H_2 в них равна нулю:

$$H_1 = H_4 = 0. \quad (14)$$

Из условия непрерывности тангенциальной составляющей вектора $\vec{H}$ на границе раздела сред с различной магнитной проницаемостью, имеем:

$$H_{1\tau} = H_{2\tau} \text{ на } S_1; \quad (15)$$

$$H_{3\tau} = H_{4\tau} \text{ на } S_3. \quad (16)$$

Но в силу (14) и (6) получаем:

$$\varphi_1 = C_1 \text{ на } S_1; \quad (17)$$

$$\varphi_2 = C_2 \text{ на } S_3, \quad (18)$$

где C_1 и C_2 – некоторые константы.

Рассмотрим плоскость zOx (см. рис.1). Она будет эквипотенциальной вследствие того, что линии векторного поля $\vec{H}$ пронизывают её под прямым углом. Таким образом:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = C \text{ на } zOx, \quad (19)$$

где C – некоторая константа, которую мы можем принять равной нулю, т.е.:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = 0 \text{ на } zOx. \quad (20)$$

Так как плоскость zOx пересекает поверхности S_1 и S_3 , то из (17), (18) и (20) следует:

$$\varphi_1 = 0 \text{ на } S_1; \quad (21)$$

$$\varphi_2 = 0 \text{ на } S_3. \quad (22)$$

Уравнения (8), (9) плюс граничные условия (10), (13), (21), (22) позволяют однозначно найти скалярные потенциалы φ_1 , φ_2 .

И так имеем следующую краевую задачу

$$\Delta\varphi_1=0 \text{ в области II}; \quad (23)$$

$$\Delta\varphi_2=0 \text{ в области III}; \quad (24)$$

$$\varphi_1=\varphi_2 \text{ на } S_2; \quad (25)$$

$$\frac{\partial\varphi_2}{\partial n} - \frac{\partial\varphi_1}{\partial n} = -\vec{j}\vec{n} \text{ на } S_2; \quad (26)$$

$$\varphi_1=0 \text{ на } S_1; \quad (27)$$

$$\varphi_2=0 \text{ на } S_3. \quad (28)$$

Решим уравнение (23) методом разделения переменных [4]. В цилиндрической системе координат уравнение (23) имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial\varphi_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2\varphi_1}{\partial\alpha^2} + \frac{\partial^2\varphi_1}{\partial z^2} = 0. \quad (29)$$

Заметим, что потенциал φ_1 не зависит в рассматриваемом случае от z , так как его распределение одинаково в любой плоскости, параллельной плоскости $z=0$. Значит последнее слагаемое в левой части уравнения (29) обращается в ноль. Уравнение (29) принимает вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial\varphi_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2\varphi_1}{\partial\alpha^2} = 0. \quad (30)$$

Решение уравнения (30) будем искать в виде

$$\varphi_1 = A \alpha R r, \quad (31)$$

где $A \alpha$ – зависит только от α , $R r$ – только от r .

Представляем предполагаемый вид решения (31) в исходное уравнение (30), получаем после дифференцирования:

$$\frac{1}{r} A \alpha \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} R r \frac{\partial^2 A \alpha}{\partial\alpha^2} = 0. \quad (32)$$

Умножим обе части уравнения (32) на $\frac{r^2}{A \alpha R r}$, получим:

$$\frac{r}{R r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R r}{\partial r} \right) + \frac{1}{A \alpha} \frac{\partial^2 A \alpha}{\partial\alpha^2} = 0. \quad (33)$$

Откуда получаем:

$$\frac{r}{R r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R r}{\partial r} \right) = - \frac{1}{A \alpha} \frac{\partial^2 A \alpha}{\partial\alpha^2}. \quad (34)$$

Слева в уравнении (34) стоит функция, которая зависит только от r , справа – только от α . Равенство (34) возможно лишь в том случае, если обе они равны константе.

Таким образом:

$$\frac{r}{R} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R}{\partial r} \right) = k; \quad (35)$$

$$-\frac{1}{A} \frac{\partial^2 A}{\partial \alpha^2} = k, \quad (36)$$

где k – пока что неизвестная константа.

Так как $\varphi_1(r, \alpha + 2\pi) = \varphi_1(r, \alpha)$, то $A(r, \alpha + 2\pi) = A(r, \alpha)$. Таким образом, из уравнения (36), которое можно переписать в виде

$$A''(\alpha) + kA(\alpha) = 0, \quad (37)$$

находим $\sqrt{k} = n$, где n – целое число, а

$$A_n(\alpha) = a_n \cos n\alpha + b_n \sin n\alpha. \quad (38)$$

Далее, из (35), полагая $R(r) = r^\lambda$, получаем

$\lambda^2 = n^2$, то есть $\lambda = \pm n$, $n > 0$, и, следовательно

$$R_n(r) = ar^n + br^{-n}. \quad (39)$$

При $n=0$ $k=0$ из (35) находим

$$R_0(r) = C_0 \ln r + C. \quad (40)$$

Решение уравнения (8) в области $R_1 < r < R_3$ при заданных краевых условиях ищем в виде ряда:

$$\varphi_1(r, \alpha) = a_0 \ln r + b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} r^n [a_n^+ \sin n\alpha + b_n^+ \cos n\alpha] + r^{-n} [a_n^- \sin n\alpha + b_n^- \cos n\alpha]. \quad (41)$$

Очевидно, решение уравнения (9) ищем в виде:

$$\varphi_2(r, \alpha) = c_0 \ln r + d_0 + \sum_{n=1}^{\infty} r^n [c_n^+ \sin n\alpha + d_n^+ \cos n\alpha] + r^{-n} [c_n^- \sin n\alpha + d_n^- \cos n\alpha]. \quad (42)$$

Коэффициенты $a_0, b_0, a_n^+, b_n^+, a_n^-, b_n^-, c_0, d_0, c_n^+, d_n^+, c_n^-, d_n^-$, $n=1,2,3,\dots$ определим из граничных условий (10), (13), (21), (22).

Из граничного условия (10):

$$\begin{aligned} & a_0 \ln R_2 + b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} R_2^n [a_n^+ \sin n\alpha + b_n^+ \cos n\alpha] + R_2^{-n} [a_n^- \sin n\alpha + b_n^- \cos n\alpha] = \\ & = c_0 \ln R_2 + d_0 + \sum_{n=1}^{\infty} R_2^n [c_n^+ \sin n\alpha + d_n^+ \cos n\alpha] + R_2^{-n} [c_n^- \sin n\alpha + d_n^- \cos n\alpha] \end{aligned}$$

Откуда,

$$a_0 \ln R_2 + b_0 = c_0 \ln R_2 + d_0; \quad (43)$$

$$R_2^n [a_n^+ - c_n^+] + R_2^{-n} [a_n^- - c_n^-] = 0, n=1,2,3,\dots; \quad (44)$$

$$R_2^n b_n^+ - d_n^+ + R_2^{-n} b_n^- - d_n^- = 0, n=1,2,3,\dots \quad (45)$$

Из уравнения (26) находим:

$$\frac{c_0 - a_0}{R_2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[n R_2^{n-1} c_n^+ - a_n^+ \sin n\alpha + d_n^+ - b_n^+ \cos n\alpha + \right. \\ \left. + n R_2^{-n-1} c_n^- - a_n^- \sin n\alpha + d_n^- - b_n^- \cos n\alpha \right] = -J \sin \alpha. \quad (46)$$

Из последнего уравнения:

$$c_0 = a_0; \quad (47)$$

$$n R_2^{n-1} c_n^+ - a_n^+ - n R_2^{-n-1} c_n^- - a_n^- = 0, n=2,3,4,\dots; \quad (48)$$

$$R_2^0 c_1^+ - a_1^+ - R_2^{-2} c_1^- - a_1^- = -J; \quad (49)$$

$$n R_2^{n-1} d_n^+ - b_n^+ - n R_2^{-n-1} d_n^- - b_n^- = 0, n=1,2,3,\dots \quad (50)$$

Условия (27), (28) соответственно запишутся:

$$a_0 \ln R_1 + b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} R_1^n a_n^+ \sin n\alpha + b_n^+ \cos n\alpha + R_1^{-n} a_n^- \sin n\alpha + b_n^- \cos n\alpha = 0$$

;

$$c_0 \ln R_3 + d_0 + \sum_{n=1}^{\infty} R_3^n c_n^+ \sin n\alpha + d_n^+ \cos n\alpha + R_3^{-n} c_n^- \sin n\alpha + d_n^- \cos n\alpha = 0$$

.

Куда следует:

$$a_0 \ln R_1 + b_0 = 0; \quad (51)$$

$$R_1^n a_n^+ + R_1^{-n} a_n^- = 0, n=1,2,3,\dots; \quad (52)$$

$$R_1^n b_n^+ + R_1^{-n} b_n^- = 0, n=1,2,3,\dots; \quad (53)$$

$$c_0 \ln R_3 + d_0 = 0; \quad (54)$$

$$R_3^n c_n^+ + R_3^{-n} c_n^- = 0, n=1,2,3,\dots; \quad (55)$$

$$R_3^n d_n^+ + R_3^{-n} d_n^- = 0, n=1,2,3,\dots \quad (56)$$

Решим систему уравнений (43) – (56) для $n=0$. Имеем:

$$a_0 \ln R_2 + b_0 = c_0 \ln R_2 + d_0; \quad (57)$$

$$c_0 = a_0; \quad (58)$$

$$a_0 \ln R_1 + b_0 = 0; \quad (59)$$

$$c_0 \ln R_3 + d_0 = 0. \quad (60)$$

Очевидно, что эта система имеет правильное нулевое решение, т. е.

$$a_0 = b_0 = c_0 = d_0 = 0.$$

Если $n=1$, то имеем систему уравнений:

$$R_1 a_1^+ + R_1^{-1} a_1^- = 0; \quad (61)$$

$$R_3 c_1^+ + R_3^{-1} c_1^- = 0; \quad (62)$$

$$R_2 a_1^+ - c_1^+ + R_2^{-1} a_1^- - c_1^- = 0; \quad (63)$$

$$R_2^0 c_1^+ - a_1^+ - R_2^{-2} c_1^- - a_1^- = -J, \quad (64)$$

$$R_1 b_1^+ + R_1^{-1} b_1^- = 0; \quad (65)$$

$$R_3 d_1^+ + R_3^{-1} d_1^- = 0; \quad (66)$$

$$R_2 b_1^+ - d_1^+ + R_2^{-1} b_1^- - d_1^- = 0; \quad (67)$$

$$d_1^+ - b_1^+ - R_2^{-2} d_1^- - b_1^- = 0. \quad (68)$$

Сложим (67) и (68):

$$2 b_1^+ - d_1^+ = 0, \text{ т.е. } b_1^+ = d_1^+. \quad (69)$$

Подставляя (69) в (67) получим :

$$b_1^- = d_1^-. \quad (70)$$

Перепишем (65), (66) с учетом (69) и (70):

$$R_1 b_1^+ + R_1^{-1} b_1^- = 0; \quad (71)$$

$$R_3 b_1^+ + R_3^{-1} b_1^- = 0. \quad (72)$$

Система линейных алгебраических уравнений (71), (72) однородная. Её определитель отличен от нуля. Следовательно, она имеет тривиальное (нулевое) решение.

Поэтому,

$$b_1^+ = b_1^- = d_1^+ = d_1^- = 0. \quad (73)$$

Решим систему уравнений (61) – (64). Вычтем из уравнения уравнение (64):

$$a_1^+ - c_1^+ = J/2. \quad (74)$$

Сложим уравнения (63) и (64), получим:

$$a_1^- - c_1^- = -JR_2^2/2. \quad (75)$$

Учитывая (74) и (75) уравнения (61), (62) запишутся:

$$R_1 a_1^+ + R_1 a_1^- = 0; \quad (76)$$

$$R_3 \left(a_1^+ - \frac{J}{2} \right) + \frac{1}{R_3} \left(a_1^- + \frac{JR_2^2}{2} \right) = 0. \quad (77)$$

Выражая из уравнения (76) $a_1^+ = -a_1^-/R_1^2$ и подставляя в уравнение получаем:

$$R_3 \left(-\frac{1}{R_1^2} a_1^- - \frac{J}{2} \right) + \frac{1}{R_3} \left(a_1^- + \frac{JR_2^2}{2} \right) = 0. \quad (78)$$

Далее,

$$a_1^- \left(\frac{1}{R_3} - \frac{R_3}{R_1^2} \right) = -\frac{R_2^2}{2R_3} J + \frac{R_3}{2} J. \quad (79)$$

Откуда,

$$a_1^- = -\frac{R_2^2 - R_3^2}{2 R_1^2 - R_3^2} R_1^2 J. \quad (80)$$

Подставляя (80) в (76) найдем:

$$a_1^+ = \frac{R_2^2 - R_3^2}{2 R_1^2 - R_3^2} J. \quad (81)$$

Из соотношений (74), (81) получаем:

$$c_1^+ = -\frac{R_2^2 - R_1^2}{2 R_3^2 - R_1^2} J. \quad (82)$$

Из соотношений (75) и (80) находим:

$$c_1^- = \frac{R_2^2 - R_1^2}{2 R_3^2 - R_1^2} R_3^2 J. \quad (83)$$

Итак, система (61) – (68) решена.

Если $n=2,3,4,\dots$ то для нахождения коэффициентов в соотношениях (41) и (42) имеем совокупность систем уравнений:

$$R_1^n a_n^+ + R_1^{-n} a_n^- = 0; \quad (84)$$

$$R_3^n c_n^+ + R_3^{-n} c_n^- = 0; \quad (85)$$

$$R_2^n a_n^+ - c_n^+ + R_2^{-n} a_n^- - c_n^- = 0; \quad (86)$$

$$nR_2^{n-1} c_n^+ - a_n^+ - nR_2^{-n-1} c_n^- - a_n^- = 0, \quad (87)$$

$$R_1^n b_n^+ + R_1^{-n} b_n^- = 0; \quad (88)$$

$$R_3^n d_n^+ + R_3^{-n} d_n^- = 0; \quad (89)$$

$$R_2^n (b_n^+ - d_n^+) + R_2^{-n} (b_n^+ - d_n^+) = 0; \quad (90)$$

$$nR_2^{n-1} d_n^+ - b_n^+ - nR_2^{-n-1} d_n^- - b_n^- = 0. \quad (91)$$

Каждая из систем (84) – (87) и (88) – (91) решается аналогично (65) – (68), поэтому

$$a_n^+ = a_n^- = b_n^+ = b_n^- = c_n^+ = c_n^- = d_n^+ = d_n^- = 0, \quad n=2,3,4,\dots \quad (92)$$

Подставляя найденные коэффициенты в (41) и (42), получаем выражения для потенциалов в областях II и III (см. рис.1):

$$\varphi_1 = \frac{R_3^2 - R_2^2}{R_3^2 - R_1^2} \frac{J}{2} \left(r - \frac{R_1^2}{r} \right) \sin \alpha; \quad (93)$$

$$\varphi_1 = -\frac{R_2^2 - R_1^2}{R_3^2 - R_1^2} \frac{J}{2} \left(r - \frac{R_3^2}{r} \right) \sin \alpha. \quad (94)$$

Поле $\vec{H}$ в искомой области III определим из выражения $\vec{H} = -\text{grad}\varphi$. В выбранной нами системе координат:

$$-\text{grad}\varphi = -\frac{\partial\varphi}{\partial r}\vec{e}_r - \frac{\partial\varphi}{r\partial\alpha}\vec{e}_\alpha.$$

Таким образом,

$$\vec{H}_{III} = \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_3^2 - R_1^2} \frac{J}{2} \left[\vec{e}_r \left(1 + \frac{R_3^2}{r^2} \right) \sin \alpha + \vec{e}_\alpha \left(1 - \frac{R_3^2}{r^2} \right) \cos \alpha \right].$$

Магнитный поток через поверхность S_3' , задаваемую системой уравнений (1):

$$\Phi = \mu_0 \int_{S_3} \vec{H} d\vec{S}.$$

Учитывая, что элемент поверхности $d\vec{S} = \vec{e}_r R_3 d\alpha dz$, находим:

$$\Phi = \mu_0 \int_{S_3} \vec{H} \vec{e}_r R_3 d\alpha dz = -\mu_0 \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_3^2 - R_1^2} \frac{J}{2} 2R_3 \int_0^\pi \sin \alpha d\alpha \int_0^l dz.$$

Откуда находим:

$$\Phi = 2J\mu_0 R_3 \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_3^2 - R_1^2}. \quad (95)$$

Из формулы (95) следует, что максимальный магнитный поток при фиксированных радиусах R_2 , R_3 равен:

$$\Phi_{\max} = 2J\mu_0 \frac{R_2^2}{R_3}. \quad (96)$$

Из формулы (96) видно, что $\Phi_{\max}$ будет больше, насколько отношение R_2/R_3 ближе к единице, т.е. меньше зазор между ротором и статором.

Если ввести относительные величины равенствами:

$$R_{10} = \frac{R_1}{R_2}; R_{30} = \frac{R_3}{R_2}; \Phi_0 = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}}, \quad (97)$$

то формулу (95) можно переписать так:

$$\Phi_0 = \frac{1 - R_{10}^2}{R_{30}^2 - R_{10}^2} R_{30}^2. \quad (98)$$

Результаты исследований. График зависимости Φ_0 R_{10} для случая, когда $R_2 = 0,095$ м; $R_3 = 0,1$ м приведен на рис. 2.

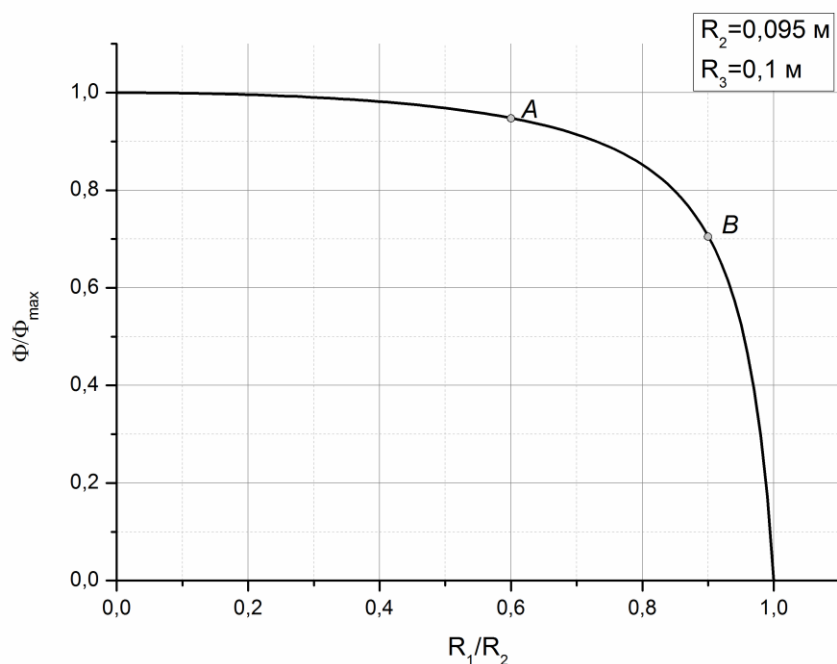


Рис. 2. График зависимости относительного магнитного потока от радиуса R_1 в относительных единицах

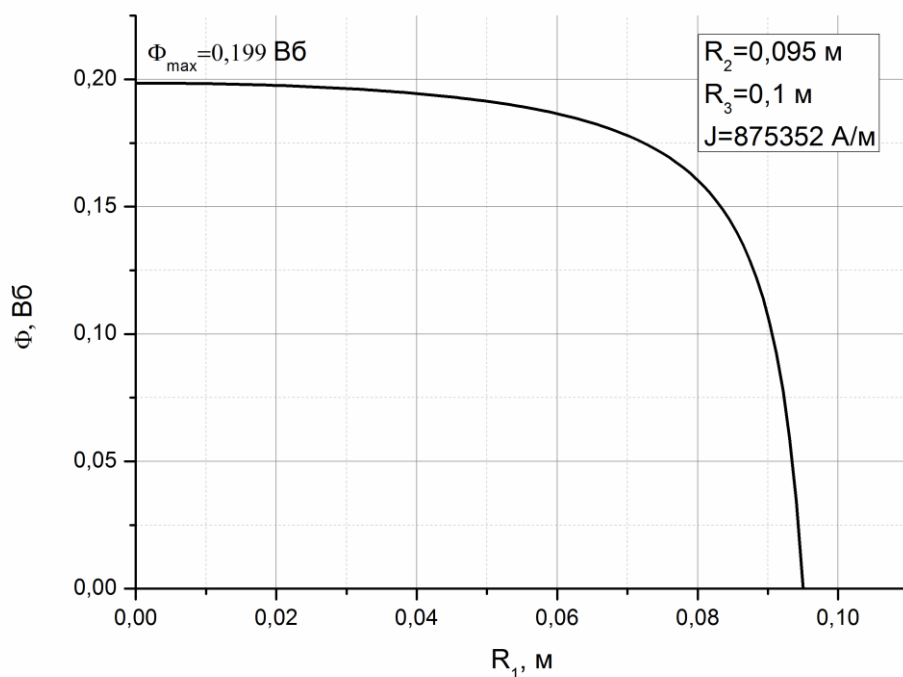


Рис. 3. График зависимости магнитного потока

Для экономии постоянного магнита внутренний цилиндр ротора может быть выполнен из стали. Радиус R_1 должен быть таким, чтобы магнитный поток был ближе к максимальному. Из рис. 2 видно, что этого можно достигнуть, выбрав рабочую точку на участке AB (в конкретном случае нужно учитывать как стоимость магнита, так и стали). На нём величи-

на магнитного потока будет отличаться от максимального не более чем на 30 %, в то время как R_1/R_2 лежит в пределах 0,6 – 0,9, т. е. $R_1 = 0,6R_2 \dots 0,9R_2$.

На рис. 3 приведен график зависимости ΦR_1 для случая, когда $J = 875352 \text{ А/м}$ (магниты FeNB); $R_2 = 0,1 \text{ м}$; $R_3 = 0,095 \text{ м}$.

Выводы

Решена краевая задача расчета магнитного поля постоянного однородно-намагниченного магнита цилиндрической формы в плоскости ферромагнетика. Получено аналитическое выражения для магнитного потока, создаваемого магнитной системой, которое позволило установить границы изменения внутреннего радиуса ферромагнитной вставки, на поверхности которой размещены постоянные магниты, из условия заданного отклонения магнитного потока от максимального его значения.

Список литературы

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. / Л. А. Бессонов. — М.: Высш. шк., 1964. — 749 с.
2. Стадник И.П. Электродинамика. Лекции с вопросами и задачами / И.П. Стадник. — К.: Техника, 2012. — 336 с.
3. Тамм И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм. — М.: Наука, 1991. — 504 с.
4. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики: учеб. пособие / А.Н Тихонов, А. А. Самарский. — [6-е изд., испр. и доп.]. — М. :Изд-во МГУ, 1999. — 799 с.

Вирішено задачу розрахунку однорідно-намагніченого постійного магніту, розміщеного між двома ферромагнітними тілами циліндричної форми.

Магнітний потік, постійні магніти, крайова задача, ферромагнетик.

The problem of calculation a uniformly magnetized magnet witch located between two ferromagnetic bodies of cylindrical shape was solved.

Magnetic flux, permanent magnets, boundary problem, ferromagnetic.

СУШІННЯ ТА ДЕЗІНСЕКЦІЯ ЗЕРНА ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОЛЕМ ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ

***Ю.Ф. Зіньковський, доктор технічних наук
Ю.К. Сидорук, кандидат технічних наук
А.О. Туровський, асистент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»***

Доведено доцільність застосування електричного поля високої частоти для сушіння та дезінсекції зерна. Запропоновано принцип побудови установки для опромінення зерна та інших сипучих матеріалів електричним полем високої частоти на основі багатофазної багатоелектродної структури. Використовуючи теорію інтегральних сингулярних рівнянь у вигляді задачі спряження, розраховано розподіл напруженості електричного поля в середині камери.

Електричне поле, висока частота, сушіння, дезінсекція, інтегральні сингулярні рівняння.

Використання сучасних досягнень технічних наук у сільському господарстві створює можливість вдосконалення технологій вирощування і зберігання вирощеної продукції. До таких новацій належать використання в агропромисловому комплексі електричного поля високої частоти (ВЧ) та електромагнітного поля надвисокої частоти (НВЧ) для передпосівної обробки насіння, сушіння зерна, ягід, фруктів, грибів, овочів, іншої продукції тощо.

Основними перевагами таких технологій є малі енергетичні затрати, можливість сушіння при зниженому тиску повітря, рівномірність нагрівання і відсутність перегріву в окремих зонах. При сушінні зерна знищуються патогенна мікрофлора та комахи-шкідники, що забезпечує значно кращу якість зерна і зменшує його втрати при зберіганні.

Важливою проблемою, яку необхідно вирішувати при закладанні зерна на зберігання та в процесі його зберігання, є сушіння та боротьба з комахами-шкідниками. Для захисту зерна від комах застосовують різні методи обробки: теплову, протруюванням отрутохімікатами та слабкою радіацією. Однак, ці способи є або малоефективними, або небезпечними для людини.

Великі переваги в дезінсекції притаманні способам, що ґрунтуються на використанні електричного поля високих частот (10 – 100 МГц). При аналізі дії електричного та електромагнітного полів на комах використовуються переважно теплова концепція, яка, однак, не відображає сутності процесів, що протікають у біологічних об'єктах. Є підстави вважати, що

струми, які протікають у тілі комах, руйнують важливі життєві центри, в тому числі клітини, і призводять до її загибелі ще до досягнення температури критичного для комах рівня.

Вивчення впливу ВЧ та НВЧ полів на комах-шкідників проводилося багатьма вченими, зокрема слід відзначити роботи [6, 8, 9], в яких зібрано значний обсяг матеріалу стосовно діелектричних властивостей зерна, комах та ефективних режимів їх знищення на всіх стадіях розвитку в пшениці, житі, ячменю тощо.

Доведено [8], що при певних режимах опромінення електричним полем високої частоти можна досягти повного знищення комах на всіх стадіях їх розвитку. Наприклад, при нагріванні зерна, зараженого рисовим довгоносом, амбарним довгоносом, мучним хрущак з використанням електричного поля частотою 39 МГц повне знищення досягалося за температури 39 °С, 41 °С та 47 °С, відповідно. З іншого боку зазначається, що для ефективного знищення цих комах звичайним нагріванням необхідна температура 61 °С при мінімальній витримці 10 хв, а для забезпечення того ж результату при використанні електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц температура зерна мала б досягти 57 °С. На користь ВЧ при боротьбі з комахами-шкідниками говорить і той факт, що при опроміненні ВЧ полем значна кількість комах гине і після опромінення. На рис. 1 наведено експериментальні криві залежності смертності дорослих комах рисового довгоносика при опроміненні зерна твердої озимої пшениці ВЧ та НВЧ полями в перший та восьмий день після опромінення [7, 8]. Видно, що опромінення полем ВЧ діапазону забезпечує знезараження при значно нижчих температурах, ніж при використанні поля НВЧ діапазону, до того ж має місце подальша смертність комах після обробки.

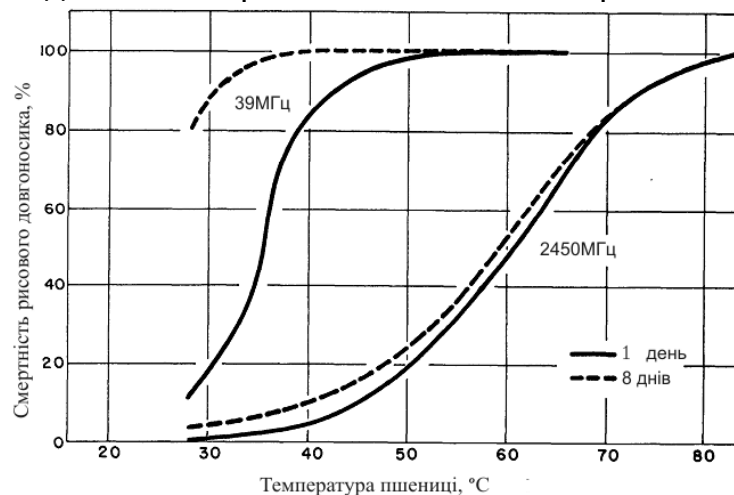


Рис. 1. Характеристики смертності комах при опроміненні зерна полем ВЧ та НВЧ

Підвищити ефективність впливу ВЧ опромінення на смертність комах вдається шляхом зниження тиску в камері опромінення. Так, при тиску 40 мм рт. ст. виникають плазмові мікророзряди в середовищі, які негативно діють на комах. Крім того, мікророзряди спричиняють синтез молекул озону, що

додатково пригнічує життєдіяльність живих організмів. При цьому ефекті для знищення комах достатньо експозиції 3 – 5 с. При сушінні зерна зниження тиску в активній камері призводить до зниження температури кипіння води, що значно збільшує ефективність пароутворення.

Мета досліджень – створення теоретичних та конструкційних основ розробки обладнання для сушіння та дезінсекції зерна електричним полем високої частоти.

Матеріали та методика досліджень. Однією з найважливіших технологічних особливостей апаратної реалізації сушіння і дезінсекції зерна є рівномірність нагрівання всієї маси об'єкта. Електричне поле, що є носієм енергії, в активній зоні, де відбувається взаємодія електричного поля з зерном, має бути суттєво однорідним.

При створенні ВЧ установок необхідно також враховувати, що навантаження генератора характеризується переважно ємнісним характером і при значній ємності електродів виникає складність узгодження генератора з навантаженням, що суттєво впливає на коефіцієнт корисної дії обладнання. З іншого боку, обмеження напруги на електродах і ємності електродів знижує продуктивність установки.

Результати досліджень. Найпростіший варіант електродної системи, в якій може існувати однорідне електричне поле, складається з двох металевих паралельно розташованих пластин. Щоб зменшити вплив крайових ефектів і забезпечити потрібну однорідність поля, необхідно значно збільшити розміри електродів, але при цьому значно збільшується і їх ємність.

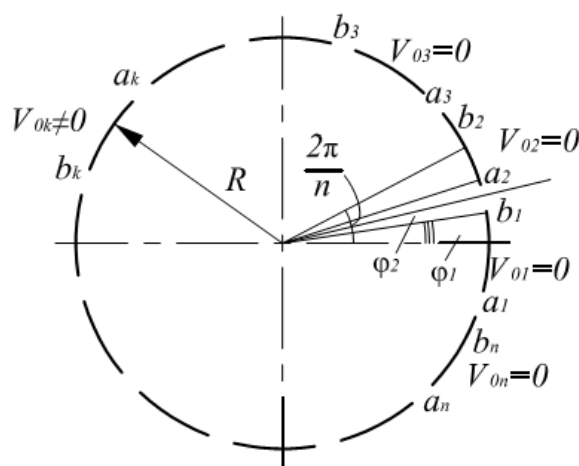


Рис. 2. Схема до опису задачі

Запропонована авторами електродна структура має в активній зоні високий ступінь однорідності електричного поля, вищу енергетичну ефективність і значно меншу ємність, порівняно з плоскими електродами, при однаковій продуктивності установок.

Теоретичний аналіз електричного поля в багатозв'язній електродній структурі. Електродна структура має n електродів, роз-

ташованих на поверхні циліндра радіусом R та довжиною l . Оскільки $l \gg R$, то при визначенні напруженості електричного поля і потенціалу в середині циліндра теоретично задача зводиться до плоскої задачі на комплексній необмеженій площині з n -зв'язною кільцевою границею L , радіусом R . Кільцева границя L розділена на окремі відрізки розімкнених дуг $L_1, L_2, \dots, L_n \in L$, що не мають спільних точок (рис. 2). Дуги $L_1, L_2, \dots, L_n$, що знаходяться в інтервалах $a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3, \dots, a_nb_n$, екіпотенціальні, тобто фізично мають нескінченно високу провідність. Потенціал кожної згаданої дуги, відповідно, дорівнює $V_{01}, V_{02}, \dots, V_{0n}$. Повна комплексна площина z розділена на дві симетричні відносно кола радіусом R області: зовнішню S^+ , для якої $|z| \geq R$, та внутрішню S^- , для якої $|z| \leq R$, де z – незалежна комплексна змінна. Визначається комплексний потенціал $\Phi(z) = U(z) + jV(z)$, де $V(z)$ – потенціал поля. Напруженість електричного поля $\vec{E}(z) = -j[\Phi'(z)]^*$, де $\Phi'(z)$ – похідна від потенціалу по z . $\vec{E}(z)$ є однозначною аналітичною функцією, а символ $[\dots]^*$ позначає комплексне спряження. Вказані функції задані у всіх точках відкритої n -зв'язної комплексної площини z [3].

Визначити напруженість електричного поля в цій електродній структурі можна методом теорії інтегральних сингулярних рівнянь [4], згідно з якою загальний вираз напруженості електричного поля має вигляд:

$$E(z) = X(z^*)P(z^*). \quad (1)$$

У цьому виразі

$$P(z^*) = \sum_{k=2}^n C_{k-1} (z^*)^{n-k}, \quad (2)$$

$$X(z^*) = \frac{C}{\sqrt{R(z^*)}}, \quad (3)$$

де k – номер відповідного електрода, $R(z^*) = \prod_{k=1}^n (z^* - a_k)(z^* - b_k)$, постійна

C визначається з умови на граничному колі і дорівнює $C = \sqrt[4]{\prod_{k=1}^n a_k b_k}$.

Подальші вирази напруженості електричного поля і потенціалу доцільно подати через нормовану змінну $Z = z/R$, що реалізується шляхом конформного відображення даної комплексної площини z на площину з одиничним граничним колом Z . Використавши вирази (1, 2, 3) і виконавши процедуру конформного відображення, одержимо вираз напруженості електричного поля [1]:

$$E(z_1) = \frac{\sqrt[4]{\prod_{k=1}^n a_k b_k}}{R} \frac{\sum_{k=2}^n C_{k-1} (Z^*)^{n-k}}{\sqrt{\prod_{k=1}^n (Z^* - a_k)(Z^* - b_k)}}. \quad (4)$$

Відповідно, потенціал

$$V = -\operatorname{Re} \left[\frac{\sqrt[4]{\prod_{k=1}^n a_k b_k}}{R} \int_z \frac{\sum_{k=2}^n C_{k-1} (Z^*)^{n-k} dZ^*}{\sqrt{\prod_{k=1}^n (Z^* - a_k)(Z^* - b_k)}} \right]^* . \quad (5)$$

Отримані вище вирази можуть бути використані як вихідні для розрахунку напруженості електричного поля і потенціалу в кожній точці області Z при довільному розподілі точок a_k та b_k на граничному колі L , а також при довільному розподілі потенціалів між граничними дугами L_k . Але в цій електродній структурі згідно з постановкою задачі необхідно створити однорідне електричне поле, що можливо лише при $L_1=L_2=L_3=\dots=L_m$ та при однакових проміжках між ними $b_1 a_2 = b_2 a_3 = \dots = b_n a_1$. Позначимо кутом $2\varphi_1$ кут, на який спирається дуга L_k , а кутовий проміжок між дугами L_k і L_{k+1} кутом $2\varphi_2$, кутова відстань між серединами сусідніх дуг – $2\pi/n$ (рис. 2). Кожна дуга має потенціал $V_{01}, V_{02}, \dots, V_{0n}$, відповідно. В зв'язку з прийнятою лінійністю середовища, в якому визначаються основні параметри електричного поля, його напруженість і потенціал в заданій структурі при довільному розподілі напруги між дугами L_k можна знайти як суму напруженостей і потенціалів, одержаних при часткових розв'язках задачі, коли лише одна дуга L_k має потенціал V_{0k} , а решта дуг мають нульовий потенціал. При цих умовах вираз напруженості електричного поля (4) приймає вигляд:

$$E(Z^*) = \frac{1}{R} \frac{\sum_{i=2}^n C_{i-1} (Z^*)^{n-i}}{\sqrt{Z^{*2n} - 2Z^{*n} \cos n\varphi_1 + 1}} . \quad (6)$$

Структура електричного поля симетрична відносно дуги L_k , що має потенціал V_{0k} , тому симетричні коефіцієнти мають бути однаковими: $C_1=C_{n-1}$, $C_2=C_{n-2}$ і т.д. При цьому кількість невідомих коефіцієнтів зменшується до $N=n/2$ при парному значенні n та $N=(n+1)/2$ при непарному значенні n .

Після виконання симетризації граничних умов відносно осі дуги L_k і з врахуванням наведеного вище, вираз (6) прийме вигляд:

$$\dot{E}(Z)_k = \frac{(-1)^{k-1}}{R} Z^{* \frac{n-1}{2}} \frac{\sum_{i=1}^N C_i \left\{ Z^{* \frac{n-i}{2}} e^{j \left(\frac{n-i}{2} \right) \frac{2\pi}{n} (k-1)} + Z^{* \frac{n+i}{2}} e^{-j \left(\frac{n-i}{2} \right) \frac{2\pi}{n} (k-1)} \right\}}{\sqrt{Z^{*2n} - 2Z^{*n} \cos n\varphi_1 + 1}} . \quad (7)$$

На граничному колі змінна $Z = t = \exp(j\varphi)$. Підставляючи значення t в (7) замість Z і використовуючи перетворення Ейлера, одержимо вираз напруженості електричного поля на граничному колі:

$$E_\varphi(t)_k = \frac{(-1)^{k-1}}{R} \sqrt{2} \times \frac{\sum_{i=1}^N C_i \cos(n/2 - i) [\varphi - 2\pi(k-1)]}{\sqrt{\cos n\varphi - \cos n\varphi_1}} . \quad (8)$$

Вираз (8) використовується для визначення невідомих коефіцієнтів C_i . Це відбувається шляхом інтегрування $E_\phi(t)_k$ у межах вузлів $b_k a_{k+1}$, різниці потенціалів між якими відома. Оскільки кількість таких проміжків становить N , то кількість лінійних незалежних рівнянь, з яких визначаються N невідомих коефіцієнтів C_i , також дорівнює N . Система рівнянь порядку N для визначення невідомих коефіцієнтів C_i записується так:

$$\sum_{i=1}^N C_i \sin i \frac{\pi}{n} (2p-1) P_{-i/n}(\cos n\phi_2) = \frac{n V b_{k+p-1} a_{k+p}}{2\pi}, \quad (9)$$

де $P_{-i/n}(\cos n\phi_2)$ – функція Лежандра порядку $(-i/n)$; $p = 1, 2, \dots, N$. У цій системі кожне рівняння визначається цілим числом p , яке змінюється від 1 до N і лише перше рівняння, для якого $p=1$, має праву частину, тобто $V_{0k} \neq 0$, в решті рівнянь, для яких $p>1$, права частина дорівнює нулю. Детальне математичне обґрунтування цих виразів викладено раніше у [2].

Вищу ступінь однорідності електричного поля у внутрішній частині області z ($r < R$) можна досягти, забезпечивши рівномірне обертання поляризації електричного поля. Це можливо, якщо забезпечити синхронізоване живлення усіх електродів гармонійною напругою зі зміщенням фази, що відповідає кутовому положенню відповідного електрода на колі:

$$V_{0k} = V_{0m} \sin[\Omega t + (k-1) 2\pi/n], \quad (10)$$

де Ω – колова частота напруги живлення електродів. Це призведе до того, що картина розподілу поля між електродами буде обертатися з частотою Ω , що актуально при обробленні дисперсних об'єктів продовгуватої форми.

Оскільки $C_i = V_{0k} F_i$, а $F_i = -n/2\pi \cdot A/A_i \cdot 1/P_{-i/n}(\cos n\phi_2)$, де A та A_i – відповідно, визначник та алгебраїчне доповнення його i -го елемента. У зв'язку з цим вираз (7) після підстановки в нього (10) та знаходження сумарного поля, що створюється всіма n граничними дугами, тобто після знаходження відповідної суми по k , приймає вигляд:

$$E(Z)_n = \frac{n V_{0m}}{2 R} F_1 \left[\frac{\sin \Omega t (1 + Z^{*(n-2)}) + j \cos \Omega t (1 - Z^{*(n-2)})}{\sqrt{Z^{*2n} - 2Z^{*n} \cos n\phi_2 + 1}} \right], \quad (11)$$

Розрахунок напруженості електричного поля згідно з виразом (11) свідчить, що при малих значеннях n електричне поле у внутрішній частині області ($r < R$) комплексної площини z суттєво неоднорідне, але при збільшенні n з'являється зона, в якій поле має високу однорідність, що зростає зі збільшенням n . Для показу цього на рис. 3 наведені результати розрахунків $|E(z)|$ в графічній формі для $n=8$. Видно, що при $n=8$ радіус зони однорідності $r_{од} = 0,6R$, тоді як при $n=4$ зона однорідності практично відсутня. З подальшим збільшенням n розмір зони однорідності зростає.

Принцип побудови приладу для опромінення зерна електричним полем високої частоти. Основою пристрою є електродна система, яка має циліндричну форму. Електроди виконані в формі тонких металевих смуг з дуговим поперечним перетином, розташованих у діелектричній оболонці 1, 3 (рис. 4). Діелектрична оболонка (труба), в середині якої знаходиться зерно або інший сипучий матеріал, що підлягає опроміненню, орієнтована вертикально так, що зерно рухається в ній під дією сили тя-

жіння. Розташування електродів у середині суцільного діелектричного циліндра створює умови високої електричної міцності і, відповідно, безпеки при подачі на електроди високої напруги. Електроди мають однаковий розмір, кут між серединами електродів дорівнює $2\pi/n$. Зовні електродна система закрыта металевим екраном 4 [5].

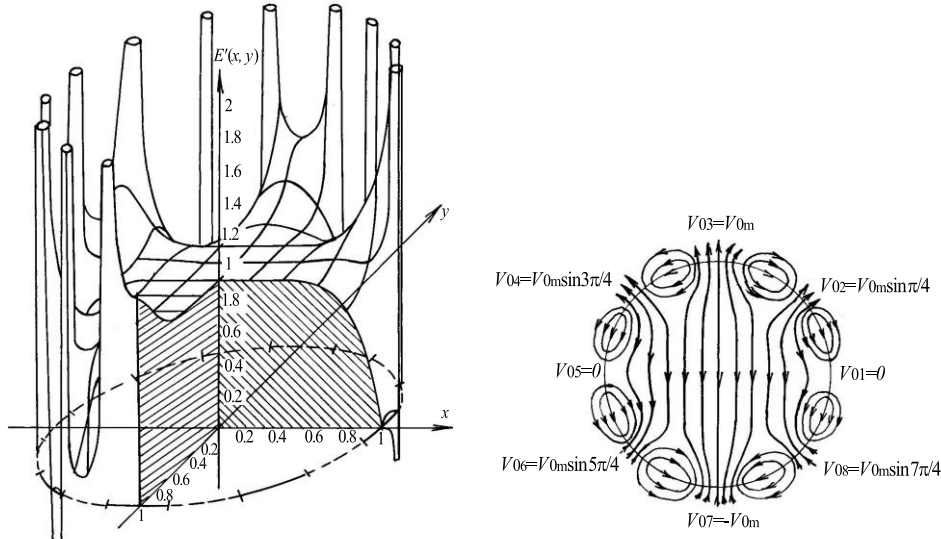


Рис.3. Залежність $|E(z)|$ при $n = 8$

Багатофазний (n -фазний) генератор, що живить електродну систему, має n вихідних блоків, розташованих навколо електродної системи так, що кожний вихідний блок знаходиться безпосередньо за електродом, який ним живиться, в окремій камері 5 і з'єднаний з відповідним електродом кабелем 6. Об'єкт сушіння 7 з вхідного бункера 8 через активну зону надходить у вихідний бункер 9. Швидкість руху об'єкта сушіння і, відповідно, час сушіння регулюються розсувною діафрагмою 10.

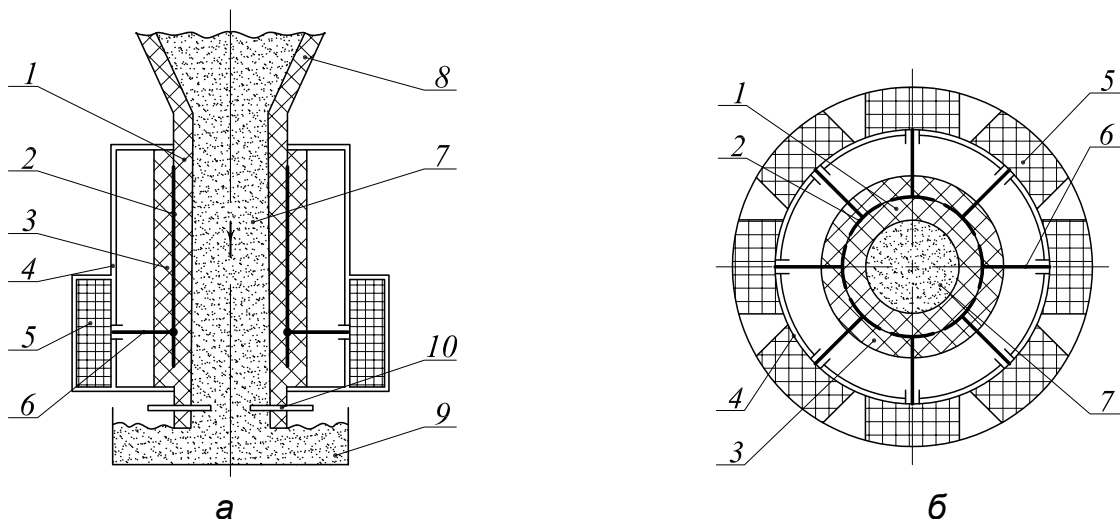


Рис. 4. Пристрій для опромінення зерна електричним полем високої частоти у вертикальному (а) та горизонтальному перетині (б)

Висновки

Для високоякісного процесу сушіння та дезінсекції зерна необхідне забезпечення рівномірного розподілу напруженості електричного поля в зоні взаємодії поля з зерном.

Запропоновано конструкцію камери обробки, що будується на основі циліндричної багатоелектродної багатофазної електродної структури. Доведено, що така конструкція забезпечує в активній камері зону однорідності, розмір якої залежить від кількості електродів так, що чим більше електродів, і, відповідно, фаз, тим більший розмір зони однорідності досягається. Шляхом подачі на кожен електрод гармонічної напруги із зсувом за фазою, рівним куту між сусідніми дугами, можливо забезпечення рівномірного обертання поля, при цьому досягається максимальний розмір зони однорідності поля між електродами.

Багатофазний високовольтний генератор формує вихідні сигнали високої напруги, що мають відповідні фази на кожному електроді. Для забезпечення високої однорідності електричного поля генератор має в своєму складі пристрій контролю і корекції амплітуд та фаз напруги на електродах.

Аналіз розподілу напруженості електричного поля всередині простору, обмеженого багатозв'язною кільцевою границею, виконаний на основі теорії інтегральних сингулярних рівнянь у вигляді задачі спряження. Наведено розрахункові формули для визначення напруженості електричного поля всередині області.

Список літератури

1. Зиньковский Ю.Ф. Задача сопряжения в расчётах напряженности и потенциала электрического поля кольцевой многосвязной структуры / Ю.Ф. Зиньковский, Ю.К. Сидорук, А.В. Голощапов // Известия ВУЗов. Серия «Радиоэлектроника». – 2007. – Т.50, №5. – С. 76–80.
2. Зиньковский Ю.Ф. Напряженность электрического поля в области с кольцевой многосвязной границей и равными длинами граничных дуг / Ю.Ф. Зиньковский, Ю.К. Сидорук, А.В. Голощапов // Известия ВУЗов. Серия «Радиоэлектроника». – 2009. – Т.52, № 1/2. – С. 14–22.
3. Лаврентьев М.А. Методы теории функций комплексного переменного / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – СПб: Лань, 2002. – 688 с.
4. Мусхелишвили Н.И. Сингулярные интегральные уравнения: Граничные задачи теории функций и некоторые их приложения к математической физике / Н.И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1968. – 512 с.
5. Пат. 69812 Україна А01С 1/00. Установка для сушки зерна та інших сипучих матеріалів електромагнітним полем високої частоти / Сидорук Ю.К.; заявл. 21.11.2011, опубл. 10.05.2012, Бюл.№ 9.
6. Черепнев А. Использование импульсного электромагнитного излучения для обеззараживания зерновой смеси / А. Черепнев, И. Черепнев, Г. Ляшенко // Зб. наук. праць ХУПС. – 2008. – Вип. 2. – №17. – С.53–55.
7. Mishenko A. Complex high-frequency technology for protection of grain against pests / A. Mishenko, O. Malinin, V. Rashkovan, A. Basteev et al.// JMPEE. – 2000. – Vol. 35. – No.3. – P. 179–184.

8. Nelson S.O. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control // Transactions of the ASAE. – 1996. – Vol.39. – No.4. – P. 1475–1484.

9. Rajagopal V. Disinfestation of stored grain insects using microwave energy: a thesis of doctor of philosophy / V. Rajagopal. – Manitoba, 2009. – 197 p.

Доказана целесообразность применения электрического поля высокой частоты для сушки и дезинсекции зерна. Предложен принцип построения установки для облучения зерна и других сыпучих материалов электрическим полем высокой частоты на основе многофазной многоэлектродной структуры. Используя теорию интегральных сингулярных уравнений в виде задачи сопряжения, рассчитано распределение напряженности электрического поля внутри камеры.

Електричне поле, висока частота, сушка, дезинсекція, інтегральні сингулярні рівняння.

The usefulness of high-frequency electric field for drying and disinfestation of grain is proven. The construction principles of systems for irradiation of grain and other bulk materials with the high frequency electric field base on a multiphase multi-electrode structure is suggested. By using the theory of singular integral equations in the form of the conjugation problem the distribution of the electric field inside the chamber is calculated.

Electric field, high frequency, drying, disinfestation, singular integral equations.

УДК 621.324

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ НАНЕСЕННЯ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ НА РОСЛИНИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

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

Досліджено процеси нанесення живильних розчинів з низьким питомим об'ємним опором на рослини. Показано значні переваги індукційного методу зарядки краплин у технологічному процесі електростатичного нанесення живильних розчинів. Встановлено лінійну залежність зміни часу стікання електричного заряду з краплин живильних розчинів від їх питомого об'ємного опору.

Електричний заряд, електричне поле, діелектрична проникність, електропровідність, питомий об'ємний опір, індукційна, контактна зарядка, осадження краплин, рослина.

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

8. Nelson S.O. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control // Transactions of the ASAE. – 1996. – Vol.39. – No.4. – P. 1475–1484.

9. Rajagopal V. Disinfestation of stored grain insects using microwave energy: a thesis of doctor of philosophy / V. Rajagopal. – Manitoba, 2009. – 197 p.

Доказана целесообразность применения электрического поля высокой частоты для сушки и дезинсекции зерна. Предложен принцип построения установки для облучения зерна и других сыпучих материалов электрическим полем высокой частоты на основе многофазной многоэлектродной структуры. Используя теорию интегральных сингулярных уравнений в виде задачи сопряжения, рассчитано распределение напряженности электрического поля внутри камеры.

Електричне поле, висока частота, сушка, дезинсекція, інтегральні сингулярні рівняння.

The usefulness of high-frequency electric field for drying and disinfestation of grain is proven. The construction principles of systems for irradiation of grain and other bulk materials with the high frequency electric field base on a multiphase multi-electrode structure is suggested. By using the theory of singular integral equations in the form of the conjugation problem the distribution of the electric field inside the chamber is calculated.

Electric field, high frequency, drying, disinfestation, singular integral equations.

УДК 621.324

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ НАНЕСЕННЯ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ НА РОСЛИНИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

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

Досліджено процеси нанесення живильних розчинів з низьким питомим об'ємним опором на рослини. Показано значні переваги індукційного методу зарядки краплин у технологічному процесі електростатичного нанесення живильних розчинів. Встановлено лінійну залежність зміни часу стікання електричного заряду з краплин живильних розчинів від їх питомого об'ємного опору.

Електричний заряд, електричне поле, діелектрична проникність, електропровідність, питомий об'ємний опір, індукційна, контактна зарядка, осадження краплин, рослина.

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

Підвищення врожайності овочевих культур – одна із важливих проблем розвитку агропромислового комплексу України. Кліматичні умови є сприятливими для вирощування як сезонних, так і позасезонних овочів в умовах закритого та відкритого ґрунту. Проте в галузі овочівництва загострилися проблеми, пов'язані із застосуванням застарілих технологій некореневого нанесення засобів захисту та живлення рослин.

Традиційні методи нанесення (пневматичний, механічний, гідравлічний) живильних розчинів, що мають низький питомий об'ємний опір не відповідають сучасним вимогам якості нанесення (висока полідисперсність подрібнення (від 30 до 500 мкм), нерівномірність осадження (від 45 до 60 %), низький ступінь покриття розчином із зворотної поверхні листя рослин (від 5 до 15 % тощо), що обумовлює втрати живильних розчинів (понад 60 %), зменшення ефективності засвоєння поживних речовин у рослин [2].

Вирішення проблеми можливо за рахунок застосування методів електротехнологій і в першу чергу електростатичного методу, який дозволяє підвищити якість та ефективність обробки рослин, забезпечуючи більш рівномірну густоту покриття (більш ніж 95 крапель на 1 см²) та однорідність, монодисперсність краплин розміром (30–60 мкм), високу ефективність осадження та утримання краплин із зворотної поверхні листя (до 75 %). Ефективність застосування методу в значній мірі визначається процесами зарядки та осадження краплин, які при нанесенні живильних розчинів із низьким питомим об'ємним опором на рослини є недостатньо вивченими та потребують більш глибоких досліджень.

Мета досліджень – вивчення процесів нанесення живильних розчинів з низьким питомим об'ємним опором на рослини залежно від методу зарядки.

Матеріали та методика досліджень. Процес електростатичного нанесення живильних розчинів із низьким питомим об'ємним опором на рослини в значній мірі обумовлюється величиною та здатністю краплин утримувати електричний заряд і в першу чергу при осадженні на рослини. При застосуванні електротехнології переважно використовують: іонний, контактний та індукційний методи зарядки.

Контактна зарядка відбувається в результаті контакту розчину з коронуючою кромкою зарядного електрода (рис.1.), основною особливістю якого є створення високої напруженості електричного поля в області контакту розчину, що сприяє високій ступені його зарядки.

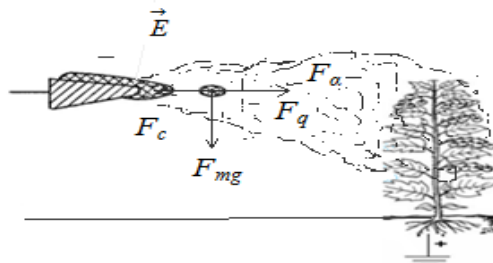


Рис.1. Принципова схема контактної зарядки краплин живильного розчину:

E – напруженість електричного поля, В/м; F_c , F_{mg} , F_q , F_a – відповідно сили опору середовища, земного тяжіння, електричного поля та аеродинамічного потоку повітря, Н

Контактна зарядка супроводжується іонізацією повітря, яка, на наш погляд, у ряді випадків негативно впливає на процес нанесення розчинів, які швидко віддають електричний заряд. Тобто, іонізація повітря поблизу коронуючого електрода, обумовлює стікання заряду з краплин розчинів у повітря.

Величину електричного заряду краплини при контактній зарядці визначають за формулою [6]:

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

де R , r – радіус краплини та коронуючої кромки зарядного електрода, мкм; U – напруга джерела живлення, кВ; H – міжелектродна відстань, м; ε , ρ_v – відповідно діелектрична проникність та питомий об'ємний опір розчину, Ом·м; A – розрахункова стала.

Індукційна зарядка краплин відбувається в зоні високовольтного електрода і після отримання електричного заряду виносяться потоком повітря, зберігаючи заряд (рис.2). Зменшення стікання його на заземлений електрод обумовлюється подачею потоку повітря. Стікання заряду визначається електрофізичними властивостями краплин та середовища.

Індукційна зарядка відбувається у поперечному електричному полі, що обумовлює необхідність застосування аеродинамічної сили повітря. Тобто невід'ємною складовою індукційного методу зарядки краплин є високошвидкісний потік повітря, який запобігає стіканню електричного заряду на заземлений електрод. Враховуючи цю особливість, можна припустити, що рух краплин у проміжку (зарядний електрод – рослина) здійснюється під дією аеродинамічної сили, а осадження заряджених краплин по мірі наближення до рослини, як показують експериментальні дослідження під дією електричної сили.

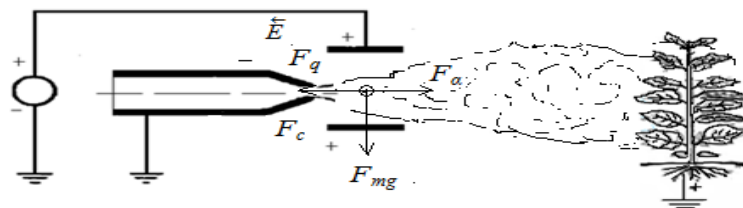


Рис.2. Принципова схема індукційного методу зарядки краплин живильного розчину:

E – напруженість електричного поля, В/м; F_c , F_{mg} , F_q , F_α – відповідно сили опору середовища, земного тяжіння, електричного поля та аеродинамічного потоку повітря, Н

Величину заряду краплини при індукційному методі, визначають за формулою [1]:

$$q = -\pi \varepsilon_0 E \frac{bc}{d_a} \quad (2)$$

де ϵ_0 – електрична постійна, Ф/м; a , b , c – півосі еліпсоїда, мкм;
 $d_a = \frac{c}{b}$, – коефіцієнт деполяризації еліпсоїда в напрямку осі x ; E – напруженість електричного поля, В/м.

Характеристика методів зарядки краплин наведена в таблиці.

Характеристика методів зарядки

Метод зарядки	Переваги	Недоліки
Контактний	Надійний та простий в управлінні процесом, висока ефективність зарядки краплин (максимальний електричний заряд понад 90 %), плавне регулювання дисперсності подрібнення краплин.	Швидке стікання електричного заряду з краплин, що мають низький питомий об'ємний опір, висока вартість електростатичних установок, значний вплив подачі розчину на ефективність зарядки, підвищені вимоги до електробезпеки.
Індукційний	Надійний та простий в управлінні процесом, можливість застосування напруги (1-25кВ), можливість зарядки розчинів з низьким питомим об'ємним опором, низька вартість установок на основі цього методу зарядки, можливість транспортування заряджених краплин на значну відстань.	Середня ефективність зарядки краплин (максимальний електричний заряд до 60 %), значний вплив подачі розчину на ефективність зарядки, підвищені вимоги до електробезпеки.

Аналіз таблиці дає підстави стверджувати про переваги застосування індукційного методу в технологічному процесі нанесення живильних розчинів з низьким питомим об'ємним опором на рослини.

Важливими процесами, що впливають на ефективність нанесення є рух та осадження заряджених краплин на поверхню рослин, які супроводжуються рекомбінацією та стіканням електричного заряду.

Процес стікання починається з моменту відриву краплин від зарядного електрода. Це дає підстави допустити, що процес стікання електричного заряду з краплин живильних розчинів, треба розглядати у двох випадках: 1) взаємодія заряджених краплин з діелектричним середовищем (рух у повітрі); 2) взаємодія заряджених краплин з провідним середовищем (осадження на поверхню рослин).

Результати досліджень. Дослідження показують, що час стікання електричного заряду з краплин живильних розчинів суттєво залежить від електрофізичних властивостей середовища, з яким контактує краплина. Для живильних розчинів з низьким питомим об'ємним опором ($\rho_v = 2 \cdot 10^2 \dots 10^3$) Ом·м та діелектричною проникністю ($\epsilon \approx 80$) при взаємодії з провідним середовищем, час стікання заряду становить ($\tau = 2,1 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-8}$ с). Тобто процес стікання електричного заряду з краплин живильних розчинів при контакті з рослиною відбувається миттєво. При взаємодії краплин жи-

вільного розчину з діелектричним середовищем (питомий об'ємний опір повітря $\rho_v \approx 10^{14}$ Ом·м, діелектрична проникність $\epsilon \approx 1$) час стікання заряду уповільнюється та становить ($\tau = 88,5$ с).

Встановлено лінійну залежність часу стікання електричного заряду від питомого об'ємного опору живильних розчинів (рис.3), що описується формулою:

$$\tau = \epsilon \rho_v \epsilon_0, \quad (3)$$

де ϵ , ρ_v – відповідно діелектрична проникність та питомий об'ємний опір розчину, Ом·м; ϵ_0 – електрична стала, $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

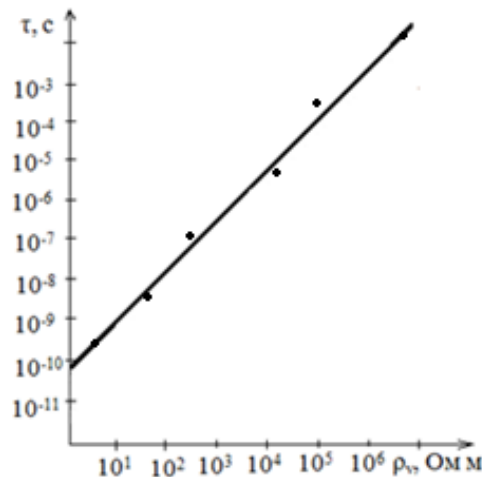


Рис.3. Залежність часу стікання заряду (τ) від питомого об'ємного опору (ρ_v) живильних розчинів

Результати наших досліджень демонструють стікання електричного заряду з краплин живильних розчинів, які мають низький питомий об'ємний опір в значній мірі погоджуються з даними інших дослідників [3,4,5].

Висновки

Аналіз методів зарядки краплин живильних розчинів показав значні переваги застосування індукційного методу, який обумовлює можливість зарядки розчинів з низьким питомим об'ємним опором, застосування напруги (1–25 кВ), транспортування краплин на значну відстань (більше ніж 2 м), зменшення втрат.

Час стікання електричного заряду з краплин живильних розчинів значно залежить від питомого об'ємного опору навколишнього середовища (при взаємодії з повітрям $\tau = 88,5$ с, рослиною $\tau = 2,1 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-8}$ с) і змінюється за лінійним законом.

Список літератури

1. Верещагин И. П. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И.П. Верещагин, В.И. Левитов. – М.: Энергия, 1974. – 479 с.
2. Іноземцев Г. Б. Науково-технічні передумови застосування електричного поля при захисті рослин / Г.Б. Іноземцев // Енергетика і автоматика. – 2006. – №3(7). – С. 12 – 18.

3. Anantheswaran, R. C. Electrostatic precipitation of pesticide sprays onto planar targets. *Trans. ASAE*, 1981. 24(2), C.273-276.
4. Carlton J. B. Electrical capacitance determination and some implications for an electrostatic spray-charging aircraft. *Trans. ASAE*, 1975. 18(4), C.641-644.
5. Law S.E. Embedded electrode electrostatic-induction spray-charging nozzle: theoretical and engineering design. *Trans. ASAE*, (1978). 21(6), C.1096-1104.
6. Splinter, W. G. Electrostatic charging of agricultural sprays. *Trans. ASAE*, 1988. 11(4), C.491-495.

Исследованы процессы нанесения питательных растворов с низким удельным объемным сопротивлением на растения. Показаны значительные преимущества индукционного метода зарядки капель в технологическом процессе электростатического нанесения питательных растворов. Установлена линейная зависимость изменения времени стекания электрического заряда с капель питательных растворов от их удельного объемного сопротивления.

Електрический заряд, електрическое поле, диелектрическая проницаемость, електропроводность, удельное объемное сопротивление, индукционная, контактна зарядка, осадження капель, растение.

Study of the processes of applying nutrient solutions with low specific volume resistance in plants. Established a significant advantage of the method of induction charging droplets in the process of electrostatic application of nutrient solutions. The established linear dependence of the time flow of electric charge on droplets of nutrient solution to their specific volume resistance.

Electric charge, electric field, dielectric constant, conductivity, specific volume resistance, induction, contact charging, deposition of droplets, plant.

УДК 536.2

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ ТА ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛООБМІННИКА З КОМПАКТНИМ РОЗМІЩЕННЯМ ПУЧКІВ ТРУБ

**В. Г. Горобець, доктор технічних наук
В. І. Троханяк, аспірант***

Проведено моделювання процесів переносу маси та теплоти в каналах кожухотрубного теплообмінника для різних конструкцій пучків

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

3. Anantheswaran, R. C. Electrostatic precipitation of pesticide sprays onto planar targets. *Trans. ASAE*, 1981. 24(2), C.273-276.
4. Carlton J. B. Electrical capacitance determination and some implications for an electrostatic spray-charging aircraft. *Trans. ASAE*, 1975. 18(4), C.641-644.
5. Law S.E. Embedded electrode electrostatic-induction spray-charging nozzle: theoretical and engineering design. *Trans. ASAE*, (1978). 21(6), C.1096-1104.
6. Splinter, W. G. Electrostatic charging of agricultural sprays. *Trans. ASAE*, 1988. 11(4), C.491-495.

Исследованы процессы нанесения питательных растворов с низким удельным объемным сопротивлением на растения. Показаны значительные преимущества индукционного метода зарядки капель в технологическом процессе электростатического нанесения питательных растворов. Установлена линейная зависимость изменения времени стекания электрического заряда с капель питательных растворов от их удельного объемного сопротивления.

Електричний заряд, електричне поле, діелектрична проникність, електропровідність, удельне об'ємне опір, індукційна, контактна зарядка, осадження капель, рослина.

Study of the processes of applying nutrient solutions with low specific volume resistance in plants. Established a significant advantage of the method of induction charging droplets in the process of electrostatic application of nutrient solutions. The established linear dependence of the time flow of electric charge on droplets of nutrient solution to their specific volume resistance.

Electric charge, electric field, dielectric constant, conductivity, specific volume resistance, induction, contact charging, deposition of droplets, plant.

УДК 536.2

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ ТА ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛООБМІННИКА З КОМПАКТНИМ РОЗМІЩЕННЯМ ПУЧКІВ ТРУБ

**В. Г. Горобець, доктор технічних наук
В. І. Троханяк, аспірант***

Проведено моделювання процесів переносу маси та теплоти в каналах кожухотрубного теплообмінника для різних конструкцій пучків

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

труб з компактним їх розміщенням, використовуючи пакет прикладних програм. Отримано поля швидкостей, температур і тисків у каналі теплообмінника та проаналізовано їх вплив на умови теплообміну і гідравлічні втрати в теплообміннику. Проведено розрахунок теплогідравлічної ефективності для різних конструкцій пучків труб та їх порівняння стосовно пучків різної геометрії.

Теплообмінник, пучок труб, теплогідравлічна ефективність, математичне моделювання, швидкість потоку, гідравлічні втрати, температурні поля.

При розробці нових типів конструкцій теплообмінних апаратів важливу роль відіграють такі фактори, як їх масогабаритні характеристики, ефективність теплопереносу через поверхню, що розділяє теплоносії, втрати тиску в трактах для кожного з теплоносіїв та інші параметри, які характеризують теплообмінний апарат [2]. Крім оцінки вказаних факторів, використовують, наприклад, такий параметр як теплогідравлічна ефективність [1,3], що характеризує теплову продуктивність теплообмінника віднесено до одиниці потужності, необхідної для прокачування теплоносія в тракті теплообмінника. Іншим важливим інструментом аналізу для визначення ефективності розробленої конструкції теплообмінника є детальне математичне моделювання процесів переносу маси та енергії в теплообміннику. Таке моделювання дає можливість визначити як ефективність теплообміну на поверхнях теплообмінника, так і провести оцінку гідравлічних втрат, що визначають потужність насосів, які використовуються для прокачування теплоносіїв.

Найпоширенішими конструкціями теплообмінників, які переважно використовуються в теплообмінному устаткуванні, є рекуперативні теплообмінники. За своїми конструктивними відмінностями ці теплообмінники розділяються на кожухотрубні та пластинчасті. Кожна з цих конструкцій має свої переваги та недоліки і залежно від гідродинамічних та температурних режимів роботи цих теплообмінників вибирається певний тип теплообмінника.

У роботі розглядаються теплообмінники кожухотрубного типу, які мають нову конструкцію, що відрізняється від традиційних, які базуються на використанні пучків труб з шаховим або коридорним порядком їх розміщення. В пропонованій новій конструкції кожухотрубного теплообмінника використовується максимально компактне розміщення труб, що дає змогу суттєво покращити їх масогабаритні показники порівняно з відомими конструкціями.

Мета досліджень – розробка нової конструкції кожухотрубного теплообмінника із компактним розміщенням пучків труб, оцінка їх теплогідравлічної ефективності та проведення моделювання процесів тепло- і масопереносу в каналах теплообмінника.

Матеріали та методика досліджень. Розглянемо кожухотрубний теплообмінник із кожухом прямокутного перерізу при поперечному обтіканні пучків труб. Геометрія розташування труб з діаметром $d=10$ мм по-

казана на рис. 1, що відрізняється від традиційних шахових і коридорних пучків їх компактним розміщенням. Сусідні труби в таких тісних пучках можуть бути зміщені одна відносно другої на деяку відстань, причому розглянуто п'ять типів конструкції пучка, в яких є зміщення труб у поперечному напрямку від 1 мм до 5 мм. Три з цих конструкцій показано на рис. 1, які відповідно мають величину зміщення труб на 1, 3 і 5 мм.

Проведено математичне моделювання процесів тепло- і масо переносу в каналах, що розглядаються та виконано оцінку теплогідравлячної ефективності пучків труб різних конструкцій, що розглядаються в роботі.

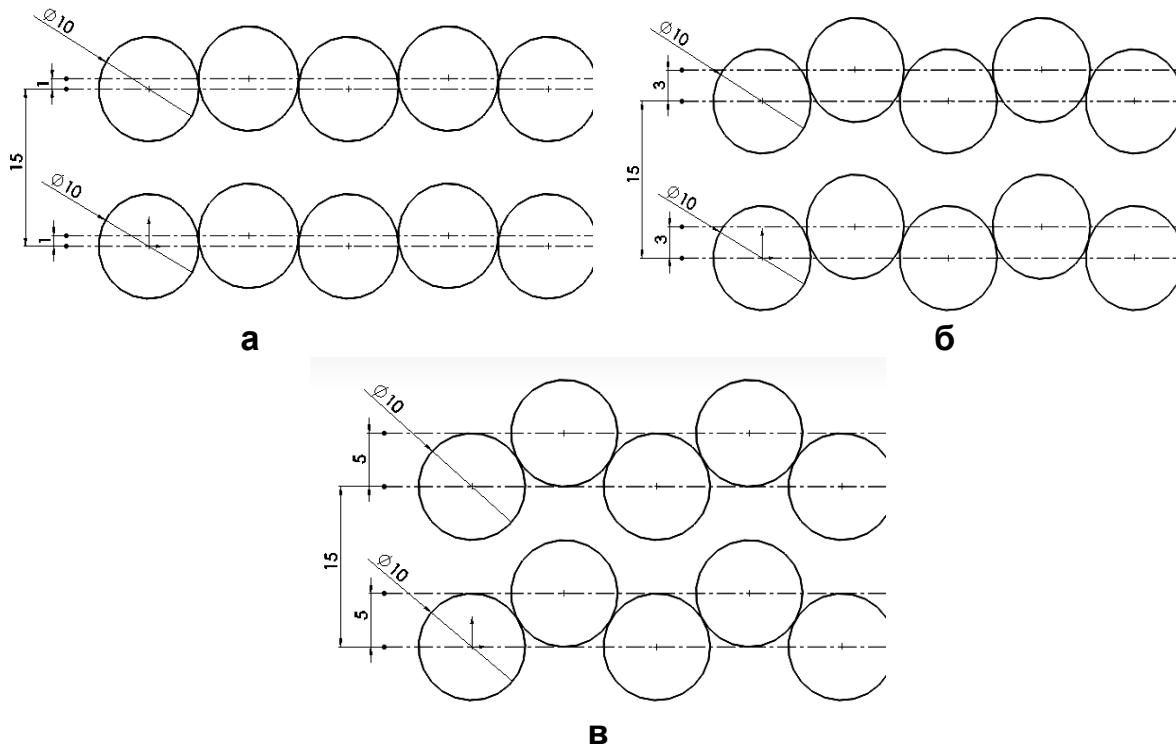


Рис. 1. Розташування компактного пучка труб (вигляд зверху):
а – зміщення труб на 1 мм, б – зміщення на 3 мм, в – зміщення на 5 мм

Комп'ютерне математичне моделювання процесів переносу в каналах з компактним розміщенням труб. Проведено математичне моделювання гідродинамічних процесів та процесів переносу теплоти в каналах із компактним розміщенням пучків труб, в яких міститься 40 труб в одному ряду діаметром 10 мм. Для цього використано метод комп'ютерного (CFD) моделювання з використанням програмного комплексу ANSYS Fluent 14.0. В основі математичної моделі лежать рівняння Нав'є-Стокса та рівняння переносу енергії для конвективних течій. У розрахунках застосовано стандартну $k-\epsilon$ модель турбулентності. Розрахунки проведено для п'яти конструкцій із зміщенням сусідніх труб від 1 до 5 мм (див рис. 1, а, б, в).

Усі розрахунки виконано при значенні числа Рейнольдса $18,6 \cdot 10^3$. Як теплоносії вибрано нагріте повітря температурою 40°C на вході, яке протікає в каналах, і холодна вода, що рухається всередині труб і має те-

температуру на вході 10 °С. Подібні умови охолодження нагрітого повітря мають місце, наприклад, у теплообміннику для охолодження зовнішнього нагрітого повітря у пташнику в літній період року, де як охолоджувач використовується вода підземних свердловин. Схема руху теплоносіїв має перехресний характер.

Результати досліджень. Результати розрахунків для каналу із зміщенням сусідніх труб на 5 мм наведено на рисунках 2–6. Розподіл векторів швидкості в каналі показано на рис. 2, а на рис. 3 – розподіл векторів швидкості в окремому елементі пучка труб. Як видно з рис. 3, у верхній точці труби відбувається відрив межевого шару, а на стику сусідніх труб спостерігаються застійні зони. В окремих точках каналу швидкість повітря досягає 55 м/с, а середня швидкість повітря у найвужчому поперечному перерізі каналу становить близько 45 м/с (див рис. 2). На рис. 4 наведено температурні розподіли в повітряному каналі. Вихідна температура охолодженого повітря становить 10,1 °С, що є найнижчою температурою серед вихідних температур, які досягаються в каналах інших конструкцій. На рис. 5 наведено зміну полів тиску в каналі досліджуваної конструкції. З отриманих розподілів тиску витікає, що загальне падіння тиску становить близько 15700 Па. Крім того, на рис. 6 показано лінії течії швидкості для виділеної ділянки каналу.

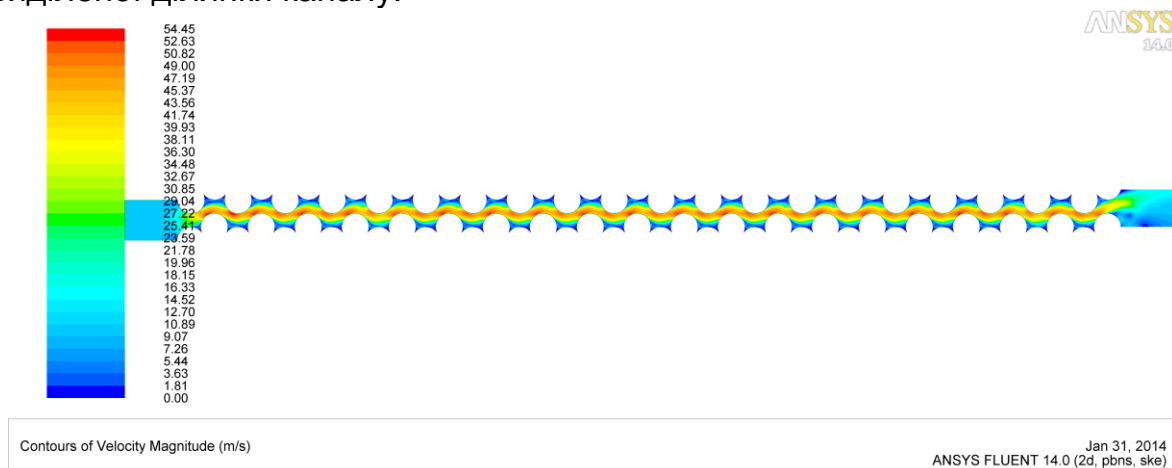


Рис. 2. Швидкість повітря в каналі, м/с

Комп'ютерне моделювання дає можливість проаналізувати умови гідродинамічної течії і теплопереносу в досліджуваних каналах та визначити яка із цих конструкцій є найефективнішою.

Оцінка теплогідравлічної ефективності компактних пучків труб. Щоб оцінити ефективність теплообмінної поверхні з енергетичної точки зору використовують відношення переданої кількості теплоти Q через поверхню теплообміну до величини потужності N насоса, яка необхідна для прокачування теплоносія через тракт теплообмінника [2]:

$$E = Q/N. \quad (1)$$

Параметр E ще називають теплогідравлічною ефективністю поверхні.

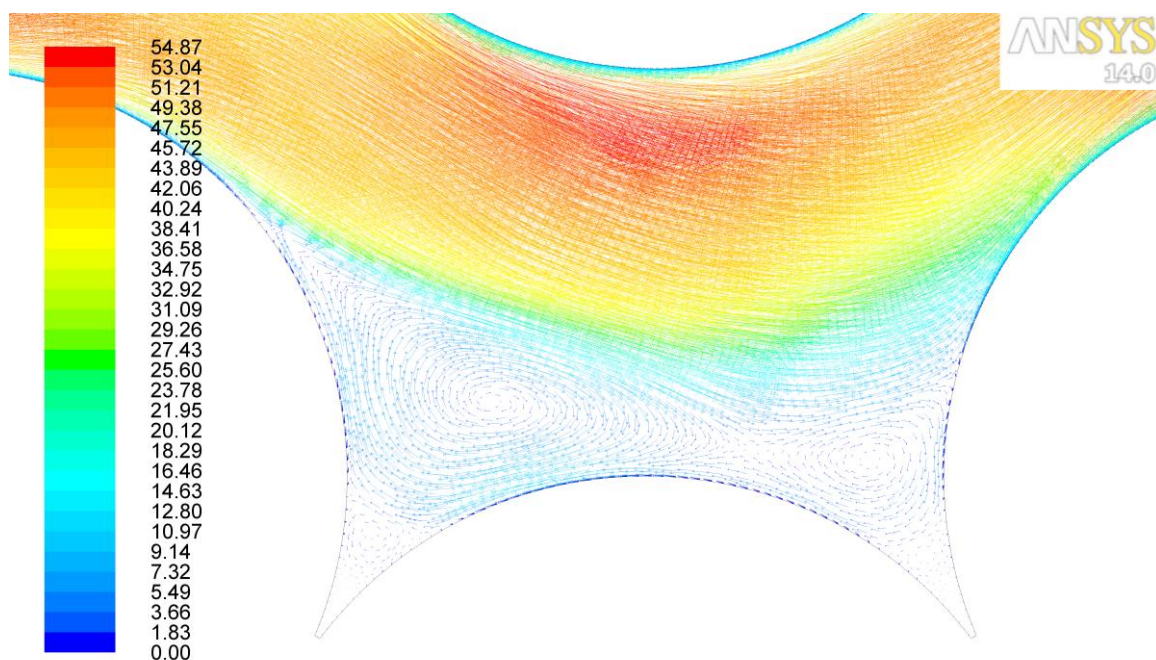


Рис. 3. Вектор швидкості в каналі, м/с

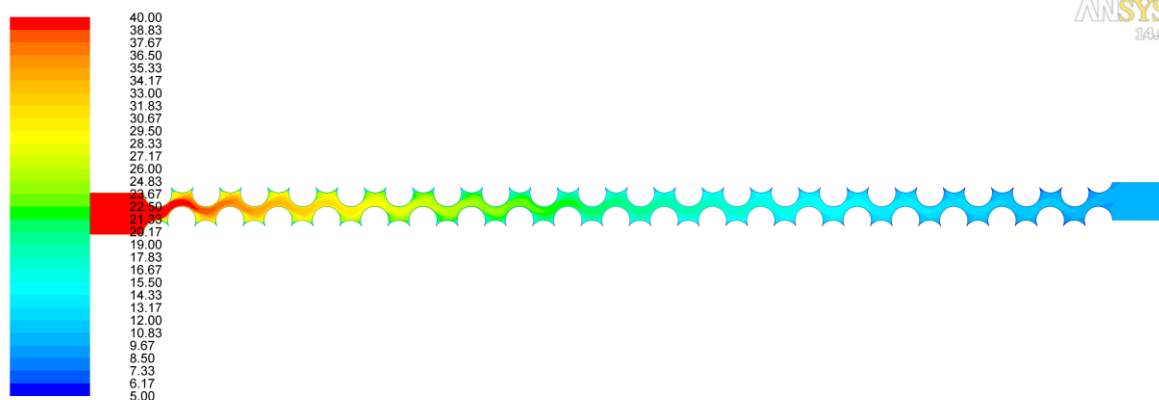


Рис. 4. Зміна температури в каналі, °C

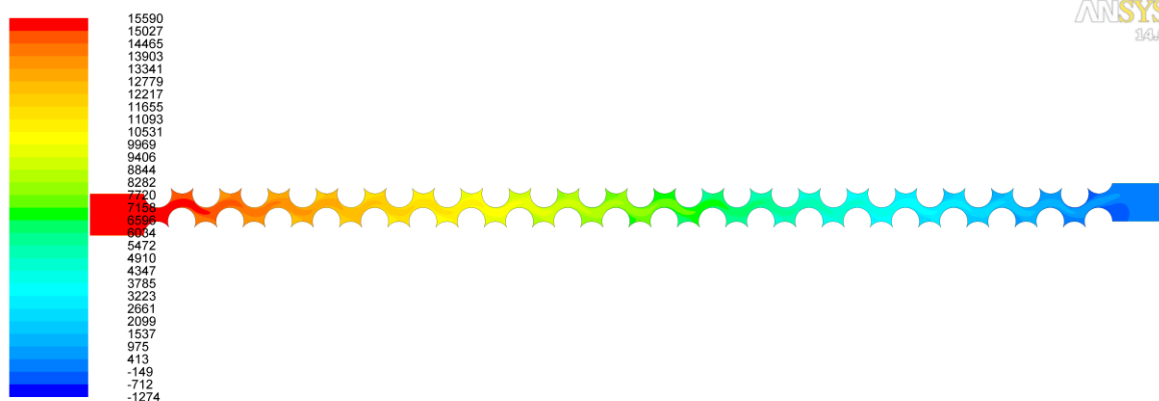


Рис. 5. Перепад тиску в каналі, Па

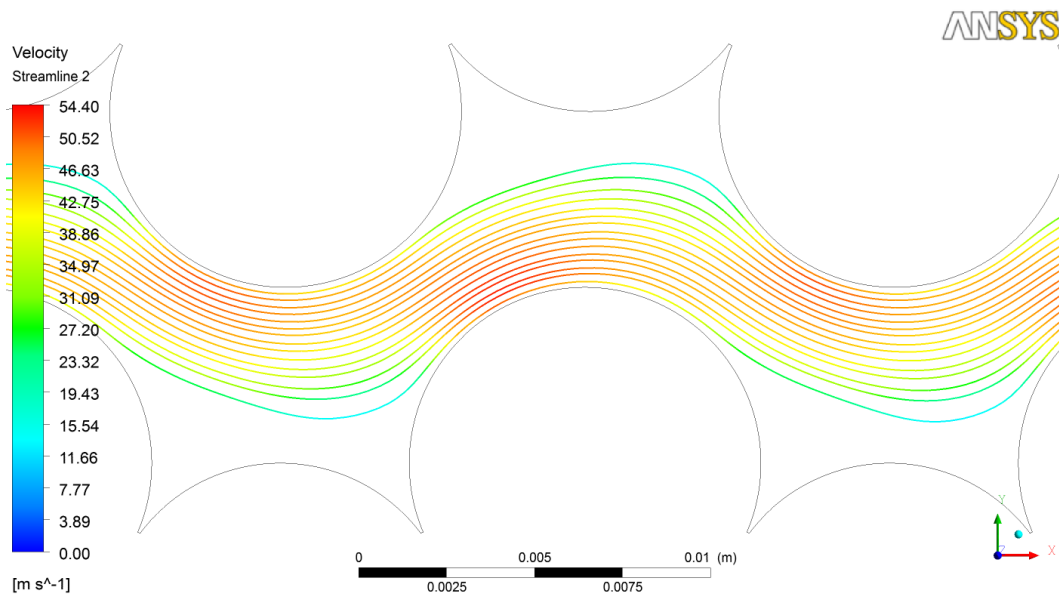


Рис. 6. Лінії течії швидкості повітря, м/с

Кількість теплоти, яка відбирається від гарячого або передається холодному теплоносію можна визначити за формулою

$$Q = c_p G \Delta T, \quad (2)$$

де $\Delta T = T_{\text{вх}} - T_{\text{вих}}$ – перепад температур теплоносія в тракці теплообмінника; $T_{\text{вх}}$, $T_{\text{вих}}$ – відповідно температури теплоносія на вході і виході з тракту, °C; G – масова витрата теплоносія, кг/с; c_p – теплоємність теплоносія, кДж/(кг·°C).

Потужність, необхідна на прокачування теплоносія:

$$N = \Delta p \cdot G / \rho, \quad (3)$$

де Δp – перепад тиску на вході і виході з каналу, кПа; ρ – густина теплоносія, кг/м³.

На рис. 7 зображено зміну числа Нуссельта і коефіцієнта тепловіддачі залежно від типу конструкції, причому по осі абсцис відкладено конструкції із зміщенням сусідніх труб відповідно на 1, 2, 3, 4 і 5 мм, а по осі

ординат усереднені значення коефіцієнта теплообміну $\bar{\alpha}$ і числа Нуссельта

$Nu = \frac{\bar{\alpha} d}{\nu}$ по поверхні пучка труб, де ν – коефіцієнт кінематичної

в'язкості теплоносія. В результаті аналізу отриманих залежностей можна зробити висновок, що найефективнішою за інтенсивністю теплообміну на поверхні пучка труб є конструкція із зміщенням труб на 5 мм.

На рис. 8 наведено залежності числа Нуссельта Nu / Nu_0 , коефіцієнта гідравлічного опору в міжтрубному каналі f / f_0 , віднесених до відповідних

значень цих величин у гладкому каналі (позначених індексом «0»), та теплогідрравлічної ефективності E від геометрії каналу (див. формулу (1)).

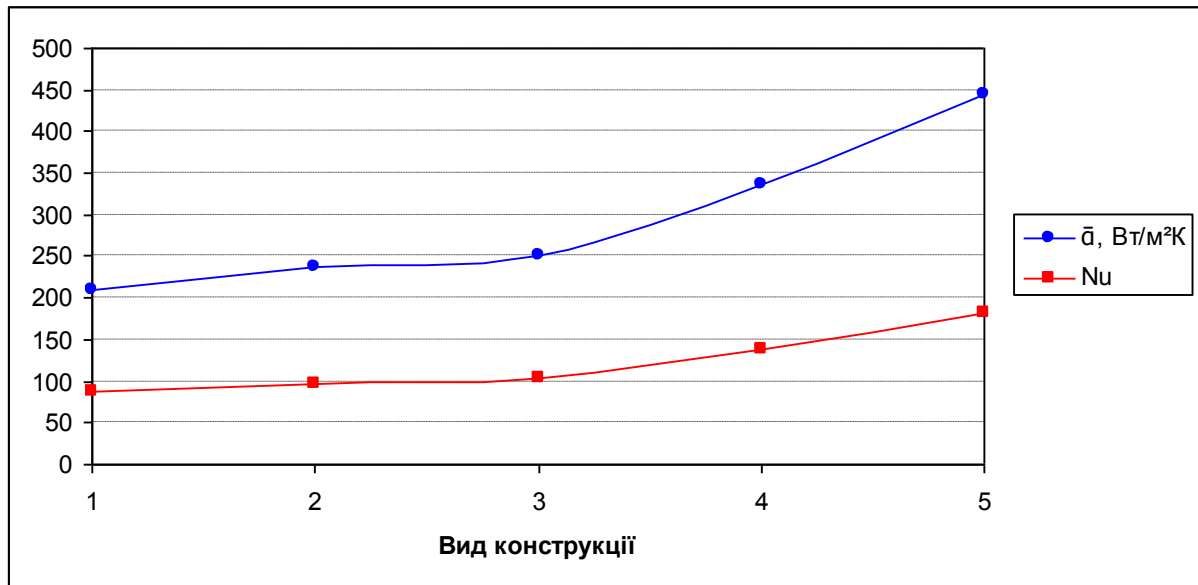


Рис. 7. Залежність числа Нуссельта та коефіцієнта тепловіддачі залежно від зміни конструкції пучка труб

Як видно з рис. 8 значення чисел Нуссельта та коефіцієнтів тертя на поверхні стінки трубок зростає при збільшенні величини зміщення між сусідніми трубами, але при цьому зростання гідравлічного опору є більшим. В досліджуваних каналах досягається збільшення коефіцієнта теплообміну на поверхні пучка труб порівняно з гладким каналом пучка майже в 4 рази. В той же час, як видно з рис. 8, теплогідрравлічна ефективність у таких каналах внаслідок зростання гідравлічних опорів падає із збільшенням величини зміщення між сусідніми трубами.

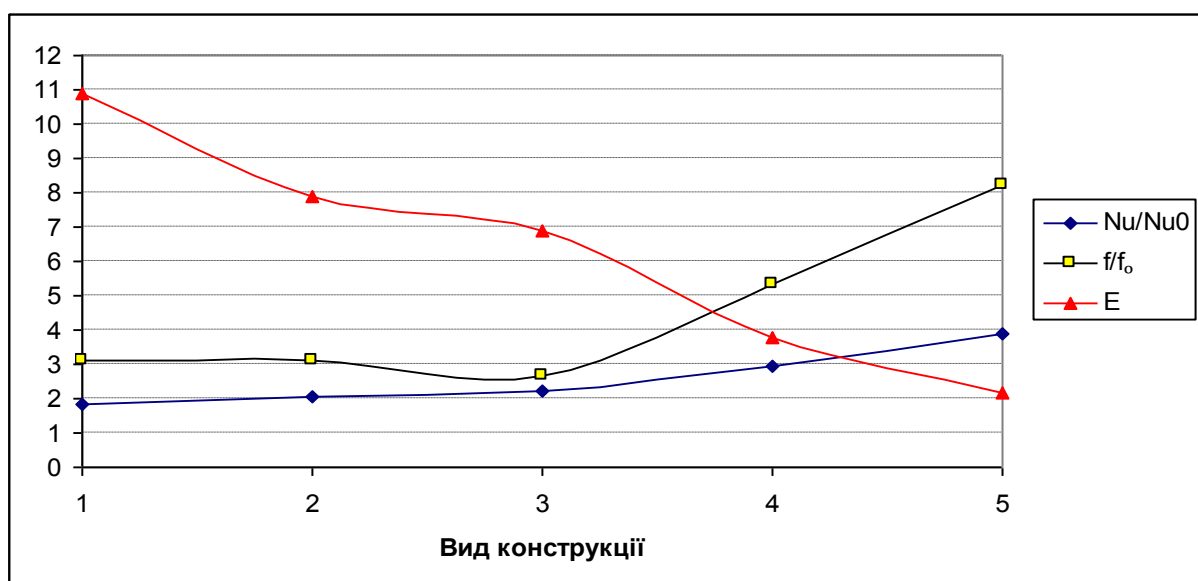


Рис. 8. Теплогідрравлічна ефективність, відносні величини чисел Нуссельта та коефіцієнтів тертя для різних типів конструкцій пучка труб

На рис. 9 наведено графіки, які показують зміну температури охолоджуваного теплоносія на виході з каналу, втрат тиску та величини сумарної кількості теплоти, яка передається через теплообмінну поверхню, із зміною геометрії пучка. Як витікає з отриманих залежностей, температура охолоджуваного теплоносія на виході із теплообмінника для останньої геометрії суттєво знижується, сумарна теплота, яка передається від гарячого теплоносія до холодного, зростає, а перепад тисків збільшується до 7 разів (див. рис.4 і 9). При цьому збільшення тиску становить лише 0,157 атм, що не призводить до суттєвого збільшення потужності насосів або вентиляторів, які використовуються для перекачування теплоносія.

Для порівняння значень енергетичної ефективності різних типів теплообмінних поверхонь, крім теплогідравлічної ефективності, використовується так званий фактор аналогії Рейнольдса (ФАР), який подано у формі [4]:

$$\Phi AP = \frac{\overline{Nu} / \overline{Nu}_0}{\overline{f} / \overline{f}_0}. \quad (4)$$

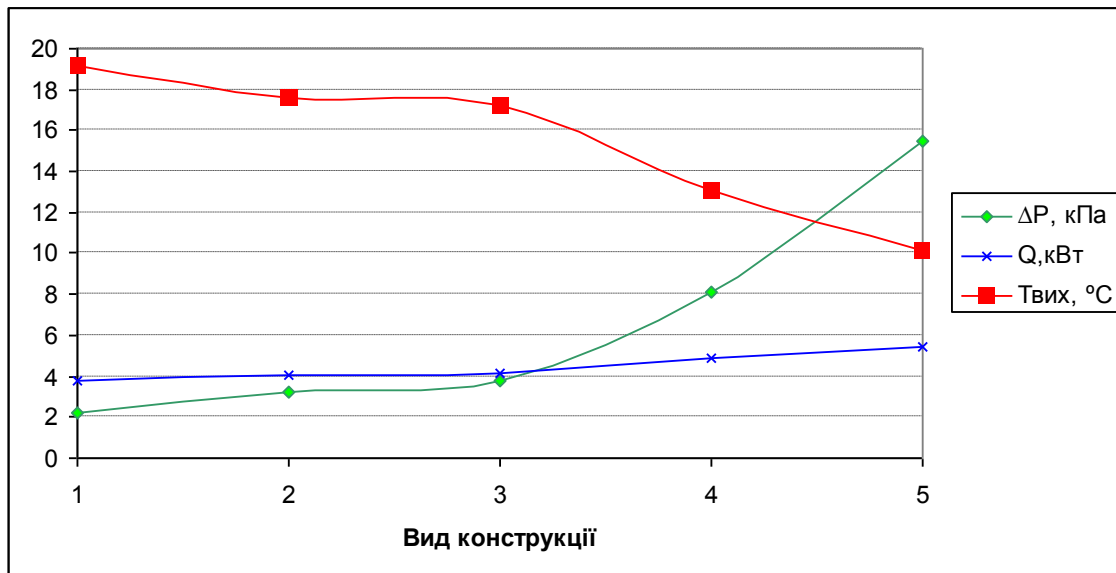


Рис. 9. Залежність падіння тиску Δp , загальної кількості відведеної теплоти Q та температури теплоносія на виході з теплообмінника $T_{вих}$ від зміни геометрії пучка труб

Вказаний параметр дає можливість порівняти теплогідравлічну ефективність досліджуваної поверхні з деякою еталонною поверхнею. Як еталонну поверхню вибрано плоский гладкий канал (позначається індексом «0»), причому значення числа Нуссельта $\overline{Nu}_0$ і коефіцієнта гідравлічного опору $\overline{f}_0$ для плоского каналу розраховуються для стабілізованої турбулентної течії за відомими формулами [2,4] при тих же значеннях числа Рейнольдса, що і для досліджуваного каналу.

Розрахункові значення ФАР, безрозмірні значення температури на виході з каналу, втрати тиску та коефіцієнти теплообміну на поверхні для каналів з компактною геометрією трубних пучків наведено на рис. 10.

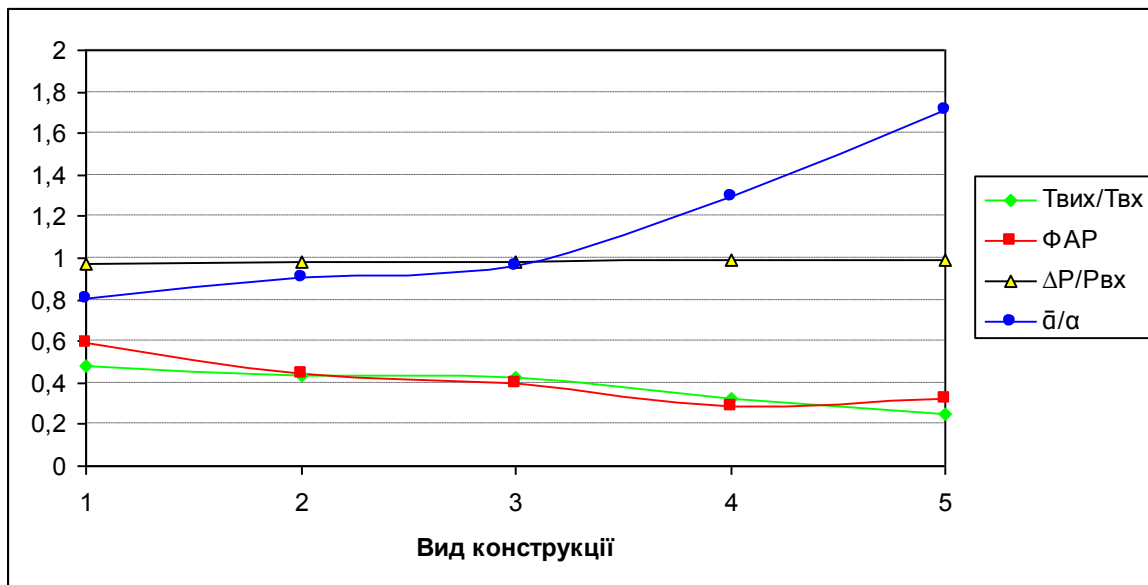


Рис. 10. Фактор аналогії Рейнольдса та безрозмірні значення вихідної температури, втрат тиску і коефіцієнта теплообміну на поверхні каналів різної геометрії з компактним розміщенням труб

Аналіз отриманих залежностей показує, що з точки зору інтенсифікації процесів теплопереносу на поверхні пучків, найкращі характеристики має конструкція із зміщенням труб на 5 мм (див. рис. 1, в). Усереднені значення коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}$ для цієї поверхні у 2,1 раза перевищують відповідні значення α для конструкції зі зміщенням труб на 1 мм. При цьому досягається суттєве зниження температури охолоджуваного теплоносія на виході з каналу. Гідравлічні втрати зі збільшенням величини зміщення між сусідніми трубами зростають, але в абсолютному значенні суттєвого падіння загального тиску не спостерігається і це не призводить до значного підвищення потужності насоса, який використовується для прокачування теплоносія. Оскільки темпи зростання гідравлічних опорів перевищують темпи зростання коефіцієнтів теплообміну, то для геометрії каналу з великим зміщенням труб параметр ФАР дещо знижується.

Проведений аналіз оцінок теплогідравлічної ефективності та фактора аналогії Рейнольдса дає можливість зробити обґрунтовані висновки щодо вибору оптимальної конструкції пучків труб при розробці теплообмінників різного призначення.

Висновки

1. Проведено комп'ютерне математичне моделювання процесів тепло- і масопереносу в пучках труб різної геометрії при компактному розміщенні труб з використанням програмного комплексу ANSYS Fluent 14.0. Отримано поля швидкостей, температур, тисків у досліджуваних каналах. Проаналізовано умови гідродинамічної течії в каналах та проведено оцінки інтенсивності теплопереносу між гарячим та холодним теплоносієм через стінку, що їх розділяє.

2. Проведено порівняльний аналіз теплогідравлічної ефективності для каналів різної конструкції і показано, що запропоновані конструкції є ефективними в порівнянні з відомими конструкціями при суттєвому зменшенні масогабаритних показників теплообмінної поверхні.

3. Визначено найефективніші поверхні теплообміну та показано перспективність застосування пропонованих конструкцій пучків труб при конструюванні теплообмінників різного призначення.

Список літератури

1. Горобець В.Г. Теплогідравлічна ефективність поверхонь з інтенсифікаторами теплообміну та оребренням / В.Г. Горобець // Науковий вісник НУБіП України. – 2010. – № 148. – С. 46–56.

2. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках / А.А. Жукаускас. – М.: Наука, 1982. – 472 с.

3. Кирпичев М.В. О наивыгоднейшей форме поверхности нагрева / М.В. Кирпичев // Изв. ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. – 1944. – Т.12. – С. 40–45.

4. Халатов А.А. Аналогия переноса теплоты и количества движения в каналах с поверхностными генераторами вихрей / А.А. Халатов, В.Н. Онищенко, И.И. Борисов // Доклады НАН Украины. – К., 2007. – №6. – С. 70–75.

Проведено моделювання процесів переносу маси та теплоти в каналах кожухотрубного теплообмінника для різних конструкцій пучків труб з компактним їх розміщенням, використовуючи пакет прикладних програм. Отримані поля швидкостей, температур та тисків в каналі теплообмінника та проаналізовано їх вплив на умови теплообміну та гідравлічні втрати в теплообміннику. Проведен розрахунок теплогідравлічних ефективностей для різних конструкцій пучків труб та їх порівняння щодо пучків різної геометрії.

Теплообменник, пучок труб, теплогидравлическая эффективность, математическое моделирование, скорость потока, гидравлические потери, температурные поля.

The modeling of transport mass and heat processes in the channels of the heat exchanger tube bundles for different designs with compact tube placement using their application package are made. Velocity field, temperature and pressure in the channel of the heat exchanger and their influence on the conditions of heat transfer and hydraulic loss in the heat exchanger are found. Calculations of thermal and hydraulic efficiency for different designs of tube bundles are made. Comparisons of efficiency for concerning tube bundles of different geometry are conducted.

The heat exchanger, tube bundle, thermal-hydraulic performance, mathematical modeling, flow rate, hydraulic losses, temperature.

ЗАСТОСУВАННЯ АКТИВАЦІЇ МОЛЕКУЛ-РЕАГЕНТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОКИСЛЮВАЛЬНО-ВІДНОВНИХ РЕАКЦІЙ

***Л.С. Червінський, доктор технічних наук
Б.М. Ковалишин, кандидат технічних наук***

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження з обґрунтування способів підвищення ефективності протікання хімічних окислювально-відновних реакцій за допомогою активації молекул-реагентів при їх переведенні в збуджений стан за допомогою різних енергетичних чинників.

Молекули-реагенти, енергія активації, фотосинтез, енергетичні рівні, електричне поле, частота, висока напруженість, горіння, опромінення.

Окислювально-відновні реакції є основними хімічними взаємодіями в енергетичних і масообмінних процесах утворення і трансформації органічних речовин як в неживій природі, так і при функціонуванні живих організмів. Оптимізація процесу окисно-відновних хімічних реакцій забезпечує підвищення ефективності використання світлового опромінення при фотосинтезі рослин, а також спалювання енергоносіїв в тепло-генеруючих паливних установках.

Мета досліджень – теоретичне та експериментальне обґрунтування підвищення ефективності протікання окислювально-відновних хімічних реакцій за рахунок активації молекул-реагентів від різних джерел енергії.

Матеріали та методика досліджень. Для вивчення протікання окислювально-відновних хімічних реакцій за рахунок активації молекул-реагентів необхідно виконати такі етапи робіт:

- обґрунтувати доцільність активації молекул-реагентів за їх участі в хімічних реакціях;
- визначити джерела енергії активації молекул-реагентів хімічних реакцій;
- знайти пояснення механізму активації атомів і молекул-реагентів;
- провести експериментальне дослідження щодо підтвердження розроблених теоретичних положень.

Теоретичні дослідження. Важливим питанням сучасної хімічної кінетики є вивчення залежності реакційних властивостей хімічної системи від внутрішньої енергії, будови та атомно-молекулярного складу реагентів.

Основним законом хімічної кінетики, що описує процес протікання хімічних реакцій є закон Арреніуса [11,12]. За цим законом константа швидкості реакції пов'язана з енергією активації (E_a), яка характеризує енергетичний стан молекули таким виразом:

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (1)$$

де k_0 – передекспоненційна константа; R – газова стала, рівна 1,987 кал/град·моль; T – температура в градусах шкали Кельвіна; e – основа натуральних логарифмів.

На практиці (після логарифмування і перетворення натуральних логарифмів у десяткові) користуються залежністю:

$$E_A = (\lg k_0 - \lg k) 4,575 T. \quad (2)$$

Вираз (2) свідчить, що енергія активації молекул прямо пропорційно залежить від температури, тобто теплової енергії.

Пропонується робоча гіпотеза, що для активації молекул-реагентів, крім теплової (E_{AT}), можна використовувати також енергію від інших зовнішніх чинників (E_{A3}), що призводить до зменшення використовуваної для активації молекул теплової енергії до E'_{AT} . Понижену теплову енергію E'_{AT} з врахуванням ефекту дії на молекули-реагенти інших зовнішніх факторів можна отримати з формули:

$$E'_{AT} = E_{AT} - E_{A3} = [(\lg k_0 - \lg k) 4,575 T] - Wb, \quad (3)$$

де W – енергія від зовнішніх джерел, еВ; b – коефіцієнт ефективного використання зовнішньої енергії.

До відомих способів активації молекул, крім термоактивації, належать активація швидкими електронами [9], активація радіоактивними частками [1], активація у магнітному полі, ультразвукова активація, фотоактивація, активація в електричному полі та інші способи.

Відповідно до основ квантової фізики загальна енергія молекули складається з електронної, коливальної та обертальної енергій.

Стан атома чи молекули поділяють залежно від енергетичного рівня на стабільний, нестабільний і метастабільний [10,13]. У деяких джерелах нестабільні (резонансні) енергетичні рівні носять назву синглетних, а метастабільні – триплетних [2,14]. Ефективність протікання хімічних реакцій залежить від тривалості перебування молекул у збудженому стані (час дисипації). На резонансних синглетних рівнях збудження молекули перебувають до 10^{-8} – 10^{-10} с [5]. Час перебування атомів і молекул на метастабільних триплетних рівнях збудження як мінімум на кілька порядків більший ($\sim 10^{-4}$ ÷ 10^{-2} с і більше) [15].

Узагальнена діаграма енергетичних рівнів та транспорту енергії збудження в молекулі наведена на рис. 1.

При дії на молекулу квантом первинної енергії $h\nu_1$ молекула зі стаціонарного (нульового) стану S_0 при достатній інтенсивності кванта може перейти на один із збуджених резонансних – R_1, R_2, R_3 ; метастабільних – M_1, M_2, M_3 рівнів або подолати енергетичний рівень іонізації I . Як приклад розглянемо первинний акт переходу молекули на

резонансний рівень R_2 . На цей перехід витрачається енергія $E_{S_0R_2}$, яка залежить від коефіцієнта використання первинної енергії $h\nu_1$. Далі проходить дисипація енергії молекули з переходом її на нижчий енергетичний рівень кількома можливими шляхами:

- на R_1 з виділенням кванта енергії $e_{R_2R_1}$;
- на S_0 з виділенням енергії $E_{R_2S_0}$, рівної $E_{S_0R_2}$ (ідеальна дисипація);
- з R_1 на S_0 з виділенням енергії $E_{R_1S_0}$;
- з R_1 на метастабільний рівень M_2 з виділенням кванта світла $e_{R_1M_2}$ або кванта енергії e_{CR_1} , що є характеристикою фотохімічної реакції з іншою молекулою або її реструктуризації.

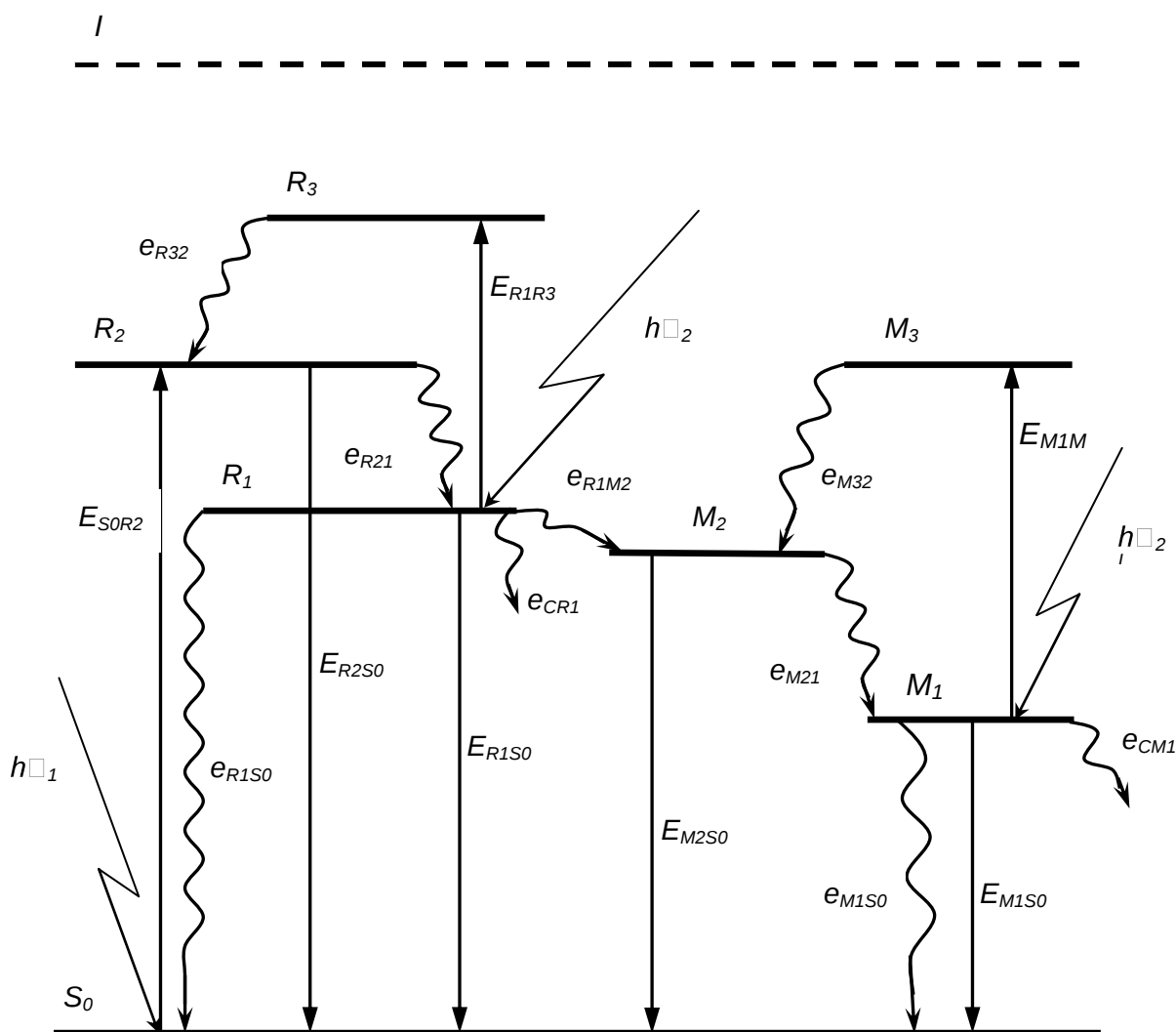


Рис. 1. Діаграма енергетичних рівнів та транспорту енергії в молекулі

Дво- і більше ступенева енергетична дія вторинних фотонів ($h\nu_2$ і $h\nu_1$) на енергетичні рівні молекули може забезпечити перехід на більш високі енергетичні рівні, відповідно на R_3 за рахунок енергії $E_{R_1R_3}$ і на M_3 – з енергією $E_{M_1M_3}$ [2]. Перехід молекули на нижчі енергетичні рівні може супроводжуватись виділенням інших видів енергії, відмінних від оптичної, – наприклад e_{CR_1} і e_{CM_1} . Ці порції енергії можуть використовуватись на стимулювання хімічних реакцій між молекулами або на їх реструктуризацію.

Фотоактивація молекул. В основі фотосинтезу лежать окислювально-відновні реакції, що запускаються при дії квантів світла на молекули хлорофілу, в яких електрони переносяться від донора (наприклад, H_2O) до акцептора (CO_2) з утворенням відновлених сполук (вуглеводнів) і виділенням O_2 .

Фотосинтез починається з того, що фотони потрапляють у молекули хлорофілу листків. Процес уловлювання енергії складається з двох етапів і здійснюється в роздільних кластерах молекул («фотосистема I» і «фотосистема II»).

Умовно весь процес фотосинтезу поділяють на три етапи: фотофізичний, фотохімічний і хімічний.

Саме на першому фотофізичному етапі фотосинтезу кванти світла поглинаються молекулами хлорофілу, які переходять у збуджений стан. При дії на молекули-реагенти квантами оптичного випромінювання вони можуть переводитися на більш високі енергетичні рівні.

Далі проходить дисипація поглинутої енергії (релаксація молекул пігментів із виділенням квантів енергії, які передаються іншим молекулам фотосистеми). На другому фотохімічному етапі відбувається розділення переданої енергії фотонів у реакційному центрі, перенесення електронів по фотосинтезному електронно-транспортному ланцюзі, що завершується синтезом аденозинтрифосфornoї кислоти АТФ і нікотинамід-аденіндинуклеотидфосфату (відновлення НАДФН).

Загалом перші два етапи називають світлозалежною стадією фотосинтезу. Третій хімічний етап відбувається вже без участі світла і включає біохімічні реакції синтезу органічних речовин з використанням енергії, накопиченої на світлозалежній стадії у вигляді АТФ. Відомо, що у світлозалежній частині процесу фотосинтезу, «світловій стадії», відбувається розщеплення молекул H_2O з утворенням протонів, електронів і атома кисню. В світловій стадії реакції утворюється основний переносник енергії АТФ, яка необхідна для фіксації CO_2 .

Враховуючи викладене, одним із шляхів підвищення ефективності фотосинтезу може бути додаткова активація процесу активації молекул-реагентів на «світловій стадії».

Проведено теоретичні дослідження з активації вуглеводневих палив і основних складових повітря оптичним випромінюванням. Використовуючи дані [15] визначено частоту оптичного електромагнітного випромінювання для активації молекул-реагентів реакції горіння (таблиця).

Параметри активації молекул газового палива та основних компонентів повітря оптичним випромінюванням

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 повітря найближчими до джерела опромінення. Без спеціальної підготовки параметрів навколишнього середовища переведення вказаних молекул на синглетні рівні практично неефективне.

Переведення молекул-реагентів реакції горіння на триплетні рівні можна здійснити з меншими передумовами, оскільки діапазон довжин хвиль у цьому випадку знаходиться в межах 138 – 278 нм.

Електроактивація молекул. Проведеними теоретичними дослідженнями доведено [6], що енергоефективність паливних установок при спалюванні вуглеводневого палива в повітрі може бути підвищена шляхом дії на компоненти реакції горіння високовольтним пульсуючим нерівномірним електричним полем високої напруженості (ВПНЕП).

Для створення високої напруженості електричного поля застосували голчасту електродну систему. Використовуючи [7] і визначивши початкові значення напруженості електричного поля E_0 (кВ/см) і напруги на електродах U_0 (кВ), отримаємо математичну модель залежності енергії активації молекул-реагентів від параметрів високовольтної голчастої активаційної системи:

$$E_{AT}^I = [(\lg k_0 - \lg k)4,575 T] - 0,82 I_K b t [31 \rho_{II} \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\rho_{II} \cdot r}}\right) r \ln \frac{2h}{r}]. \quad (4)$$

де ρ_{II} – питомий опір повітря; r – радіус кривини вістря голчастого електрода, см; h – відстань між електродами, см.

Обмеженням для застосування формули (4) є вимога, щоб $h > 15r$.

Із формул (4) і (3) видно, що витрати теплової енергії на активацію молекул-реагентів екзотермічної реакції будуть знижені на величину енергії активації від зовнішнього джерела E_{A3} . Тому на таку ж величину

E_{A3} може бути збільшена корисна теплова енергія при спалюванні вуглеводневого або іншого виду палива.

Методика експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження ефективності електроактивації молекул-реагентів реакції горіння полягали в оцінці ефективності спалювання пропан-бутанової суміші і природного газу в повітрі за умов додаткової активації.

Контрольним варіантом в обох експериментах були варіанти із спалюванням вуглеводневих енергоносіїв у повітрі без електроактивації.

Ефективність спалювання вуглеводневих енергоносіїв оцінювалась за часом нагрівання 1 л води від 20 °С до 40 °С. Імпульси електричного поля змінювалися в діапазоні частот (f) 0÷140 Гц. Ефективність електроактивації компонентів реакції горіння при застосуванні ВПНЕП оцінювалась за перевищенням часу (Δt) нагрівання води без активації компонентів реакції горіння над часом при їх активації. Повторність експерименту трикратна.

В одному з експериментів проведено дослідження впливу ВПНЕП окремо на повітря і пропан-бутанову суміш та одночасно на обидва компоненти.

Результати цього експерименту наведено на рис. 2.

В іншому експерименті проводилася оцінка ефективності електроактивації молекул природного газу і повітря. В одному варіанті цього експерименту проводилося дослідження активації одного тільки повітря, в другому варіанті – спільна активація повітря і природного газу.

Ефективність електроактивації оцінювалась за скороченням часу нагрівання води. Результати третього експерименту наведено на рис. 3.

Результати досліджень. Отримані в першому досліді експериментальні результати показують, що електроактивація компонентів реакції горіння пропану в повітрі, порівняно з контролем, суттєво скорочує час нагрівання води практично у всіх варіантах. Розрахована $HP_{0,05}=4,33$. При електроактивації повітря в полі високої напруги на частоті 80 і 100 Гц спостерігається зменшення витрати палива на 8,6 %. Електроактивація пропану в полі високої напруги з частотою 80 Гц дозволила нагріти воду у вказаних межах температури при витраті палива на 11,3 % меншій, ніж у контролі. Найбільший позитивний ефект (зменшення витрати палива на 21,5÷22,0 %) спостерігається при дії на обидва компоненти реакції горіння високовольтним пульсуючим нерівномірним електричним полем з частотою 100÷120 Гц. В останньому варіанті першої серії дослідів можна відмітити здійснення принципу суперпозиції активації щодо сумісного впливу компонентів реакції горіння.

За результатами експериментів видно, що активація високовольтними імпульсами природного газу і повітря скорочує час нагрівання води в обох варіантах дослідження. При активації повітря високовольтними імпульсами з частотою 100 Гц час нагрівання води скорочується на 11,1 %. При спільній активації пропану і повітря скорочення часу нагрівання води склало 12,0 %.

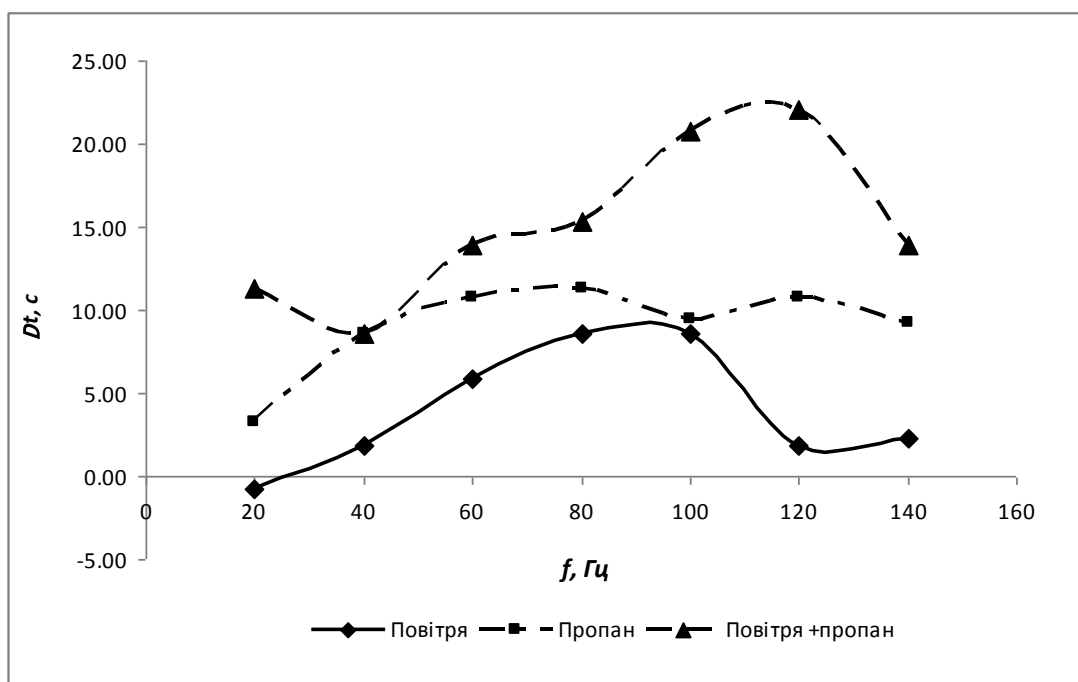


Рис. 2. Зниження тривалості нагрівання води від частоти імпульсів при електроактивації пропану і повітря

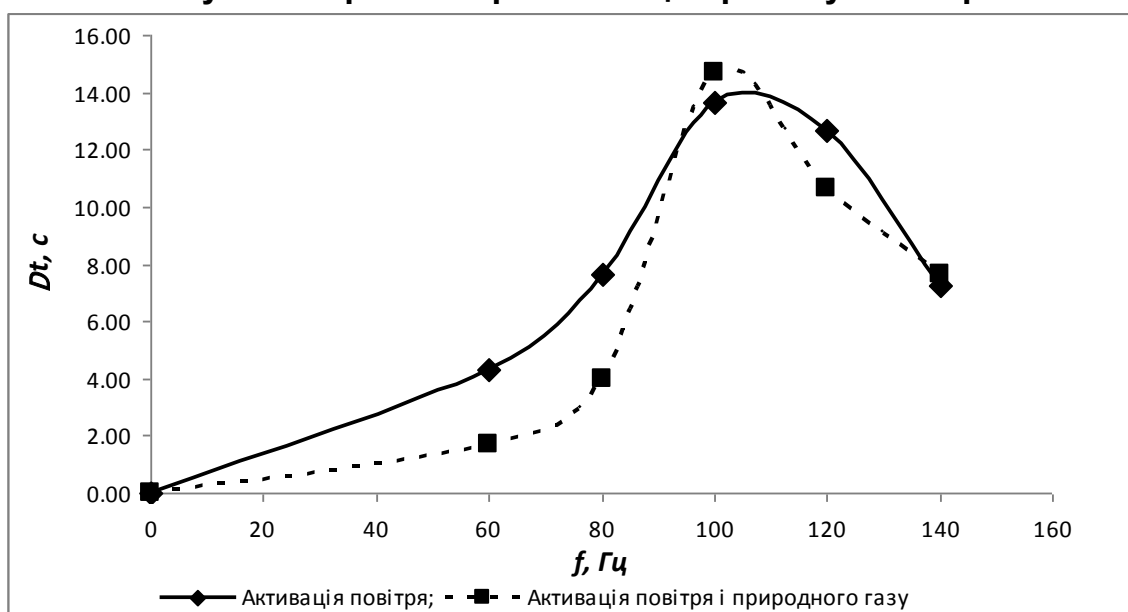


Рис. 3. Зниження тривалості нагрівання води від частоти імпульсів при електроактивації природного газу і повітря

Розрахована для третього експерименту $HP_{0,05}=2,46$ свідчить про неістотність відмінностей між обома варіантами дослідження практично для всього досліджуваного діапазону частот ВПНЕП. Така неістотність відмінностей пояснюється, з нашої точки зору, тим, що у варіанті з одночасною активацією обох компонент реакції горіння ефективною була лише активація повітря. Внесок у загальну ефективність реакції горіння активованого природного газу був незначним. Можна також зробити висновок про те, що в другому варіанті третього експерименту параметри

електричного поля не дозволили в достатній мірі провести активацію молекул природного газу. Оскільки вміст у природному газі метану складає 89÷98 % [3], то, з нашої точки зору, отриманий результат пояснюється неефективністю впливу ВПНЕП з цими параметрами на молекули метану. Тому, необхідно продовжити дослідження дії високовольтного пульсуючого електричного поля на молекули-реагенти реакції горіння природного газу (метану) в повітрі на іншій частоті.

Різниця в ступені електроактивації молекул пропану і метану полягає, на нашу думку, в будові самих молекул. Відомо, що протікання хімічних реакцій супроводжується переходом електронів з вищої зайнятої на нижчу вакантну орбіталь [4]. Рівномірність розподілу електронних орбіталей у молекулі характеризується полярністю. Чим більша ступінь полярності (несиметричності) молекул, тим легше вони піддаються активації. І чим ближча будова молекули до уніполярної, тим важче вона активується зовнішніми чинниками.

Форма молекули метану тетраедрична з валентними кутами H-C-H рівними 109°28'. Симетричність молекули метану робить її стійкою до зовнішнього впливу – переведення електронів на вищі енергетичні рівні збудження.

Просторова будова молекули пропану C₃H₈ має зигзагоподібну форму і несиметричний розподіл електронних орбіталей. Це дозволяє з меншими енергетичними затратами переводити молекули пропану на рівні збудження.

Опосередкованим підтвердженням впливу просторової будови молекули на її активацію може, на нашу думку, бути їх температура запалювання [8], яка у метану рівна 545, у пропану – 504, а у молекули бутану – 430 °C.

Висновки

1. Теоретичними дослідженнями обґрунтовано можливість підвищення ефективності окислювально-відновних реакцій при додатковій активації молекул-реагентів від різних енергетичних чинників.

2. Переведення молекул метану, пропану, кисню та азоту на синглетні енергетичні рівні збудження проводиться короткохвильовим ультрафіолетовим випромінюванням з довжиною хвилі 96 – 134 нм.

3. Переведення молекул метану, пропану, кисню та азоту на триплетні рівні збудження проводиться більш довгохвильовим ультрафіолетовим випромінюванням з довжиною хвилі 138 – 278 нм.

4. Електроактивація пропану і повітря призводить до зменшення часу нагріву води на 19,0...22,1 % при частоті активуючої імпульсної високої напруги 100...120 Гц, що відповідно, зменшує теплові витрати.

6. Електроактивація природного газу і повітря призводить до зменшення часу нагріву на 12,0 % при частоті 100 Гц. Електроактивація тільки повітря зменшує час нагріву на 11,1 %, що при $HI\bar{P}_{0,05}=2,46$ свідчить про несуттєвість відмінностей між вказаними варіантами.

7. Різниця в ефективності електроактивації пропан-бутанової суміші і природного газу пояснюється відмінностями у структурі молекул пропану, бутану і метану.

Список літератури

1. Багратишвили В.Н. Многофотонные процессы в молекулах в инфракрасном лазерном поле / В.Н. Багратишвили, В.С. Летохов, А.А. Макаров .– М.: Наука, 1988.–245 с.
2. Гайсак М. Енергія зв'язку синглетних і триплетних станів негативного іона мюонію / М. Гайсак, М. Гнатик, Ю. Федорняк // Науковий вісник Ужгород. ун-ту. Серія "Фізика".– 2011. – Вип. 30.– С. 240–245.
3. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости: ГОСТ 30319.2-96. – [Введен 1997–07–01]. – Минск: Межгос. совет по стандарт., метрол. и сертиф., 1996.–72 с.
4. Ейринг Г. Основы химической кинетики / Г. Ейринг, С.Г. Лин, С.М. Лин. – М.: Мир, 1983.–528 с.
5. Каганов И.Л. Ионные приборы / И.Л. Каганов.– М.: Энергия, 1972. – 528 с.
6. Ковалишин Б.М. Підвищення енергоефективності паливних установок через активацію молекул-реагентів реакції горіння / Б.М. Ковалишин // Наукові вісті НТУУ "КПІ".–2011.–№1.– С.136–139.
7. Кудрявцев И.Ф. Электрический нагрев и электротехнология / И.Ф. Кудрявцев, В.А. Карасенко.– М.: Колос, 1975.– 384 с.
8. Мала гірнича енциклопедія / [за ред. В.С. Білецького]. – Донецьк: «Донбас», 2004.–Т.1.– 640 с.
9. Пат. 17392 Україна, МКП В01J 19/08/ Спосіб отримання молекул з заданими властивостями хімічних зв'язків/ Мельников В.М., Усачов А.В.; заявл. 27.12.1994; опубл. 15.04.1997, Бюл. №10.
10. Про вплив домішки срібла на генераційні характеристики лазера на парі міді / Р.Б. Рійвес, Ю.В. Жменяк, В.А. Кельман [та ін]. // Науковий вісник Ужгород. ун-ту. Серія "Фізика". – 2007.–№ 20.– С. 107–118.
11. Стромберг А.Г. Физическая химия / А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко . – М.: Высш. шк., 2001.– 527 с.
12. Физическая химия / [под ред. К.С. Краснова].– М.: Высш. шк., 2001.– Кн. 1.– 512 с; Кн. 2, - 319 с.
13. Фізика / І.Є. Лопатинський, І.Р. Зачек, Г.А. Ільчук, Б.М. Романишин. – Львів: Афіша, 2005. – 386 с.
14. Червінський Л.С. Оптичні технології в тваринництві / Л.С. Червінський.– К.: Наук. думка, 2005.–230 с.
15. http://garfield.web.cern.ch/garfield/help/garfield_41.html

Проведены теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию способов повышения эффективности протекания химических окислительно - восстановительных реакций с помощью активации молекул - реагентов при их переводе на энергетические уровни возбуждения с помощью различных энергетических факторов.

Молекулы-реагенты, энергия активации, фотосинтез, энергетические уровни, электрическое поле, частота, высокая напряженность, горение , облучение.

Theoretical and experimental research on ways to improve study efficiency of chemical redox reactions by activating reagent molecules during their transfer to the excitation level using different power factors.

Molecules-reagents, activation energy, photosynthesis, energy levels, electric field, frequency, high intensity, combustion, radiation.

УДК665.33.001.73

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ НАГРІВУ І СУШІННЯ ЗЕРНОПРОДУКТІВ ІЧ-ВИПРОМІНЮВАННЯМ

***Б. І. Котов, доктор технічних наук
В. В. Кифяк, інженер***

Наведено математичні моделі процесів нагрівання і сушіння зернових продуктів інфрачервоним випромінюванням та ідентифіковані коефіцієнти рівнянь за даними експериментів.

Інфрачервоне випромінювання, зернопродукти, нагрів, сушіння, рухомий шар.

Задачі покращення якості зернових продуктів, які підлягають зневодненню, потребують подальшого вдосконалення процесів сушіння як у технологічному, так і енергетичному плані. Традиційно сушіння здійснюється переважно в установках із конвективним способом підведення теплової енергії. В літературних джерелах [2–4] відмічається перспективність застосування інфрачервоного випромінювання при переробці рослинної продукції і підготовці до зберігання. Для цього найчастіше використовуються установки періодичної дії. Процеси інфрачервоного сушіння в прохідних установках досліджено недостатньо.

Мета досліджень – вдосконалення математичного опису процесів термообробки і сушіння зерноматеріалів інфрачервоним випромінюванням і практична ідентифікація моделей.

Матеріали та методика досліджень. Специфіка досліджуваного об'єкта обумовлює доцільність використання аналітичного методу досліджень як основного. На першому етапі на основі отриманої інформації про фізичні особливості процесу формулюється математична модель, розв'язується система рівнянь і знаходяться аналітичні вирази для визначення динамічних характеристик процесу. На другому етапі проводяться експерименти щодо визначення перехідних процесів (кінетика нагріву і сушіння матеріалу). На третьому етапі за експериментально отриманими даними визначаються коефіцієнти диференціальних рівнянь. Математична модель повинна відповідати таким вимогам:

Theoretical and experimental research on ways to improve study efficiency of chemical redox reactions by activating reagent molecules during their transfer to the excitation level using different power factors.

Molecules-reagents, activation energy, photosynthesis, energy levels, electric field, frequency, high intensity, combustion, radiation.

УДК665.33.001.73

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ НАГРІВУ І СУШІННЯ ЗЕРНОПРОДУКТІВ ІЧ-ВИПРОМІНЮВАННЯМ

***Б. І. Котов, доктор технічних наук
В. В. Кифяк, інженер***

Наведено математичні моделі процесів нагрівання і сушіння зернових продуктів інфрачервоним випромінюванням та ідентифіковані коефіцієнти рівнянь за даними експериментів.

Інфрачервоне випромінювання, зернопродукти, нагрів, сушіння, рухомий шар.

Задачі покращення якості зернових продуктів, які підлягають зневодненню, потребують подальшого вдосконалення процесів сушіння як у технологічному, так і енергетичному плані. Традиційно сушіння здійснюється переважно в установках із конвективним способом підведення теплової енергії. В літературних джерелах [2–4] відмічається перспективність застосування інфрачервоного випромінювання при переробці рослинної продукції і підготовці до зберігання. Для цього найчастіше використовуються установки періодичної дії. Процеси інфрачервоного сушіння в прохідних установках досліджено недостатньо.

Мета досліджень – вдосконалення математичного опису процесів термообробки і сушіння зерноматеріалів інфрачервоним випромінюванням і практична ідентифікація моделей.

Матеріали та методика досліджень. Специфіка досліджуваного об'єкта обумовлює доцільність використання аналітичного методу досліджень як основного. На першому етапі на основі отриманої інформації про фізичні особливості процесу формулюється математична модель, розв'язується система рівнянь і знаходяться аналітичні вирази для визначення динамічних характеристик процесу. На другому етапі проводяться експерименти щодо визначення перехідних процесів (кінетика нагріву і сушіння матеріалу). На третьому етапі за експериментально отриманими даними визначаються коефіцієнти диференціальних рівнянь. Математична модель повинна відповідати таким вимогам:

- відтворювати тільки ті явища, які вносять суттєвий вклад у перенос теплоти і маси;
- рівняння повинні мати мінімальну кількість змінних, які необхідно визначати експериментально.

Результати досліджень. Сушіння розглянуто як тепловий процес. В основу його математичного опису покладено співвідношення теплового балансу, що записані як система диференціальних рівнянь у частинних похідних.

При виведенні диференціальних рівнянь, що описують процес нагріву зерна в рухомому шарі, зроблено такі припущення:

- нагрівачі та екран приймається як одна ємність з еквівалентною теплоємністю $c_m = c_n m_n + c_e m_e$;
- теплоємність зерна і випромінювача, коефіцієнти теплообміну між зерном, повітрям, випромінювачем і елементами конструкцій від температури не залежать і в часі не змінюються;
- температура випромінювача за довжиною не змінюється;
- нагрів зерна безградієнтний;
- швидкість видалення вологи пропорційна швидкості нагрівання і мають різні знаки:

$$-r \frac{du}{d\tau} = c \frac{d\Theta}{d\tau},$$

де r – теплота пароутворення; c – теплова ємність;

- значення кінетичних констант дорівнюють середнім за процес;
- теплопередачею від зерна до транспортера нехтуємо.

З урахуванням зроблених припущень динаміка нагрівання зерна в рухомому шарі при ІЧ-опромінюванні може бути описана системою двох диференціальних рівнянь:

$$m_1 c_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = P - \alpha_1 F_1 (\Theta_1 - \Theta_2) - \alpha_2 F_2 (\Theta_1 - t); \quad (1)$$

$$m_2 c_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} + G c_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial x} L = A \alpha_1 F_1 (\Theta_1 - \Theta_2) - m_{20} r \frac{\partial u}{\partial \tau} - \alpha_3 F_3 (\Theta_2 - t) - G_o r \frac{\partial u}{\partial x} L, \quad (2)$$

де Θ_1, Θ_2 – температура випромінювача і зерна, °C; t – температура повітря, °C; P – потужність, Вт; L – довжина транспортера, м; F_1 – площа поверхні випромінювача (активна), м²; F_2 – площа поверхні теплообміну випромінювача з повітрям, м²; F_3 – поверхня зерна, м²; $m_1 c_1, m_2 c_2$ – відповідно теплоємність випромінювача і зерна; G, G_o – витрати вологого і сухого зерна (продуктивність), кг/с; α_1, α_2 – лінеаризований коефіцієнт теплообміну випромінюванням і конвекцією між випромінювачем і зерном та повітрям, Вт/м²·°C; α_3 – коефіцієнт тепловіддачі від зерна, Вт/м²·°C; r – питома теплота пароутворення, Дж/кг; u – вологовміст зерна, кг/кг с.р; A – коефіцієнт поглинання випромінювання зерном.

Введемо позначення згрупованих величин у рівняннях (1), (2):

$$T_1 = \frac{m_1 c_1}{\alpha_1 F_1}; T_2 = \frac{m_2 c_2 Rb + m_{20} c_2}{Rb A \alpha_1 F_1}; T_3 = \frac{c_2 L (GRb + G_o)}{A \alpha_1 F_1 Rb};$$

$$a_1 = 1 + \frac{\alpha_3 F_3}{\alpha_1 F_1}; \quad a_2 = 1 + \frac{\alpha_3 F_3}{A \alpha_2 F_2}; \quad b_1 = \frac{\alpha_2 F_2}{\alpha_1 F_1} t + \frac{P}{\alpha_1 F_1};$$

$$b_2 = \frac{\alpha_3 F_3 t}{A \alpha_1 F_1}; \quad Rb = \frac{c}{r} \frac{du}{\partial \tau} - \text{критерій Ребіндера.}$$

З урахуванням прийнятих позначень перепишемо систему рівнянь (1) і (2) у такому вигляді:

$$\begin{cases} T_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \Theta_2 - a_1 \Theta_1 + b_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \Theta_1 - a_2 \Theta_2 + b_2 - T_3 \frac{\partial \Theta_2}{\partial x} \end{cases} \quad (4)$$

Система рівнянь (3) – (4) строго аналітичного розв'язку немає, тому використаємо наближений розв'язок за схемою [4].

Для усталеного режиму ($\frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = 0, \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = 0$) із рівнянь (3) і (4) отримаємо нове рівняння, що описує розподіл температури зерна за координатою:

$$T_3 \frac{d\Theta_2}{dx} = a - b\Theta_2, \quad (5)$$

де $a = \frac{b_1}{a_1} + b_2; \quad b = a_2 - \frac{1}{a_1}.$

Розв'язок рівняння (5) за граничних умов: $x=0; \Theta_2=\Theta_{20}$, де Θ_{20} – значення температури зерна на вході в установку, отримаємо у вигляді:

$$\Theta_2(x) = \frac{a}{b} - \left(\frac{a}{b} - \Theta_{20} \right) e^{-\frac{b}{T_3} x}. \quad (6)$$

Диференціюючи рівняння (6) і підставляючи отримане значення похідної $\left(\frac{d\Theta_2}{dx} \right)$ у рівняння (4), після перетворень будемо мати:

$$T_3 \frac{d\Theta_2}{d\tau} = \Theta_1 - a_2 \Theta_2 + b_3(x), \quad (7)$$

де $b_3(x) = b_2 - T_3^{-1} (a - b\Theta_{20}) \exp\left(-\frac{b}{T_3} x\right).$

Розв'язуючи систему рівнянь (3) і (7) відносно Θ_2 і Θ_1 , отримаємо диференціальні рівняння другого порядку, які описують перехідні процеси зміни температури випромінювача і зерна з урахуванням розподілу температури зерна за координатою:

$$A \frac{d^2 \Theta_1(\tau)}{d\tau^2} + B \frac{d\Theta_1(\tau)}{d\tau} + C \Theta_1(\tau) = D_1(x); \quad (8)$$

$$A \frac{d^2 \Theta_2(\tau)}{d\tau^2} + B \frac{d\Theta_2(\tau)}{d\tau} + C \Theta_2(\tau) = D_2(x), \quad (9)$$

де $A = T_1 T_2; \quad B = a_1 T_2 + a_2 T_1; \quad C = a_1 a_2 - 1; \quad D_1 = a_2 b_1 + a_1 b_3(x); \quad D_2 = a_2 b_1 + b_3(x).$

Розв'язок рівнянь (8) і (9) за початкових умов: $\tau=0$; $\Theta_1 = \Theta_{10}$, $\Theta_2 = \Theta_{20}$, $\frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = 0$; $\frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = 0$ отримуємо у вигляді [4]:

$$\Theta_1(\tau, x) = \frac{\Theta_{10}C - D_1(x)}{C(r_1 - r_2)}(r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_1(x)}{C}; \quad (10)$$

$$\Theta_2(\tau, x) = \frac{\Theta_{20}C - D_2(x)}{C(r_1 - r_2)}(r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_2(x)}{C}, \quad (11)$$

де $r_{1,2} = -\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ – корені характеристичного рівняння.

Для отримання рівняння зміни вологовмісту зерна при нагріванні ІЧ-випромінюванням скористаємося визначенням критерію Ребіндера:

$$-dU = \frac{C}{rRb} d\Theta. \quad (12)$$

Диференціюючи рівняння (11) і підставляючи отримане значення в співвідношення (12), після перетворень маємо:

$$-\frac{dU}{\partial \tau} = \frac{\Theta_{20}C - D_2}{C(r_1 - r_2)}(r_1 r_2 e^{r_2 \tau} - r_1 r_2 e^{r_1 \tau}) \frac{C}{r_0 Rb}. \quad (13)$$

Інтегруючи рівняння (13) з урахуванням початкових умов: $\tau=0$; $U = U_0$ (де U_0 – значення вологовмісту матеріалу на початку процесу), отримуємо рівняння кінетики інфрачервоного сушіння зернових матеріалів у рухомому шарі:

$$U(\tau) = U_0 - \frac{C_2(\Theta_{20}C - D)}{Cr_0 Rb} \left[1 - \frac{1}{r_1 - r_2} (-r_1 e^{r_2 \tau} + r_2 e^{r_1 \tau}) \right]. \quad (14)$$

Для визначення невідомих коефіцієнтів А, В, С, D_2 в аналітичному рішенні системи рівнянь відносно $\Theta_2(\tau)$ використано експериментальні дані нагріву вологого зерна ячменю. Як метод оцінки використовували [5] алгоритм Левенберга-Маркварда, який є найрозповсюдженішим алгоритмом для мінімізації середньоквадратичних відхилень. Сутність методу полягає в обчисленні таких оцінок коефіцієнтів А, В, С, D_2 аналітичного розв'язку (11), які забезпечили б мінімум функціонала:

$$I = \sum_{i=1}^n (\bar{\Theta}_i - \Theta(\bar{\tau}_i))^2 \rightarrow \min, \quad (15)$$

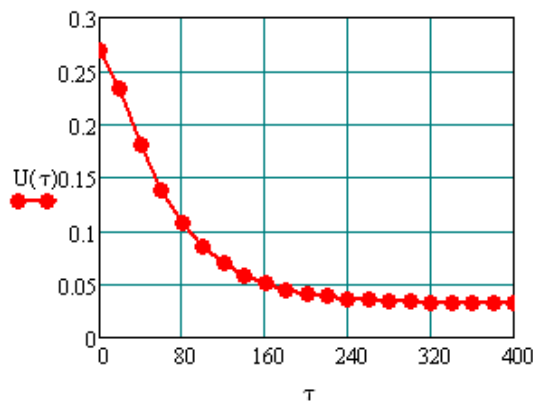
де $\bar{\Theta}_i, \bar{\tau}_i$ – експериментальні дані.

Реалізацію цього алгоритму проводили у математичному середовищі Mathcad 14 за допомогою вбудованої функції genfit. Кінетика сушіння ідентифікується шляхом визначення інтегрального числа Ребіндера, фактично за кількістю видаленої вологи.

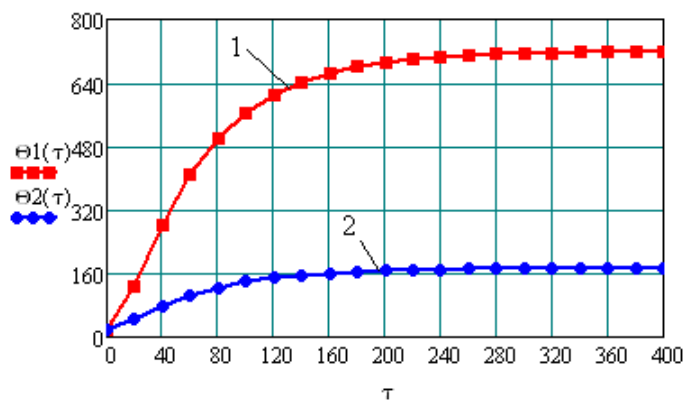
Результати ідентифікації динамічних режимів інфрачервоного нагріву і сушіння зерна наведено на рисунку у вигляді кривих перехідного процесу.

З вищенаведеного випливає, що апробовано досить ефективний підхід до параметричної ідентифікації процесу теплової обробки зернома-теріалів, який вирішує задачу визначення динамічних характеристик двох

ємностей – вимірювача і зерна за наявності експериментальних даних про перехідний процес одного з них.



а



б

Зміна параметрів процесу зерна за часом:

а – вологовмісту зерна $U(\tau)$, кг/кг·с.р.;

б – температури випромінювача $\Theta_1(\tau)$ (1) та зерна $\Theta_2(\tau)$ (2), °C

Висновки

Отримано аналітичні залежності зміни температури випромінювача і матеріалу в часі, які дозволяють на основі експериментально визначеної кривої розігріву випромінювача визначити динаміку зміни температури і вологовмісту рухомого шару зернових матеріалів.

Список літератури

1. Беляев М. И. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов / М. И. Беляев, П.Л. Пахомов. – Х.: ХИОП, 1991. – 60 с.
2. Елькин Н.В. Высокотемпературные инфракрасные технологии нового тысячелетия / Н.В. Елькин // Хранение и переработка зерна. – 2002. – № 9. – С. 47 – 50.
3. Елькин Н.В. Теория и практика инфракрасной обработки зерна и крупы / Н.В. Елькин // Хранение и переработка зерна. – 2006. – № 4. – С. 26 – 30.
4. Котов Б.І. Аналітичне дослідження перехідних режимів нагрівання зерна в електротерморадіаційних установках безперервної дії / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, В.В. Кифяк // Вісник Харківського техн. ун-ту сільського госп-ва. – 2012. – Вип. 133. – С. 57 – 65.
5. Лисенко В.П. Ідентифікація процесу нагріву зерна ріпаку / В.П. Лисенко, Р.А. Калініченко, Д.С. Комарчук // Науковий вісник НУБіП України. – 2012. – № 174, ч. 1. – С. 98–100.
6. Поперечний А.М. Кінетика процесу сушіння плодів кісточок у віброкиплячому шарі при інфрачервоному нагріванні / А.М. Поперечний, Н.О. Миронова // Вісник Харків. техн. ун-ту сільського госп-ва. – 2007. – Вип. 58. – С. 122 – 129.

Приведены математические модели процессов нагрева и сушки зерновых продуктов инфракрасным излучением и идентифицированы коэффициенты уравнений по данным экспериментов.

Инфракрасное излучение, зернопродукты, нагрев, сушка, движущийся слой.

The mathematical models of the heating and drying of grain products and identified by infrared radiation coefficient equations for experimental data.

Infrared radiation, grain products, heating, drying, rolling ball.

УДК 621.314.55(088.8)

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБМОТКИ ЗВ'ЯЗКУ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

***М. В. Брагіда, кандидат технічних наук
В. О. Фесенко, студент магістратури***

Наведено конструкцію зварювального трансформатора та запропоновано методику розрахунку параметрів обмотки регулювання струму зварювання.

Зварювальний трансформатор, тороїд, магнітопровід, обмотка регулювання, обмотка зв'язку, дросель.

Зварювальні трансформатори на тороїдних магнітних осердях мають суттєві переваги перед трансформаторами класичного виконання:

- відсутні втрати енергії магнітного поля на розсіювання;
- відсутні механічні регулятори струму зварювання, а відповідно і вібрації та шумові явища;
- зменшені масо-габаритні показники та спрощене конструктивне виконання;
- зменшені втрати електричної енергії на регулювання величини струму зварювання.

Переваги досягаються принципово новим технічним рішенням.

Мета досліджень – обґрунтування параметрів обмотки зв'язку зварювального трансформатора на тороїдних магнітопроводах.

Матеріали та методика досліджень Запропоноване нове технічне рішення зварювального трансформатора на тороїдних магнітопроводах [3] дозволило регулювати струм зварювання шляхом взаємокомпенсації складових магнітного потоку. При такому конструктивному виконанні зварювального трансформатора величину струму зварювання можна регулювати зміною індуктивного опору обмотки зв'язку. Регулювання не призведе до значних змін напруги вторинної обмотки. Узгоджене з'єднання обмоток навіть підвищить її.

Инфракрасное излучение, зернопродукты, нагрев, сушка, движущийся слой.

The mathematical models of the heating and drying of grain products and identified by infrared radiation coefficient equations for experimental data.

Infrared radiation, grain products, heating, drying, rolling ball.

УДК 621.314.55(088.8)

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБМОТКИ ЗВ'ЯЗКУ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

***М. В. Брагіда, кандидат технічних наук
В. О. Фесенко, студент магістратури***

Наведено конструкцію зварювального трансформатора та запропоновано методику розрахунку параметрів обмотки регулювання струму зварювання.

Зварювальний трансформатор, тороїд, магнітопровід, обмотка регулювання, обмотка зв'язку, дросель.

Зварювальні трансформатори на тороїдних магнітних осердях мають суттєві переваги перед трансформаторами класичного виконання:

- відсутні втрати енергії магнітного поля на розсіювання;
- відсутні механічні регулятори струму зварювання, а відповідно і вібрації та шумові явища;
- зменшені масо-габаритні показники та спрощене конструктивне виконання;
- зменшені втрати електричної енергії на регулювання величини струму зварювання.

Переваги досягаються принципово новим технічним рішенням.

Мета досліджень – обґрунтування параметрів обмотки зв'язку зварювального трансформатора на тороїдних магнітопроводах.

Матеріали та методика досліджень Запропоноване нове технічне рішення зварювального трансформатора на тороїдних магнітопроводах [3] дозволило регулювати струм зварювання шляхом взаємокомпенсації складових магнітного потоку. При такому конструктивному виконанні зварювального трансформатора величину струму зварювання можна регулювати зміною індуктивного опору обмотки зв'язку. Регулювання не призведе до значних змін напруги вторинної обмотки. Узгоджене з'єднання обмоток навіть підвищить її.

Для отримання крутоспадної зовнішньої характеристики використаємо індуктивний опір, а саме його важливу властивість змінювати значення при насиченні магнітопроводу. Робочою напругою магнітоелектричних систем вважається напруга, що знаходиться в межах коефіцієнта насичення $1,1 \dots 1,3$. При перевищенні цієї напруги опір падає, а струм стрімко зростає. Варто лише правильно вибрати напругу індуктивного опору (дроселя) залежно від струму зварювання.

Приймемо гранично допустимий діапазон відхилення напруги таким, що не порушує вимог ГОСТ 13109-97 – $\pm 10\%$ [6].

Конструкція електрозварювального трансформатора наведена на рис. 1.

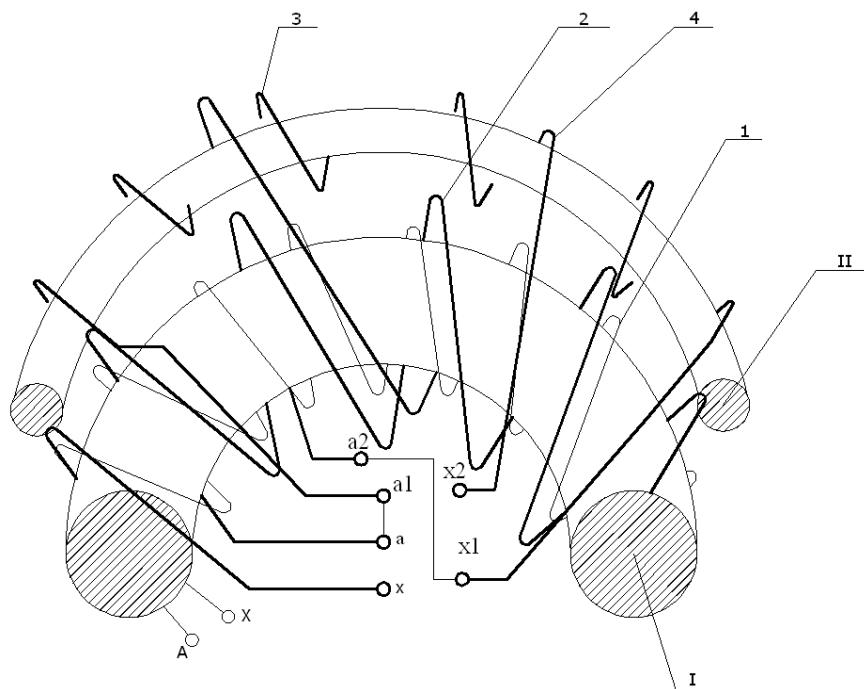


Рис.1. Конструкція зварювального трансформатора

Трансформатор складається із тороїдного магнітопроводу I, на який намотана первинна обмотка 1 і вторинна обмотка 2. На тороїдний магнітопровід II, який, виходячи із теплового режиму роботи, доцільно розмістити зверху над вторинною обмоткою, намотана обмотка 3. Виводи цієї обмотки послідовно з'єднані із вторинною обмоткою трансформатора та обмоткою зв'язку 4, яка охоплює обидва магнітопроводи та електромагнітно впливає на величину струму зварювання.

Опір дроселя та його конструктивні параметри розраховуються на максимально прийнятий струм зварювання [2].

Результати досліджень. Важливим елементом, від якого залежить якість процесу зварювання, є обмотка зв'язку. З її допомогою отримуємо крутоспадну зовнішню характеристику та регулювання величини струму зварювання. Цією позицією технічне виконання зварювального трансформатора відрізняється від класичних схем, при яких дросель вибирають

на мінімальний струм зварювання, а його збільшення досягають зменшенням індуктивного опору (збільшення проміжку між магнітопроводами).

Максимальну кількість витків обмотки зв'язку визначимо, виходячи із мінімального прийнятого струму зварювання (60÷80 А).

Падіння напруги на дроселі при максимальному струмі зварювання знайдемо з виразу:

$$\dot{U}_{min} = \dot{U}_2 - \dot{U}_\delta - \dot{I}_{2max} Z_2, \quad (1)$$

де $\dot{U}_2$ – напруга вторинної обмотки трансформатора, $\dot{U}_2 = 60$ В; $\dot{U}_\delta$ – напруга зварювальної дуги, $\dot{U}_\delta = 20...25$ В; $\dot{I}_{2max}$ – максимально прийнятий струм зварювання, $\dot{I}_{2max} = 200$ А; Z_2 – опір вторинної обмотки, Ом.

Аналогічно при мінімальному струмі зварювання:

$$\dot{U}_{max} = \dot{U}'_2 - \dot{U}_\delta - \dot{I}_{2min} Z_2, \quad (2)$$

де $\dot{U}'_2$ – напруга вторинної обмотки та обмотки зв'язку, $\dot{U}'_2 = \dot{U}_2 \pm \dot{U}_{зв}$ В.

При узгодженому з'єднанні обмоток трансформатора, дроселя та обмотки зв'язку (рис.2), яка охоплює магнітопроводи дроселя та трансформатора, можна вважати, що вона є продовженням числа витків дроселя та трансформатора. Отже, напруга на виході трансформатора збільшиться на величину $\dot{U}_{зв}$.

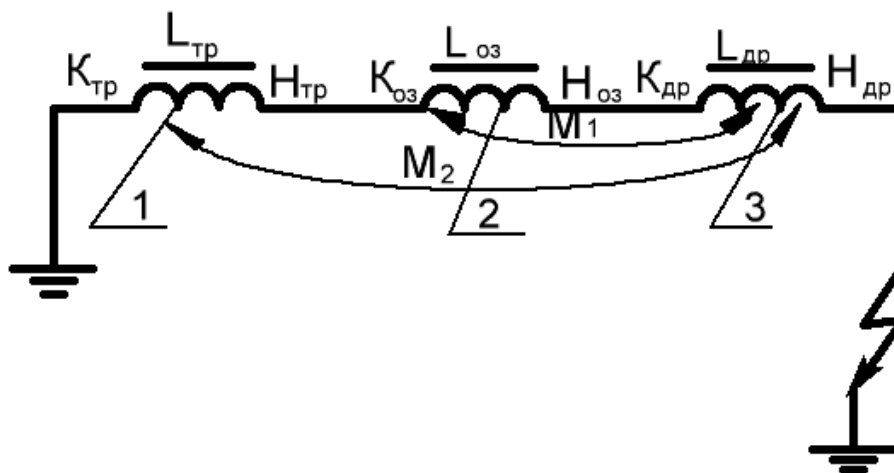


Рис. 2. Схема узгодженого з'єднання обмоток зварювального трансформатора:

1 – вторинна обмотка трансформатора; 2 – обмотка зв'язку; 3 – обмотка дроселя

Знайдемо величину, на яку необхідно збільшити індуктивний опір, щоб отримати струм зварювання 80 А.

$$\Delta X = X_\Sigma - X, \quad (3)$$

де X_{Σ} – сумарний індуктивний опір обмоток дроселя та зв'язку, Ом; X – індуктивний опір дроселя, Ом.

$$\Delta X = L_{\Sigma} 2\pi f, \quad (4)$$

де L_{Σ} – сумарна індуктивність трансформатора і дроселя, які охоплені обмоткою зв'язку, Гн.

$$L_{\Sigma} = \frac{\mu\mu_0 h_{\Sigma} W_{3\phi}^2}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (5)$$

де h_{Σ} – сумарна висота магнітопроводів трансформатора та дроселя, м; μ – відносна магнітна проникність; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна постійна; R_1 , R_2 – внутрішній та зовнішній радіуси магнітопроводу трансформатора (дроселя), м; $W_{3\phi}$ – кількість витків обмотки зв'язку, шт.

Вторинна обмотка трансформатора, обмотка дроселя та зв'язку розраховані на великі струми (>200 А), а отже, активний опір дуже малий і ним можна знехтувати.

Тоді індуктивний опір ΔX визначимо з виразу:

$$\Delta X = \frac{\dot{U}_{max}}{\dot{I}_{2min}} - \frac{\dot{U}_{min}}{\dot{I}_{2max}}. \quad (6)$$

Підставивши значення в (4) отримаємо

$$\frac{\dot{U}_{max}}{\dot{I}_{2min}} - \frac{\dot{U}_{min}}{\dot{I}_{2max}} = f h_{\Sigma} W_{3\phi}^2 \mu\mu_0 \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (7)$$

Звідси число витків обмотки зв'язку

$$W_{3\phi} = \sqrt{\frac{\dot{U}_{max}}{\dot{I}_{2min}} - \frac{\dot{U}_{min}}{\dot{I}_{2max}}} / f h_{\Sigma} \mu\mu_0 \ln \frac{R_2}{R_1}. \quad (8)$$

При узгодженому з'єднанні обмотки зв'язку та вторинної обмотки трансформатора напруга на виході збільшиться на величину $\dot{U}_{3\phi}$, що призведе до деякого збільшення струму зварювання.

$$E_{3\phi} \approx \dot{U}_{3\phi} = 4,44 f W_{3\phi} B (S_{mp} + S_{dp}). \quad (9)$$

Із врахуванням вищевикладеного, число витків обмотки зв'язку визначимо так:

$$\frac{\dot{U}_2 \pm \dot{U}_{3\phi} - \dot{U}_d - \dot{I}_{2min} Z_2}{\dot{I}_{2min}} - \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_d - \dot{I}_{2max} Z_2}{\dot{I}_{2max}} = f h_{\Sigma} W_{3\phi}^2 \mu\mu_0 \ln \frac{R_2}{R_1}. \quad (10)$$

Після математичних перетворень отримаємо рівняння, розв'язавши яке визначимо число витків обмотки зв'язку при узгодженому з'єднанні.

$$f h_{\Sigma} \mu\mu_0 \ln \frac{R_2}{R_1} W_{3\phi}^2 - \frac{4,44 f B (S_{mp} + S_{dp})}{\dot{I}_{2min}} W_{3\phi} - \left(\frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_d - \dot{I}_{2min} Z_2}{\dot{I}_{2min}} - \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_d - \dot{I}_{2max} Z_2}{\dot{I}_{2max}} \right) = 0. \quad (11)$$

Для регулювання струму зварювання в широкому діапазоні доцільно застосувати зустрічне з'єднання обмоток зв'язку та трансформатора (рис.3). При такому з'єднанні одночасно із збільшенням індуктивного опору зменшиться напруга на затискачах обмотки зварювання. Число витків обмотки визначимо з рівняння:

$$fh_{\Sigma}\mu\mu_0\ln\frac{R_2}{R_1}W_{3\phi}^2 + \frac{4,44fB(S_{mp}+S_{dp})}{I_{2min}}W_{3\phi} - \left(\frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_d - I_{2min}Z_2}{I_{2min}} - \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_d - I_{2max}Z_2}{I_{2max}} \right) = 0. \quad (12)$$

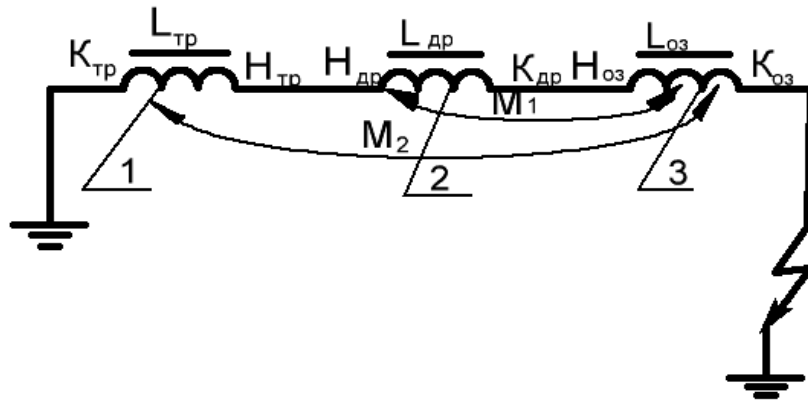


Рис. 3. Схема зустрічного з'єднання обмоток зварювального трансформатора

Для магнітопроводів трансформатора і дроселя прийемо холоднокатану анізотропну сталь марки 3415. Згідно з [4] при магнітній індукції $B = 1,88 \div 1,9$ Тл напруженість магнітного поля становить 2500 А/м, а відносна магнітна проникність $\mu = 605$.

Вихідні дані для розрахунку:

- частота мережі – 50 Гц; магнітна індукція $B = 1,9$ Тл;
- зовнішній радіус магнітопроводу $R_2 = 0,11$ м;
- внутрішній радіус магнітопроводу $R_1 = 0,060$ м;
- площа магнітопроводу трансформатора $S_{тр} = 5 \cdot 10^{-3}$ м²;
- площа магнітопроводу дроселя $S_{др} = 5,28 \cdot 10^{-4}$ м²;
- відносна магнітна проникність $\mu = 605$;
- мінімальний струм зварювання $I_{2min} = 80$ А;
- максимальний струм зварювання $I_2 = 200$ А
- сумарна висота магнітопроводів трансформатора та дроселя $h_{\Sigma} = 0,111$ м.

Підставивши дані та розв'язавши рівняння, отримаємо значення витків обмотки зв'язку. При узгодженому з'єднанні обмоток $W_{зв} = 16$ витків; при зустрічному з'єднанні – 7 витків.

Для регулювання струму зварювання прийемо обмотку зв'язку з сімома витками. Виконаємо п'ять ступенів регулювання: з відпайками 1 виток; 3 витки; 5 витків; 7 витків.

Струми зварювання на відпайках визначимо з виразу:

$$I_2 = \frac{4,44B(S_{mp}+S_{dp})W_{зв} + \dot{U}_2}{h_{\Sigma}\mu\mu_0\ln\frac{R_2}{R_1}W_{зв}^2 + \frac{\dot{U}_2}{I_2}}. \quad (13)$$

Їх значення наведено в таблиці.

Залежність струму зварювання від кількості витків

Узгоджене з'єднання		Зустрічне з'єднання	
Число витків, шт.	Струм, А	Число витків, шт.	Струм, А
1	205	1	190
3	203	3	161
5	189	5	127
7	168	7	86

Висновки

1. Запропоновано конструкцію зварювального трансформатора, що дозволяє зменшити масу системи регулювання струму зварювання в 2,5...3 рази, зменшити розміри до мінімально можливих.

2. Визначено параметри обмотки зв'язку та діапазони регулювання струму зварювання при зустрічному та узгодженому з'єднанні обмоток зв'язку та трансформатора.

Список літератури

1. Брагіда М. В. Розрахунок системи регулювання струму зварювання /М. В. Брагіда, Я. О. Тримпол // Науковий вісник НУБіП України. – К., 2013. – Вип. 184, ч. 1. – С. 187–191.

2. Вольдек А. И. Электрические машины: [учеб. для студ. высш. техн. учеб. заведений] /А. И. Вольдек. — [2-е изд. перераб. и доп.].— Л.: Энергия, 1974. — 840 с.

3. Гольберг О.Д. Проектирование электрических машин: [учеб. для вузов] / Гольберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. — М.: Высш. шк., 1984. — 431 с.

4. Пат. 94540 Україна МПК Н 01 F 30/16/ Трансформатор для зварювання / Брагіда М. В., Гаврилюк В.В., Брагіда Є.М.; заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. — №201005756; заявл. 12. 05. 10; опубл. 10. 05 11. Бюл. №9.

5. Специальные электрические машины: [учеб. пособие для вузов] / [А. И. Бертинов, Д. А. Бут, С. Р. Мизюрин и др.]; под ред. А. И. Бертинова. — М.: Энергоиздат, 1982. — 552 с.

6. Трансформаторы силовые на кольцевых магнитопроводах. Метод расчета: ГОСТ 22412-77. — [Введен 78–07–01]. — М.: Изд-во стандартов, 1977. — 40 с.

7. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97 (МЭК – 868, 1000-3-2) – [Введен 99–01–01]. — М.: Изд-во стандартов, 1999. — 33 с.

Приведена конструкція сварочного трансформатора и предложена методика расчета параметров обмотки регулирования сварочного тока.

Сварочный трансформатор, тороид, магнитопровод, обмотка регулирования, обмотка связи.

The design of the welding transformer is resulted and the design procedure of parameters of a winding of regulating of a welding current is offered.

The welding transformer, toroid, magnetic circuit, regulating winding, the butterfly governor.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ЕКРАНІВ РАДІАТОРІВ У СИСТЕМАХ ВОДЯНОГО ОПАЛЕННЯ

В.О. Лазоренко, кандидат технічних наук

Проведено дослідження впливу теплозахисних екранів на процеси теплообміну при встановленні їх у зонах розміщення радіаторів системи водяного опалення з метою зменшення втрат теплоти та підвищення потенціалу енергозбереження будівель.

Теплозахисні екрани, енергозбереження, системи водяного опалення, термічний опір, теплофізичні характеристики.

На опалення і вентиляцію будівель різного призначення витрачається близько 40 % всіх паливно-енергетичних ресурсів [1,4]. В умовах постійного дефіциту паливних ресурсів в Україні необхідно вдосконалювати конструкції огорожувальних поверхонь будівель шляхом підвищення їх теплозахисних характеристик. Втрати теплової енергії в будинках, побудованих 20...30 років тому, дуже великі і потенціал енергозбереження, який можна реалізувати за рахунок поліпшення теплофізичних характеристик будівель та їх окремих елементів, встановлення теплозахисних екранів радіаторів системи водяного опалення і впровадження систем обліку та регулювання витрат теплоносіїв, як показали проведені нами дослідження [4], становить близько 50 %.

Мета досліджень – вивчення впливу теплозахисних екранів радіаторів системи водяного опалення на процеси теплообміну в опалюваних приміщеннях та на підвищення ефективності роботи опалювальних систем і потенціалу енергозбереження будівель.

Матеріали та методика досліджень. Для покращення естетичного вигляду радіатори систем опалення встановлюються в спеціальних заглибленнях у стінах під вікнами приміщень внаслідок чого зменшується товщина стіни. Процеси переносу теплоти між радіаторами і стіною здійснюється теплопровідністю, конвективним та променистим способами. При цьому температура на внутрішній поверхні стіни підвищується, а одночасне зменшення її товщини призводить до зниження термічного опору та зростання втрат теплоти в навколишнє середовище.

Встановлення теплозахисних екранів між стіною і радіаторами теоретично має знизити втрати теплоти через теплопровідність та променистим способами, оскільки сам екран є додатковим термічним опором на шляху перенесення теплоти, а високий коефіцієнт відбивання радіаційної складової сприяє перенесенню теплоти в зворотному напрямку – від екрана до оточуючого його повітря. У зв'язку з відсутністю теплофізичних характеристик теплозахисних екранів було проведено експериментальне

дослідження коефіцієнтів теплопровідності і термічного опору зразків пінофолу із одностороннім металізованим покриттям, аероізолу із двостороннім металізованим покриттям, поліізолу із одностороннім металізованим покриттям та теплового екрана ТУ 13-20153970-01-95 і з двостороннім металізованим покриттям [3].

При проведенні досліджень теплообміну в систем водяного опалення з встановленими теплозахисними екранами (рисунок) вимірювалися температура повітря в приміщеннях t_B , температура теплоносія t_T у системі опалення, а також температури:

- зовнішнього середовища $t_{\text{зовн.}} = t_6$;
- на поверхні батареї з боку приміщення t_1 ;
- на протилежній (спрямованій у бік стіни) поверхні батареї t_2 ;
- на поверхні теплозахисного екрана t_3 ;
- між екраном і стіною t_4 ;
- на зовнішній поверхні стіни t_5 ;
- у приміщенні без встановлення теплозахисних екранів – $t_B^{\text{безек.}}$ та після встановлення теплозахисних екранів – $t_B^{\text{екр.}}$.

Вимірювання повторювалися зі встановленою періодичністю, а після обробки результатів отримані такі значення температури:

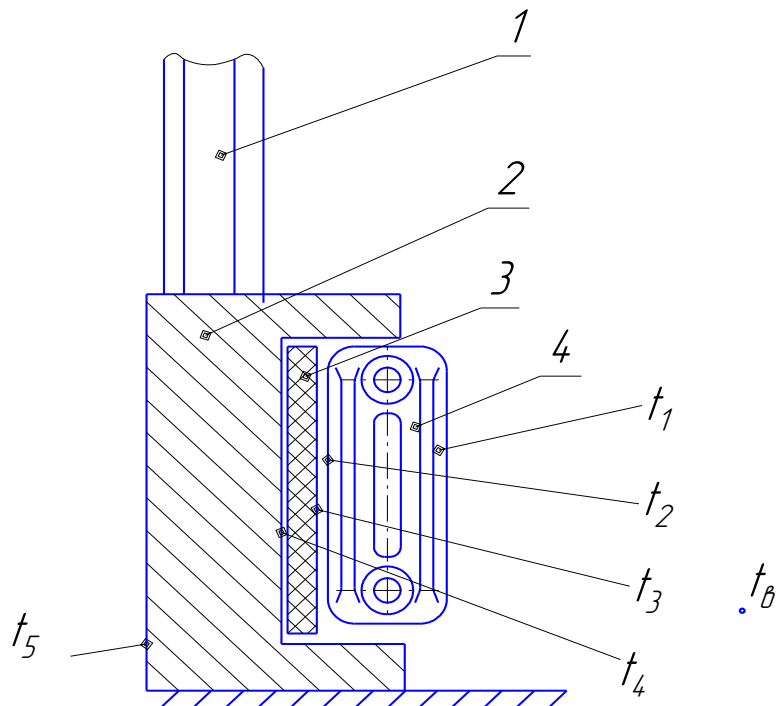


Схема розташування теплових екранів та датчиків температури:

1 – вікна; 2 – стіна; 3 – теплозахисний екран; 4 – батарея

$$t_B^{\text{безек.}} = 18 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_B^{\text{екр.}} = 20 \dots 20,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_1 = 34 \dots 35 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_2 = 34 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_3 = 24 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_4 = 20 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_5 = 3 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_6 = -3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Виконано розрахунки термічного опору екранованих стін, питомих втрат теплоти через поверхню стін без екрана та з екраном, густини теплового потоку, який відбивається від екрана, та сумарного ефекту від використання екранів – зменшення потужності батарей.

Питомі втрати теплоти через стіни, розташовані за опалюваними приладами без екранів, визначалися за формулою:

$$q_{cm} = \frac{t_6 - t_3}{R_{cm}^1}, \quad (1)$$

де R_{cm}^1 – термічний опір стіни без екрана при температурі на внутрішній поверхні стіни (точка 3) $t=t_3=24\text{ }^\circ\text{C}$;

$$R_{cm}^1 = R_{cm} - R_b = 0,75 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}, \quad (2)$$

де R_{cm} – термічний опір стіни, отриманий у попередніх розрахунках [4] ($R_{cm}=0,96\text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$; $R_b=1/\alpha_b$ – термічний опір тепловіддачі від повітря до стіни, коли $\alpha_b=8,7\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$).

Тоді
$$q_{cm} = \frac{24 - (-3)}{0,75} = 36 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Питомі втрати теплоти через ту ж стіну з теплозахисним екраном:

$$q = \frac{t_6 - t_3}{R_{cm}^{екр}}, \quad (3)$$

де
$$R_{cm}^{екр} = R_{cm} - R_b + R_{екр} = 0,836 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}; \quad (4)$$

$R_{екр}$ – температура зовнішнього середовища $t_{зовн.} = t_6$;
термічний опір екрана, $R_{екр}=0,007\text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}$.

Тоді
$$q_{cm}^{екр} = \frac{24 - (-3)}{0,836} = 32,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Втрати тепла через 1 м^2 екранованої поверхні теплопровідністю залишаються на тому ж рівні.

Енергія випромінювання батареї в бік теплозахисного екрана визначається за формулою:

$$q_{випр} = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

де ε – ступінь чорноти чавунних радіаторів, $\varepsilon = 0,81$; C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; T_2 – температура на поверхні батареї, $T_2 = 307 \text{ К}$; T_3 – температура на поверхні екрана, $T_3 = 297 \text{ К}$.

$$\text{Тоді } q_{\text{випр}} = 0,81 \cdot 5,67 \left[\left(\frac{307}{100} \right)^4 - \left(\frac{297}{100} \right)^4 \right] = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (6)$$

Коефіцієнт відбивання $K_{\text{відб.}} = 0,8 \dots 0,97$. За таких умов відбитий питомий тепловий потік становитиме:

$$q_{\text{відб.}} = q_{\text{випр}} (0,8 \dots 0,97) = 40 \dots 48,5 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Залежно від особливостей матеріалу коефіцієнт теплопровідності теплозахисних екранів змінюється від 0,046 до 0,068 $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, а термічний опір від 0,007 до 0,086 $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$. Таким чином, термічний опір стіни в області розташування батарей зростає для пінофолу від 0,75 до 0,836 $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ [3] і тепловий потік через стіну за рахунок теплопровідності зменшується в 1,1 раза (на 10%), а екрана ТУ 13-201153970-01-95 – від 0,75 до 0,757 $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$, а тепловий потік зменшується на 1 %, що знаходиться в межах похибки. Інші теплові екрани мають проміжні показники.

Тепловий потік від батареї до екрана через випромінювання в обох випадках однаковий і становить $q_{\text{випр.}} = 50 \text{ Вт}/\text{м}^2$, а відбитий від екрана тепловий потік при $K_{\text{відб.}} = 0,9$ становить $q_{\text{відб.}} = 45 \text{ Вт}/\text{м}^2$, тобто 90 % теплоти при променистому теплообміні повертається в приміщення для нагрівання повітря. Якщо врахувати зменшення втрат теплоти через теплопровідність, то найефективнішими у використанні будуть теплозахисні екрани, які мають менший коефіцієнт теплопровідності, більший термічний опір та високий коефіцієнт відбивання. Економія теплоти досягається за рахунок променистого теплообміну.

Підвищення температури повітря в приміщенні на 2–2,5 °С з установленними теплозахисними екранами експериментально підтверджують висновок про економічну доцільність встановлення теплозахисних екранів на стінах у зоні розміщення радіаторів у системі опалення будівель різного призначення.

Висновки

На основі результатів досліджень та розрахунків встановлено: термічний опір екранованих ділянок стін в області розташування батарей зростає. Найефективнішими у використанні є теплозахисні екрани, які мають менший коефіцієнт теплопровідності, більший термічний опір та високий коефіцієнт відбивання.

Зменшення втрат теплоти досягається за рахунок відбитого променистого потоку, який становить $q_{\text{відб.}} = 45 \text{ Вт}/\text{м}^2$, тобто 90 % теплоти при

променистому теплообміні повертається в приміщення для нагрівання повітря. При цьому температура повітря в приміщенні з установленими теплозахисними екранами підвищується на 2–2,5 °С .

Список літератури

1. Гершкович Г.В. В Києве стало теплее //Енергозберігаючі технології та автоматизація. – 2002. –№4. –С. 38–39; №5. – С.41– 42.
2. Ковалко М.П. / Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М.П. Ковалко, С.П. Денисюк. – К.: УЕЗ, 1998. – 506 с.
3. Лазоренко В.О. Експериментальне дослідження теплофізичних характеристик теплозахисних екранів радіаторів системи водяного опалення [Електронний ресурс] / В.О. Лазоренко // Енергетика і автоматика. – 2013. – №4.
4. Лазоренко В.О. Потенціал енергозбереження навчального корпусу №3 /В.О. Лазоренко, М.Т. Лут //Науковий вісник НАУ. – К., 2002. –№59. – С. 32–38.

Проведено исследование влияния теплозащитных экранов на процессы теплообмена при установлении их в зонах размещения радиаторов системы водяного отопления с целью уменьшения потерь теплоты и повышения потенциала энергосбережения зданий.

Теплозащитные экраны, энергосбережение, системы водяного отопления, термическое сопротивление, теплофизические характеристики.

Research of influence of heatcover screens to the processes of heat exchange at establishment of them in the zones of placing of radiators of the system of aquatic heating for reduction of losses of warmth and increase of potential of energy-savings building are done.

Heatcover screens, energy-savings, systems of the aquatic heating, thermal resistance, thermophysical descriptions.

УДК 674.047

РОЗРАХУНОК ВТРАТ ТЕПЛОТИ ДІЛЯНКОЮ ЗОВНІШНЬОЇ СТІНИ ЗА РАДІАТОРОМ

А.Г. Колієнко, О.В. Шеліманова, кандидати технічних наук

Наведено методику та приклад розрахунку втрат теплоти ділянкою зовнішньої стіни за наявності тепловідбивального екрана за радіатором.

Радіатор, тепловідбивальний екран, результуючий потік теплоти коефіцієнт поглинання променевого потоку.

променистому теплообміні повертається в приміщення для нагрівання повітря. При цьому температура повітря в приміщенні з установленими теплозахисними екранами підвищується на 2–2,5 °С .

Список літератури

1. Гершкович Г.В. В Києве стало теплее //Енергозберігаючі технології та автоматизація. – 2002. –№4. –С. 38–39; №5. – С.41– 42.
2. Ковалко М.П. / Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М.П. Ковалко, С.П. Денисюк. – К.: УЕЗ, 1998. – 506 с.
3. Лазоренко В.О. Експериментальне дослідження теплофізичних характеристик теплозахисних екранів радіаторів системи водяного опалення [Електронний ресурс] / В.О. Лазоренко // Енергетика і автоматика. – 2013. – №4.
4. Лазоренко В.О. Потенціал енергозбереження навчального корпусу №3 /В.О. Лазоренко, М.Т. Лут //Науковий вісник НАУ. – К., 2002. –№59. – С. 32–38.

Проведено исследование влияния теплозащитных экранов на процессы теплообмена при установлении их в зонах размещения радиаторов системы водяного отопления с целью уменьшения потерь теплоты и повышения потенциала энергосбережения зданий.

Теплозащитные экраны, энергосбережение, системы водяного отопления, термическое сопротивление, теплофизические характеристики.

Research of influence of heatcover screens to the processes of heat exchange at establishment of them in the zones of placing of radiators of the system of aquatic heating for reduction of losses of warmth and increase of potential of energy-savings building are done.

Heatcover screens, energy-savings, systems of the aquatic heating, thermal resistance, thermophysical descriptions.

УДК 674.047

РОЗРАХУНОК ВТРАТ ТЕПЛОТИ ДІЛЯНКОЮ ЗОВНІШНЬОЇ СТІНИ ЗА РАДІАТОРОМ

А.Г. Колієнко, О.В. Шеліманова, кандидати технічних наук

Наведено методику та приклад розрахунку втрат теплоти ділянкою зовнішньої стіни за наявності тепловідбивального екрана за радіатором.

Радіатор, тепловідбивальний екран, результуючий потік теплоти коефіцієнт поглинання променевого потоку.

Опалювальні прилади звичайно встановлюють біля зовнішніх стін приміщення. Працюючий прилад активно нагріває ділянку стіни, розташовану безпосередньо за ним. Таким чином, температура цієї ділянки значно вище, ніж інша область стіни, і може досягати 50°C [2]. Замість того, щоб використовувати все тепло для обігріву повітря всередині квартири, радіатор витрачає тепло на обігрів холодних цегли або бетонних плит зовнішньої стіни будівлі.

Істотно знизити теплові втрати в цій ситуації дозволяє встановлення тепловідбивальних екранів, що ізолюють ділянки стін, які розташовані за опалювальними приладами [3]. Як екрани використовуються матеріали з низьким коефіцієнтом теплопровідності (близько $0,05 \text{ Вт} / \text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}$), що мають спінену основу з одностороннім фольгуванням. При цьому, розраховуючи економію теплової енергії при застосуванні екрана, більшість дослідників враховують лише зменшення теплового потоку через зовнішню стіну внаслідок збільшення термічного опору і не розглядають такого фактора, як зниження внутрішньої температури стінки внаслідок віддзеркалення теплового потоку фольговою поверхнею екрана.

Мета досліджень – оцінка впливу термічного опору стіни та тепловідбивальної здатності екрана на економію теплової енергії.

Матеріали та методика досліджень. Взаємне розташування радіатора та тепловідбивального екрана показано на рис.1. На рис. 2 наведено характерні поля температур (а) та теплові потоки, що виникають при встановленні тепловідбивального екрана за радіатором (б).

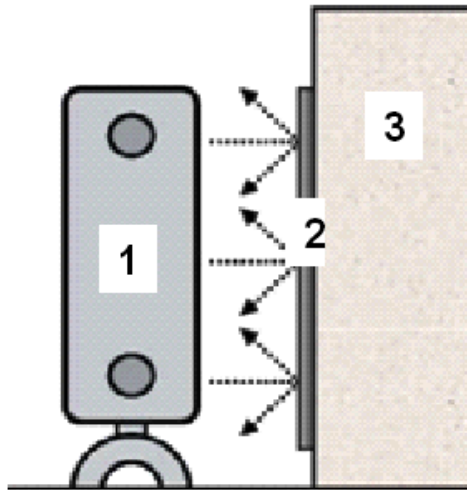


Рис.1. Теплова ізоляція ділянки зовнішньої стіни за радіатором:

1 – радіатор; 2 – тепловідбивальний екран; 3 – зовнішня стінка

Температуру на поверхні опалювального приладу t_n приймаємо рівною середній температурі води в системі опалення (між подавальною і зворотною лініями при середній температурі зовнішнього повітря опалювального періоду).

На рис. 2 t_g'' та t_3'' – температури на внутрішній стінці за опалювальним приладом та на зовнішній стінці, відповідно, за відсутності тепловід-

бивального екрана; а t'_ϵ та t'_3 – ці ж температури за його наявності. В цьому випадку температури на поверхнях стінки нижчі, оскільки частина теплового потоку віддзеркалюється екраном.

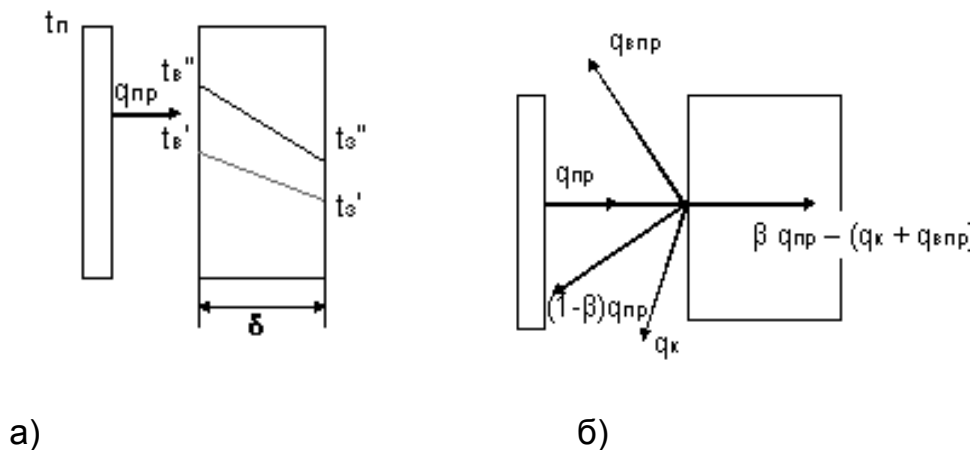


Рис. 2. Розподіл температур (а) та баланс теплових потоків (б) у системі „зовнішня стінка – екран”

Приведений тепловий потік від опалювального приладу $q_{пр}$, Вт / м² можна визначити за його характеристиками.

Кількість променевої теплоти, яка віддзеркалюється від внутрішньої поверхні стінки $(1 - \beta) q_{пр}$, Вт/м², буде змінюватися разом із віддзеркалювальними характеристиками стінки.

Від нагрітої стінки теплота конвекцією передається до більш холодного повітря:

$$q_k = \alpha_\epsilon (t_\epsilon - t_n).$$

Коефіцієнт тепловіддачі природною конвекцією на внутрішній поверхні огороження можна визначити за формулою [1]

$$\alpha_\epsilon = 2 (t_\epsilon - t_n)^{0,25}, \text{ Вт / м}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Є власний потік випромінюванням з внутрішньої поверхні стінки [1]:

$$q_{епр} = C \epsilon_{пр} \left[\left(\frac{273 + t_\epsilon}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_n}{100} \right)^4 \right].$$

Результуючий потік спричиняє втрати теплоти

$$q_p = \beta q_{пр} - q_k + q_{епр}. \quad (1)$$

Результуючий тепловий потік можна також визначити із неповного рівняння теплопередачі (враховуємо лише теплопровідність і тепловіддачу на зовнішній стінці):

$$q_p = k' (t_\epsilon - t_3), \quad (2)$$

де t_3 – температура зовнішнього повітря, ⁰С, яку можна прийняти рівною середній температурі опалювального періоду; k' – коефіцієнт теплопередачі, який є оберненим сумарному термічному опору

$$k' = \frac{1}{R_o'} = \frac{1}{\sum \delta / \lambda + 1 / \alpha_3}.$$

Величину α_3 для конвекції визначаємо за виразом [1]:

$$\alpha_3 = 11,63 \sqrt{w}.$$

Отже, для швидкості $w = 1$ м/с $\alpha_3 = 11,63$ Вт / м²·°C.

Прирівнявши (1) і (2), визначимо невідому величину температури на внутрішній поверхні для випадків відсутності та наявності відзеркалювального екрана. За залежністю (2) знаходимо втрати теплоти ділянкою стіни за радіатором, підставляючи відповідні значення температури внутрішньої стінки та коефіцієнта теплопередачі.

Результати досліджень. Розрахунки втрат теплоти зовнішньої стіни будівлі виконувались за таких вихідних даних:

- температура на поверхні опалювального приладу, $t_n = 60$ °C;
- температура зовнішнього повітря $t_3 = -1,1$ °C;
- температура внутрішнього повітря $t_b = 20$ °C;
- опалювальний прилад: чавунний п'ятисекційний радіатор розмірами 0,6x0,5 м, ступінь чорноти повного випромінювання якого $\varepsilon_p = 0,82$;
- матеріал стіни – штукатурка вапняна $\varepsilon_c = 0,91$, $\lambda = 0,68$ Вт / м·°C, $\delta = 0,01$ м;
- та кладка з червоної цегли $\lambda = 0,7$ Вт / м·°C, $\delta = 0,35$ м;
- тепловідбивальний екран розмірами 0,7x0,7 м, матеріал – ізолон товщиною $\delta_{iz} = 4$ мм, коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{iz} = 0,044$ Вт / м·°C, армований алюмінієвим шаром, ступінь чорноти якого $\varepsilon_{ek} = 0,055$.

Результати розрахунку зведені в таблиці.

Як видно з даних таблиці застосування тепловідбивального екрана дозволяє зменшити загальні втрати теплоти ділянки стіни за радіатором приблизно на 20 %.

Розрахунки втрат теплоти зовнішньої стіни будівлі

Розрахунковий параметр	Тепловідбивальний екран	
	відсутній	наявний
Коефіцієнт поглинання променевого потоку стінкою $\beta = 1 / \varepsilon_{np}$	0,758	0,55
Коефіцієнт теплопередачі $k' = \frac{1}{R_o'} = \frac{1}{\sum \delta / \lambda + 1 / \alpha_3}$, Вт / м ² ·°C	1,67	1,45
Температура на внутрішній поверхні стінки t'_s , °C	45	40
Втрати теплоти $q_p = k' (t'_s - t_3)$, Вт / м ²	77	60

Висновки

Розраховано загальне зниження втрат теплоти ділянки стіни за радіатором при застосуванні тепловідбивального екрана, що спричинені двома факторами: збільшенням термічного опору стіни та зниженням внутрішньої температури стінки внаслідок віддзеркалення теплового потоку. Окремий вплив кожного з цих факторів потребує подальших досліджень.

Список літератури

1. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление: справ. пособие / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
2. Сафіуліна К.Р. Енергозбереження в університетських містечках / Сафіуліна К.Р., Колінко А.Г., Тормасов Р.Ю. – К.: ТОВ «Поліграф плюс», 2010. – 328 с.
3. Оценка влияния теплоотражающих экранов за отопительными приборами на снижение тепловых потерь. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.proffenergy.ru/news/65-otsenka.html>.

Приведена методика и пример расчета потерь теплоты участком наружной стены за радиатором при наличии теплоотражающего экрана.

Радіатор, теплоотражаючий екран, результуючий потік теплоти, коефіцієнт поглинання лучистого потоку.

The method and an example of calculating heat losses of the outer wall behind the radiator in the presence of warm-reflecting screen are given.

Radiator, warm-reflecting screen, the resulting heat flow, absorption coefficient of radiant flux.

УДК 621.3.066.5/6:636

РАНЖУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ПУСКАЧ

***В.В. Коробський, кандидат технічних наук
В.О. Москаленко, студент магістратури***

Наведено класифікацію експлуатаційних факторів впливу на електромагнітний пускач, виявлено значимість факторів, ступінь їх впливу на показники надійності пускача і комутуючого пристрою.

Рангова кореляція, електромагнітний пускач, експлуатаційні фактори, контактний матеріал, показники надійності, комутаційна зносостійкість, надійність контактування, стійкість проти зварювання.

Висновки

Розраховано загальне зниження втрат теплоти ділянки стіни за радіатором при застосуванні тепловідбивального екрана, що спричинені двома факторами: збільшенням термічного опору стіни та зниженням внутрішньої температури стінки внаслідок віддзеркалення теплового потоку. Окремий вплив кожного з цих факторів потребує подальших досліджень.

Список літератури

1. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление: справ. пособие / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
2. Сафіуліна К.Р. Енергозбереження в університетських містечках / Сафіуліна К.Р., Колінко А.Г., Тормасов Р.Ю. – К.: ТОВ «Поліграф плюс», 2010. – 328 с.
3. Оценка влияния теплоотражающих экранов за отопительными приборами на снижение тепловых потерь. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.proffenergy.ru/news/65-otsenka.html>.

Приведена методика и пример расчета потерь теплоты участком наружной стены за радиатором при наличии теплоотражающего экрана.

Радіатор, теплоотражаючий екран, результуючий потік теплоти, коефіцієнт поглинання лучистого потоку.

The method and an example of calculating heat losses of the outer wall behind the radiator in the presence of warm-reflecting screen are given.

Radiator, warm-reflecting screen, the resulting heat flow, absorption coefficient of radiant flux.

УДК 621.3.066.5/6:636

РАНЖУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ПУСКАЧ

***В.В. Коробський, кандидат технічних наук
В.О. Москаленко, студент магістратури***

Наведено класифікацію експлуатаційних факторів впливу на електромагнітний пускач, виявлено значимість факторів, ступінь їх впливу на показники надійності пускача і комутуючого пристрою.

Рангова кореляція, електромагнітний пускач, експлуатаційні фактори, контактний матеріал, показники надійності, комутаційна зносостійкість, надійність контактування, стійкість проти зварювання.

У процесі експлуатації електромагнітні пускачі знаходяться під різноманітними впливами, які визначаються режимами їх роботи і навколишнім середовищем. Тому, необхідно мати відомості про п'ять-шість найбільш значимих факторів, які визначають стан пускача при одночасному впливі на пускач декількох десятків експлуатаційних факторів. При лабораторних дослідженнях пускачів, нових контактних матеріалів врахування впливу всіх факторів і властивостей матеріалів є складною багатосторонньою задачею, вимагає постановки великої кількості експериментів.

На рис. 1 наведена класифікація експлуатаційних факторів впливу та основні показники надійності пускачів. Надійність для пускачів визначається показниками безвідмовності $P_k(t)$, T_k , T_m ; довговічності $T_{рук}\%$, $T_{слу}\%$; збережуваності $T_{зг}\%$; ремонтпридатності T_B [2, 4, 5, 7].

Мета досліджень – визначення найвпливовіших експлуатаційних факторів на параметри надійності електромагнітного пускача: комутаційну зносостійкість, надійність контактування, стійкість проти зварювання.

Матеріали та методика досліджень. На нашу думку, найсуттєвішим для пускачів 1 та 2 величин (з $I_{ном} \leq 25$ А), які працюють в агресивному середовищі тваринницьких приміщень, є параметри комутуючого пристрою: зносостійкість (електрична T_k , механічна T_m), корозійна тривкість (надійність контактування), яка характеризується стабільністю контактного опору в часі і стійкість проти зварювання [3], оскільки більше 60 % відмов пускачів відбувається внаслідок відмов комутуючих пристроїв [6, 8].

Наявність у навколишньому середовищі хімічно-активних домішок, підвищена вологість і температура безпосередньо впливають на корозійну тривкість контактних матеріалів, яка визначається хімічними властивостями (в першу чергу електродним потенціалом). Тут основним механізмом є електрохімічна корозія, коли контактні елементи утворюють гальванічну пару. Комутація струму тільки посилює корозійні процеси, які протікають на робочих поверхнях контактів.

На значення заданих показників надійності пускача суттєво впливає ряд експлуатаційних факторів, тому доцільно виявити значимість факторів, ступінь їх впливу на показники надійності пускача і комутуючого пристрою. Одним із ефективних методів відсіювання незначимих і виділення значимих факторів є їх ранжування (розміщення за порядком зменшення важливості), суть якого ґрунтується на оцінці спеціалістами-експертами ступеня впливу кожного фактора на конкретний параметр надійності [1].

Результати досліджень. У процесі аналізу літературних даних про стан експлуатації пускачів [3, 8] ми визначили такий ряд факторів ($n=12$), які найсуттєвіше впливають на згадані вище параметри надійності електромагнітних пускачів. Визначення середніх і екстремальних значень факторів проводиться на основі аналізу експлуатаційних даних за допомогою методів математичної статистики. Найбільш імовірні значення факторів наведено в таблиці.

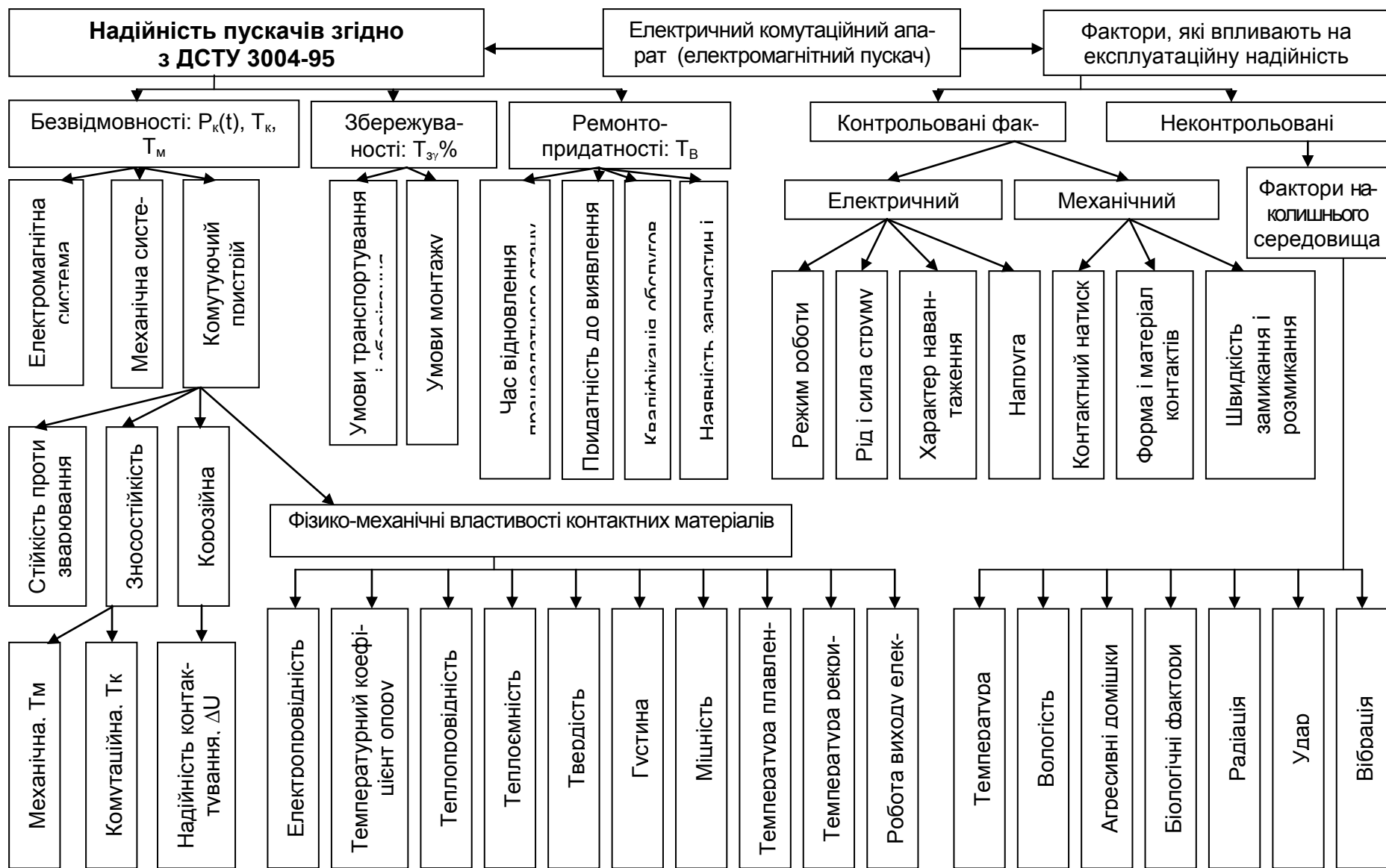


Рис. 1. Класифікація факторів впливу і показників надійності електромагнітного пускача

До визначених дієвих факторів входять фактори електричного впливу (напруга, сила струму, рід струму, характер навантаження, режим роботи), фактори механічного впливу (контактний натиск, швидкість замикання і розмикання контактів, матеріал контактів), а також фактори кліматичного впливу.

Фактори рангової кореляції електромагнітних пускачів

Символ фактора	Назва фактора	Розмірність, інтервал варіювання, інші умови
U	Напруга	0...380 В
I	Сила струму	0...25 А
cos φ	Характер навантаження	0,35...1,0
S	Режим роботи (комутації)	Тривалий Перервно-тривалий Повторно-короткотривалий
V _l	Рід струму	Змінний, постійний
P _{кон}	Контактний натиск	50...250 Н
M _{кон}	Матеріал контактів	На основі Ag і Cu
K _{кон}	Конструкція робочих поверхонь контакт-деталей	Площина, напівсфера
V _{кон}	Швидкість замикання і розмикання контактів	0,25...1,35 м/с
G ₁	Стан навколишнього середовища (температура, атмосферний тиск, вологість)	t= 5...35 °С; W=45-100%; p= 0,5-1,5 атм.
G ₂	Стан наколишнього середовища (хімічно-активні домішки)	φ=0...38 мг/м ³ (NH ₃); φ=0...35 мг/м ³ (H ₂ S); φ=0...0,4 % (CO ₂)
M	Механічні впливи	Удар, вібрація, прискорення

Ранжування факторів по кожному визначальному параметру проводиться з урахуванням літературних даних [7, 8] на основі опитувальних анкет, які заповнюються експертами-спеціалістами в галузі експлуатації електро-обладнання і дослідження електричних контактів (кількість експертів m=10). Узгодженість оцінок і думок експертів оцінювалася коефіцієнтом конкордації: $0 \leq w \leq 1$; коли $w = 0$, то це констатує відсутність будь-якої згоди (узгодженості) в оцінках експертів; коли $w = 1$, - говорить про повну згоду [1]. Значущість коефіцієнта w оцінювалася за критерієм « χ^2 ». Гіпотеза про наявність згоди не спростовується (підтверджується) при вибраному рівні значущості $\alpha = 0,05$, якщо розрахункове значення χ^2_p більше табличного ($\chi^2_t = 4,58$ при $\alpha = 0,05$ і числу ступенів свободи $f = n - 1 = 11$).

Враховуючи те, що для всіх розглянутих випадків ранжування факторів $\chi^2_p > \chi^2_t$ (при $\alpha = 0,05$ і $f = 11$), то доведено значущість коефіцієнтів конкордації, тобто має місце хороша узгодженість. Відповідно до отриманих даних побудовано ступінчасту діаграму рангів (по осі абсцис відкладено фактори, а по осі ординат - відповідні суми рангів $\sum_{j=1}^m a_{ij}$). Чим більша

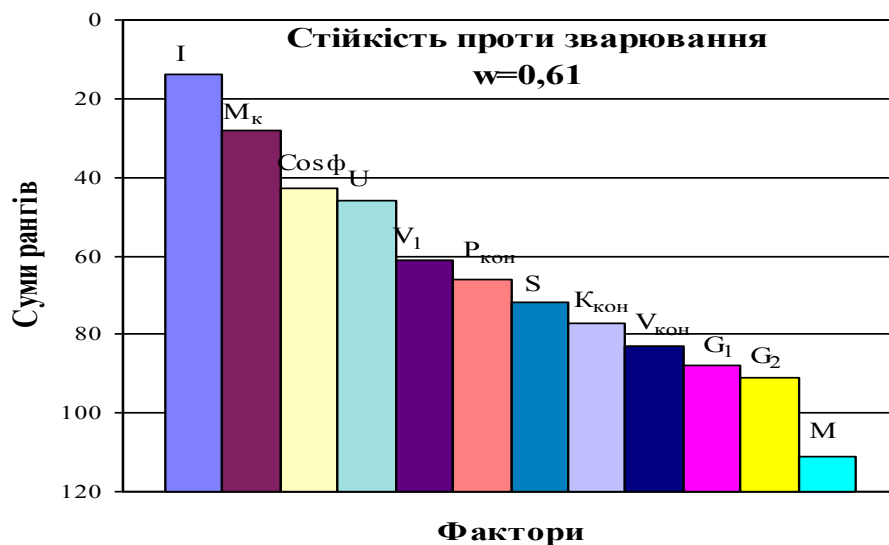
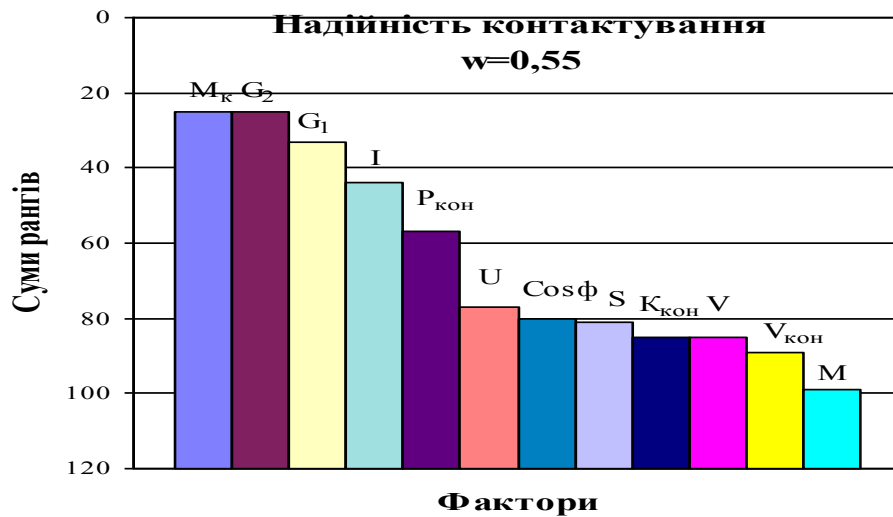
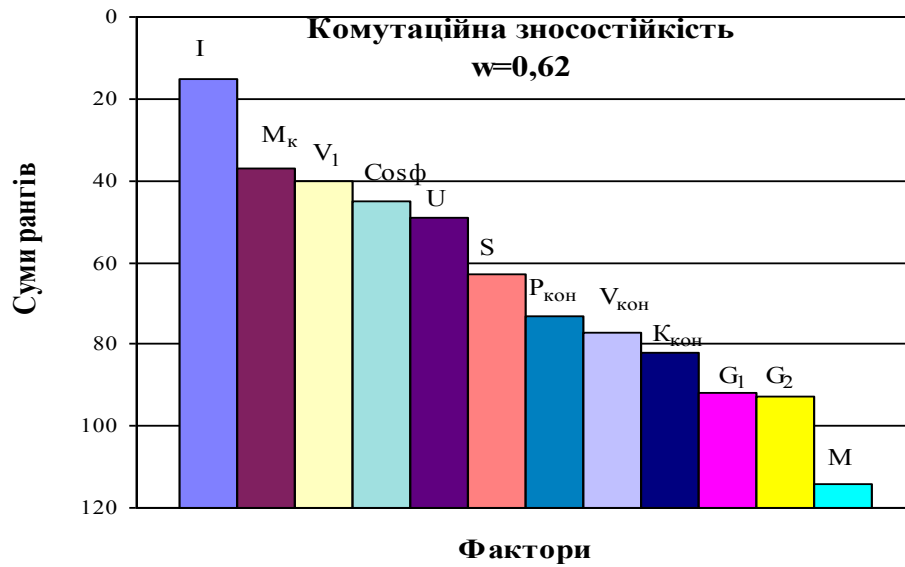


Рис. 2. Ступінчасті діаграми рангової кореляції факторів впливу на показники надійності електромагнітного пускача

сума рангів фактора, тим менш він суттєвий. Діаграму рангів розміщують ступенево по мірі зменшення значущості факторів [9]. Дані ранжування факторів інтерпретовані в графічній формі на рис 2.

Висновки

1. Фактори, які впливають на кожний параметр окремо і на працездатність комутуючого пристрою пускача в цілому (в сукупності трьох параметрів), можна розділити на три основні групи: головні, суттєві і несуттєві.

2. Застосований метод апіорної рангової кореляції факторів впливу на параметри надійності пускача дозволяє при відпрацюванні методики дослідження пускачів виділити величину сили струму, матеріал контактів і наявність агресивного середовища як головні фактори, що визначають надійність комутуючих пристроїв електромагнітних пускачів.

Список літератури

1. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г.Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 396 с.
2. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними: ДСТУ 3004-95. – [Чинний від 01.01.96], – К.: Держстандарт України, 1995. – 130 с.
3. Омельченко В.Г. Влияние материалов разнородных электрических пар на их сопротивление / В.Г.Омельченко, Е.В.Роженченко // Вестник ХПИ, №166. – 1980. – Вып. 5. – С. 23 – 25.
4. Пястолов А.А. Применение летучих ингибиторов для защиты электрооборудования животноводческих ферм / А.А.Пястолов, А.А.Большаков, О.И.Голяницкий // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1970. – №1. – С. 25-28.
5. Райченко О.Ю. Підвищення надійності електрообладнання на тваринницьких фермах і комплексах / О.Ю. Райченко. – К.: Урожай, 1977. – 96 с.
6. Рыбин Г.Я. Надежность контактов электромагнитных реле по материалам эксплуатации / Г.Я.Рыбин // Электрические контакты. – М.: Энергия, 1967. – С. 500–508.
7. Сырых Н.Н. Эксплуатация сельских электроустановок / Н.Н.Сырых. – М.: Агропромиздат, 1986. – 225 с.
8. Таран В.П. Техническое обслуживание электрооборудования в сельском хозяйстве / В.П.Таран. – М.: Колос, 1975. – 304 с.
9. Шведков Е.П. Элементарная математическая статистика в экспериментальных задачах материаловедения / Е.П.Шведков. – К.: Наук. думка, 1975. – 112 с.

Приведена класифікація експлуатаційних факторів впливу на електромагнітний пускатель, виявлена значимість факторів, ступень їх впливу на показателі надійності пускателя і комутуючого пристрою.

Ранговая корреляция, электромагнитный пускатель, эксплуатационные факторы, контактный материал, показатель надежности, коммутационная износостойкость, надежность контактирования, стойкость к свариванию.

A classification of operational factors influence the electromagnetic starter, revealed the importance of factors, the extent of their effect on the reliability of the starter and the switching device.

The rank correlation, electromagnetic starter, operational factors, contact material, the reliability index, patch wear resistance, reliability contacting, resistance welding.

УДК 621.762

МЕТАЛОГРАФІЧНИЙ ТА ЕЛЕКТРОННО-МІКРОСКОПІЧНИЙ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ

***А. М. Мрачковський, кандидат технічних наук
А.В. Стоянова, студентка магістратури***

Досліджено електромеханічні, теплові та фізико-хімічні процеси, що відбуваються на робочих поверхнях контакт-деталей при комутації струму.

Проведено мікроструктурний аналіз матеріалів на основі Ag з оксидними домішками для виявлення картини розподілу зміцнюючих добавок у матриці.

Контакти, мікроструктурний аналіз, композиційні матеріали, електрична дуга, гетерофазна структура, срібна матриця.

У процесі експлуатації електромагнітних пускачів відбувається електрична ерозія контактів, фізико-хімічні зміни властивостей електроізоляційних матеріалів, спрацьовування конструкційних деталей, що призводить до відмови пускачів.

Головними факторами, які визначають надійність роботи контактних деталей, є сила струму, характер навантаження, частота комутацій, контактний натиск, швидкість розмикання контактів, кінетична енергія при їхньому замиканні, вібрація, провал, розхил контактів та вплив факторів навколишнього середовища.

Мета досліджень – розробка науково-обґрунтованих заходів підвищення екологічної безпеки пускачів і підвищення їхньої експлуатаційної надійності за рахунок застосування нових екологічно безпечних і ерозійно стійких контактних матеріалів.

Матеріали та методика досліджень. Для дослідження електромеханічних, теплових та фізико-хімічних процесів, що відбуваються на робочих поверхнях контактних деталей при комутації струму використовувалися відомі та розроблені нові методики досліджень із виготовленням відповідних експериментальних установок та обладнання. Методи мікроскопії

A classification of operational factors influence the electromagnetic starter, revealed the importance of factors, the extent of their effect on the reliability of the starter and the switching device.

The rank correlation, electromagnetic starter, operational factors, contact material, the reliability index, patch wear resistance, reliability contacting, resistance welding.

УДК 621.762

МЕТАЛОГРАФІЧНИЙ ТА ЕЛЕКТРОННО-МІКРОСКОПІЧНИЙ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ

***А. М. Мрачковський, кандидат технічних наук
А.В. Стоянова, студентка магістратури***

Досліджено електромеханічні, теплові та фізико-хімічні процеси, що відбуваються на робочих поверхнях контакт-деталей при комутації струму.

Проведено мікроструктурний аналіз матеріалів на основі Ag з оксидними домішками для виявлення картини розподілу зміцнюючих добавок у матриці.

Контакти, мікроструктурний аналіз, композиційні матеріали, електрична дуга, гетерофазна структура, срібна матриця.

У процесі експлуатації електромагнітних пускачів відбувається електрична ерозія контактів, фізико-хімічні зміни властивостей електроізоляційних матеріалів, спрацьовування конструкційних деталей, що призводить до відмови пускачів.

Головними факторами, які визначають надійність роботи контактних деталей, є сила струму, характер навантаження, частота комутацій, контактний натиск, швидкість розмикання контактів, кінетична енергія при їхньому замиканні, вібрація, провал, розхил контактів та вплив факторів навколишнього середовища.

Мета досліджень – розробка науково-обґрунтованих заходів підвищення екологічної безпеки пускачів і підвищення їхньої експлуатаційної надійності за рахунок застосування нових екологічно безпечних і ерозійно стійких контактних матеріалів.

Матеріали та методика досліджень. Для дослідження електромеханічних, теплових та фізико-хімічних процесів, що відбуваються на робочих поверхнях контактних деталей при комутації струму використовувалися відомі та розроблені нові методики досліджень із виготовленням відповідних експериментальних установок та обладнання. Методи мікроскопії

дозволяють значно розширити уяву про механізм і кінетику ряду процесів порошкової металургії і структуроутворення, яке суттєво впливає на формування властивостей електроконтактних матеріалів.

Результати досліджень. Мікроструктурний аналіз матеріалів на основі Ag з оксидними домішками дозволяє виявити загальну картину розподілу зміцнюючих добавок у матриці. Частинки оксидів, які введені в срібну матрицю внутрішнім окисленням, розподілені відносно рівномірно, у вигляді точкових включень.

Мікроструктура зразків матеріалу при введенні різних оксидів подібна: вирізняється матриця зернистої будови світлого тону, зерна відтінені другою фазою, яка залягає між їх межами.

Дослідження показали, що із збільшенням оксидів у матриці з'являються окремі їх скупчення, розміри проміжків між зернами зростають, частинки срібла майже повністю ними оточені.

Структура руйнування поверхні композиційних матеріалів тісно пов'язана з їх природою і залежить від розміру частинок, їх об'ємної кількості і міцності поверхні розподілу.

Кінцева структура слабострумових електричних контактів формується шляхом диспергування структурних складових і виникнення анізотропності матеріалу в результаті направленої деформації з одночасним утворенням субструктури. Формування анізотропної гетерофазної структури у багатоскладових композиціях, спрямований розподіл у структурі теплопровідності і електропровідності компонентів призводять до високих значень електро- і теплопровідності матеріалу в цілому, що надає йому високу електроерозійну стійкість.

Введення в срібну матрицю оксидів In і Mn 5% не дозволяє холодну деформацію. З'являється текстура в результаті прокатки, формується анізотропна структура електроконтактного матеріалу. Добавка Zr в Ag викликає механізм в'язкого руйнування.

Композиційні матеріали, зміцнені оксидами, тугоплавким матеріалом, потребують п'яти-десятиразової прокатки з проміжним відпалюванням протягом години при температурі 600 °C у повітрі. Процеси пластичної деформації остаточно формують структуру електроконтактного матеріалу.

Введення нерозчинних фаз сприяють інтенсивному подрібненню зерен срібної матриці. Частинки нерозчинних компонентів також подрібнюються (диспергуються) і вибудовуються вздовж деформованих зерен срібла, зберігаючи орієнтацію в напрямку деформації. Ланцюги оксидів матриці витягуються під дією деформуючих сил при зміні форми зерна.

Металографічний та рентгеноспектральний аналіз структури робочої поверхні серійних контактів. Поглиблене вивчення фізичних процесів, які відбуваються на робочій поверхні контактів у процесі експлуатації, спрямовано на усунення електричної ерозії, яка є однією з основних причин їх руйнування. Мікроструктура матеріалу – один із головних факторів, що впливає на властивості електричного контакту. Вона залежить перш за все від технології виробництва, властивостей складових

вих частин, а також від конструктивних особливостей апарата, енергії електричної дуги, стану навколишньої атмосфери.

На рис.1 наведена вихідна мікроструктура контактного матеріалу типу СрН-10 електромагнітного пускача ПМЛ-1100А. Вона являє собою рівномірну дрібнозернисту суміш срібної та нікелевої фази, частинки яких витягнулися паралельно напрямку прокатки дроту, забезпечуючи анізотропність фізичних характеристик.

У міру наближення до робочої поверхні розміри зерен срібної та нікелевої фази збільшуються внаслідок термічної дії дуги. На робочій поверхні контакту зменшується кількість срібла за рахунок значно нижчої, ніж у нікелю температури випаровування.

У тих місцях матеріалу, де було срібло й скупчення зерен тугоплавкої складової нікелю, з'являються дрібні пори і раковини. Глибина шару, в якому відбуваються мікроструктурні зміни, досягає 0,05 – 0,08 мм. Як на контактній поверхні безпосередньо, так і на глибині до 0,05мм нікель окислюється.

Під час роботи електричного контакту відбувається плавлення та інтенсивне випаровування легкоплавкої складової – срібла з робочої поверхні катода, внаслідок чого формується дискретна, шорстка поверхня (рис.2). Ступінь шорсткості залежить від сили струму та числа комутацій.

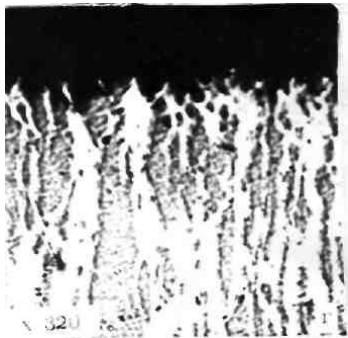


Рис.1. Мікроструктура рухомого контакту із матеріалу СрН-10 електромагнітного пускача ПМЛ-1100А після 100 000 комутацій



Рис.2. Зовнішній вигляд рухомого контакту із матеріалу СрН-10 електромагнітного пускача ПМЛ-1100А після 100 000 комутацій

На ерозійній поверхні з'явилися крупні виступи, а в заглибленнях структури – світлі включення, які за даними рентгеноспектрального аналізу являють собою срібло. Хімічний аналіз приповерхневого шару показав, що кількість нікелю на робочій поверхні значно збільшується (від 10 до 20–25 %), що свідчить про першочерговість випаровувань срібла із поверхні контакту в процесі комутації електричного струму.

Детальне дослідження робочої поверхні контактів дозволило встановити, що внаслідок дії дуги плавиться не тільки легкоплавка композиція – срібло, але також і зерна нікелю (рис.3,а), що підтверджується наявністю характерних ступенів затвердіння по краях нікелевих зерен (рис.3,б). Загуслі зерна нікелю мають форму конуса, що є типовим для мостикового переносу (рис.3,в). На вершинах деяких нікелевих зерен утворюються ді-

лянки в'язкого відриву, що свідчить про руйнування матеріалу після злипання контактів.

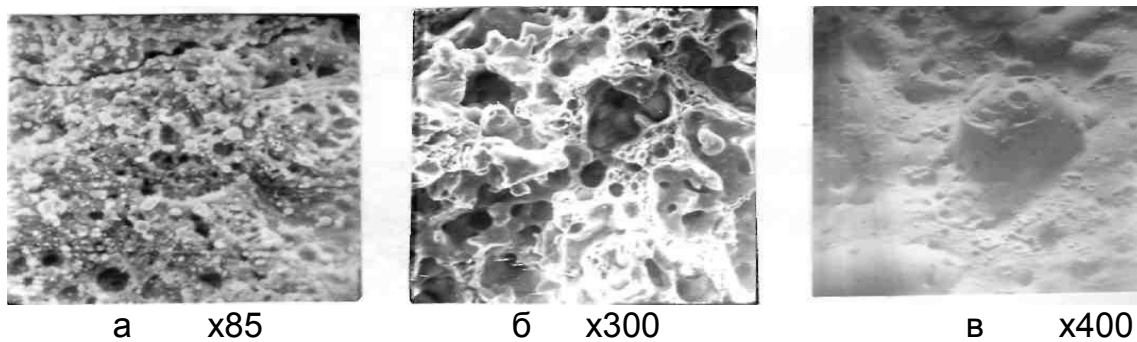


Рис. 3. Електронно-мікроскопічні знімки поверхні контактів СрН-10 після 100 000 комутацій

Отримані результати дають змогу стверджувати, що контактування в останній момент здійснюється на точках тугоплавкої складової, яка і визначає здатність матеріалу до зварювання.

Дослідження показали, що найнижчу електроерозійну стійкість мають контакти із матеріалу СрМ-0,2, такого хімічного складу: Cu(0,1–0,5 %); Ni(0,005–0,2 %), Ag – решта. При комутації струму силою 4; 6,3 та 10 А спостерігається обгорання та оплавлення робочих поверхонь контактів із цього матеріалу. Металографічний аналіз показав, що в процесі роботи мікроструктура поверхневих шарів суттєво змінюється.

На рис.4 видно, що при комутації струму матеріал, який нагрівається до температури кипіння, частково переноситься на поверхню більш холодного нерухомого контакту, а решта осідає знову на поверхню рухомого, утворюючи порожнини (на рисунку чорні кратери) і стовпчасті зерна, перпендикулярні до робочої поверхні контакту.

Мікроструктура нерухомого і рухомого контакту різна за своєю будовою. На рис.5 поверхня анода вкрита дрібними зернами парів металу катода, які кристалізувались при гасінні електричного розряду. Тут можна бачити також збільшені зерна срібла, що утворилися внаслідок рекристалізації під дією температури парів металу.



Рис.4. Мікроструктура контакту із матеріалу СрМ-0,2 після 100 000 комутацій

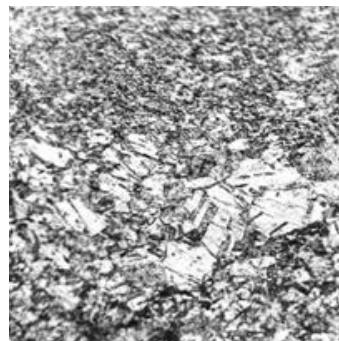


Рис.5. Мікроструктура анода контакту із матеріалу СрМ-0,2 після 100 000 комутацій

При комутації постійного струму відбувається направлене перенесення матеріалу з рухомого контакту на нерухомий. Внаслідок цього на катоді утворюється кратер, а на аноді – виступ.

Висновки

1. Структура руйнування поверхні композиційних матеріалів тісно пов'язана з їх природою і залежить від розміру частинок, їх об'ємної кількості і міцності поверхні розділу.

2. Контактуювання здійснюється на точках тугоплавкої складової, яка і визначає здатність матеріалу до зварювання.

3. Введенням додатково в срібну матрицю важкорозчинних фаз типу оксидів та тугоплавких металів дозволяє регулювати масоперенос на контакт-деталях та підвищувати електроерозійну стійкість у цілому.

4. Встановлена нелінійна залежність зміни електричної ерозії від сили струму, характеру навантаження, числа комутацій, фізико-механічних властивостей матеріалу та його мікроструктури для матеріалів на основі срібла.

Список літератури

1. Белкин Г.С. Исследование элетрической эрозии металлокерамических аппаратов / Г.С. Белкин, М.Е.Данилов // Электричество. – 1972. – № 2. – С. 12 – 18.

2. Исследование эрозии металлокерамических контактов на основе серебра и никеля при коммутации малых токов. Электрические контакты: навч.посіб./ [Бейлис И.И., Братерская Г.Н., Раховский В.Н., Теодорович О.К.]. – М.: Энергия, 1987. – 305 с.

3. Мастеров В. А. Серебро, сплавы и биметаллы на его основе: справ. / В. А. Мастеров, Ю. В. Саксонов. – М.: Прогресс, 1979. – 296 с.

4. Мерл В. Электрический контакт. Теория и применение на практике./ В. Мерл. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1969. – 79 с.

Исследованы электромеханические, тепловые и физико-химические процессы, происходящие на рабочих поверхностях контакт-деталей при коммутации тока. Проведен микроструктурный анализ материалов на основе Ag с оксидными добавками для выявления картины распределения упрочняющих добавок в матрице.

Контакты, микроструктурный анализ, композиционные материалы, электрическая дуга, гетерофазная структура, серебряная матрица.

Studied electromechanical, thermal, physical and chemical processes occurring on the working surfaces of the contact details at the switching current. Asked to microstructural analysis of materials based on Ag oxide impurities to identify the distribution pattern of hardening additives in the matrix.

Contacts, microstructural analysis, composite materials, electric arc, heterophase structure, matrix silver.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОГЕНЕРАЦІЙНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ОБ'ЄКТІВ АПК

І.В.Феофілов, старший викладач

Проаналізовано можливості підвищення ефективності когенераційного енергопостачання об'єктів агропромислового комплексу при використанні як силового агрегату поршневого двигуна внутрішнього згорання.

Когенераційна установка, когенераційне енергопостачання, узгодження постачальника і споживача енергій, додавання води до палива, конденсаційні утилізатори теплоти.

Інтенсивне поширення і розвиток технологій комбінованого виробництва теплової та електричної енергії, що спостерігається протягом останніх десятиліть, є результатом усвідомлення того, що паливні ресурси планети можуть бути вичерпані, а подальше погіршення екологічної ситуації, викликане нарощуванням обсягів споживаного палива, – неприпустимо. В Україні актуальним нині є необхідність впровадження енергозберігаючих заходів у всіх галузях виробництва, в тому числі і в агропромисловому секторі, що пов'язано зі значною частиною імпортованого палива в енергобалансі країни. З цією проблемою нерозривно пов'язані питання: енергетичної безпеки країни, економного використання енергоресурсів та екології довкілля.

Одним із найефективніших шляхів енергозбереження, що дозволяє ефективно вирішувати всі три питання, є когенерація. Сенс когенерації полягає в тому, що при виробленні електричної енергії створюється можливість утилізувати супутнє тепло і тим самим значно підвищити сумарний ККД агрегату – до 90–92 %. У когенераційній установці (КГУ) перетворення енергії відбувається з більшою ефективністю, чим досягається суттєве скорочення питомих витрат палива – до 135 г у.п./кВт·год [14].

Теплові втрати в таких установках не перевищують 10 %, а первинного палива потрібно в 1,6–2 рази менше в порівнянні з окремим виробництвом тієї ж кількості теплової та електричної енергії [6]. Ефективне використання палива призводить до зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу. Згідно з оцінками зниження викидів, наприклад, CO₂ при виробництві електроенергії за комбінованою технологією в порівнянні з окремим виробництвом становить більше 600 кг/МВт·год [8]. Крім того, зменшується собівартість виробленої продукції, а також вартість генеруючого обладнання та його обслуговування в перерахунку на 1 кВт·год виробленої енергії.

Нині в Україні частка відпуску електроенергії, виробленої за комбінованою технологією (в основному – на ТЕЦ), в повному обсязі відпуску електроенергії всіма генеруючими станціями складає близько 2 % [9]. Що стосується теплоти, ТЕЦ України виробляють близько 70 млн Гкал теплоти на рік, що становить 21,6 % від загального вироблення теплоти у країні. Основним паливом для ТЕЦ є природний газ, що в переважній більшості є імпортованим паливом, частина якого в паливному балансі досягає 80 %. Проте ефективність використання палива є дуже низькою: на деяких ТЕЦ питомі витрати умовного палива на вироблення 1кВт·год електроенергії досягають 0,53–0,54 кг у.п., а на 1 Гкал відпущеної теплоти – 240–250 кг у.п. [23]. Це пояснюється великим зносом устаткування, величезними втратами в зношених і протяжних мережах, низькою економічністю працюючих паротурбінних блоків (нижче 30 %). Переважна частина ТЕЦ використовується для виробництва електроенергії менше, ніж наполовину, а за тепловою потужністю (за винятком невеликої кількості промислових ТЕЦ) коефіцієнт використання не перевищує 30 %. У ситуації, що складається, особливої актуальності, що має державне значення, набуває проблема створення і широкомасштабної реалізації ефективних децентралізованих джерел енергопостачання – в першу чергу КГУ на базі газотурбінних установок (ГТУ) і поршневих двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), оскільки при їх використанні створюються найбільш ефективні, конкурентоздатні технології, які відрізняються короткими термінами реалізації проекту [13]. Якщо порівняти між собою ці два види когенераційного обладнання, то КГУ на базі ДВЗ в порівнянні з КГУ на базі ГТУ, мають більше значення електричного ККД, що дозволяє найповніше використовувати ексергетичний потенціал первинного палива. При зниженні навантаження на 50 % електричний ККД газової турбіни знижується майже у 3 рази, в той час як для ДВЗ така зміна режиму навантаження практично не впливає як на загальний, так і на електричний ККД [5]. Електрична потужність ГТУ залежить від температури навколишнього повітря: при підвищенні температури від -30°C до $+30^{\circ}\text{C}$ електричний ККД ГТУ падає на 15-20 %. На відміну від газової турбіни ДВЗ має вищий і постійний електричний ККД у всьому інтервалі температур до $+25^{\circ}\text{C}$ [7]. Крім того, КГУ на базі ДВЗ характеризуються меншою питомою вартістю і меншими експлуатаційними витратами, відносною простотою обслуговування та управління, найменшим часом запуску у роботу і високою надійністю в експлуатації [15]. Тому, саме КГУ на базі поршневих ДВЗ стали найперспективнішим когенераційним обладнанням для об'єктів АПК.

Проте ефективне вироблення енергоносіїв в КГУ ще не означає ефективне енергопостачання об'єктів АПК. Потреби споживача в електричній і тепловій енергії практично не збігаються з енергетичними можливостями КГУ, яка виробляє ці енергоносії в певній пропорції, що не відповідає, в переважній більшості випадків, пропорції споживання електричної і теплової енергії населеним пунктом. Добові та сезонні коливання в споживанні енергоносіїв (особливо це стосується теплової енергії) ще більше ускладнюють задачу енергопостачання населеного пункту. Крім того, час-

тина вироблених енергоресурсів може бути втрачена при їх транспортуванні до споживача.

Мета досліджень - аналіз можливостей підвищення ефективності когенераційного енергопостачання об'єктів агропромислового комплексу..

Матеріали та методика досліджень. Можливе підвищення ефективності когенераційного енергопостачання об'єкта АПК передбачає три етапи.

1. Забезпечення найефективнішого перетворення хімічної енергії первинного палива при генерації електричної і теплової енергії.

2. Мінімізація втрат енергоносіїв при передачі їх споживачеві.

3. Узгодження генеруючих можливостей КГУ та енергетичних потреб споживача, що дозволить мати найменші втрати вироблених у КГУ енергій при їх споживанні.

Роботи з підвищення ефективності когенераційного енергопостачання можуть бути проведені на кожному етапі окремо і результат цих робіт можна записати як:

$$k = k_1 k_2 k_3,$$

де k – загальний показник підвищення ефективності когенераційного енергопостачання; k_1 , k_2 , k_3 – показники підвищення ефективності когенераційного енергопостачання на етапах вироблення енергоносіїв, транспортування енергоносіїв та на етапі узгодження енергетичних потреб споживача і можливостей КГУ, відповідно.

Результати досліджень. Головним показником енергоефективності КГУ на етапі вироблення енергоносіїв є сумарний коефіцієнт корисної дії (ККД). В одиницях потужності він може бути записаний так:

$$\eta = \frac{N_e + Q_m}{Q_{ког}} = \eta_e + \eta_m,$$

де N_e – електрична потужність КГУ, Вт; Q_m – тепла потужність КГУ, Вт; $Q_{ког}$ – теплота, що виділяється при спалюванні палива в когенераційній установці за одиницю часу, Вт; η_e і η_m – електричний і тепловий ККД КГУ, відповідно.

З точки зору термодинаміки ефективність КГУ на базі поршневих ДВЗ можна підвищити за рахунок:

1) збільшення електричної та / або теплової потужності при тих самих витратах первинного палива;

2) зменшення витрат первинного палива при збереженні сталими показників електричної та теплової потужності КГУ;

3) збільшення вироблення електричної та/або теплової енергії при одночасному зменшенні витрат первинного палива.

Однак поліпшення цих характеристик є серйозною проблемою, яка обумовлена низкою факторів.

1. Термодинамічні показники сучасних поршневих ДВЗ близькі до теоретично можливого граничного рівня [10] і цей граничний рівень забезпечує перетворення в корисну роботу не більше 45–46 % хімічної енергії первинного палива. Інша теплота, що виділилася при згорянні палива, ро-

зсіюється в навколишньому середовищі або з поверхні двигуна та його систем, або викидається з відпрацьованими газами. Для КГУ це не є фатальним, оскільки більша частина цієї теплоти може бути повернута споживачеві в котлах-утилізаторах у вигляді теплової енергії.

2. Значна частина теплоти первинного палива, що не використовується в ДВЗ для отримання роботи, припадає на відпрацьовані гази. В КГУ теплота відпрацьованих газів використовується частково (до 150–160 °C) у силу того, що використання теплоутилізаторів при температурах менше вказаних призводить до значного збільшення теплообмінної поверхні при незначних кількостях отриманого тепла, а також наближення температури до точки роси. Внаслідок цього, при подальшому зниженні температури можлива конденсація водяної пари у відхідному тракті, яка може утворювати агресивні сполуки з речовинами відпрацьованих газів та призводити до руйнування елементів конструкції.

3. Відпрацьовані гази ДВЗ, що викидаються в атмосферу, містять велику кількість токсичних речовин і сажі [4]. І хоча тепла утилізація в КГУ на основі поршневих ДВЗ зменшує кількість шкідливих речовин у відпрацьованих газах, їх величина залишається ще значною в порівнянні з іншими КГУ.

Напрямом подальшого розвитку ДВЗ як основи КГУ на базі поршневих ДВЗ є підвищення їх питомої потужності та зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище, що пов'язано з подальшою інтенсифікацією процесів сумішоутворення і згоряння. Одним із дієвих методів вдосконалення сумішоутворення та інтенсифікації процесу згоряння палива є використання води як присадки до палива.

Додавання води в цикл поршневого ДВЗ можна здійснити введенням води у рідкому стані, у вигляді водо-паливної емульсії (ВПЕ), а також у вигляді водяної пари.

Введення води у рідкому стані нині використовують, в основному, для внутрішнього охолодження двигунів при форсуванні їх роботи за рахунок значної прихованої теплоти пароутворення води. Прикладом такого способу додавання води є використання вприскування води для форсування двигунів гоночних автомобілів та мотоциклів [25]. Основними недоліками додавання води у рідкому стані є: нерівномірний розподіл води по робочій суміші у зв'язку з незначним часом перебування палива в циліндрах двигуна (0,05–0,001 с залежно від частоти обертання колінчастого вала) ; відкладення солей при використанні недистильованої води, що призводить до порушень у роботі двигуна вже через 100–200 год роботи або необхідність у спеціальній системі водопідготовки та додаткових витратах енергії при використанні дистильованої води.

Використання ВПЕ в ДВЗ дозволяє економити паливо та знизити димність відпрацьованих газів [12] і розглядається як один із способів вдосконалення процесу сумішоутворення [16]. Найповніше різні аспекти роботи ДВЗ та процеси, що там протікають, досліджені при додаванні води у цикли ДВЗ саме у вигляді ВПЕ. Зафіксовано як збільшення, так і зменшення індикаторних показників двигуна, що свідчить про наявність як по-

зитивного, так і негативного впливу ВПЕ на робочий процес. Позитивний вплив на цикл ДВЗ полягає у зростанні питомого об'єму та кількості суміші газів в індикаторному процесі при пароутворенні з води, негативний – поглинання частини теплоти, що виділилася при згорянні палива. Введення води як додаткового робочого тіла сприяє зростанню індикаторного ККД, але оцінюється величиною значно меншою, ніж відведення теплоти за рахунок випаровування і нагріву [17]. Крім того, на показники циклу та індикаторний ККД впливає момент введення присадки води [18]. На рис.1 показано характер зміни індикаторного ККД залежно від моменту введення присадки води при її додаванні у кількості $\zeta = G_{H_2O}/G_{\Pi} = 0,2$.

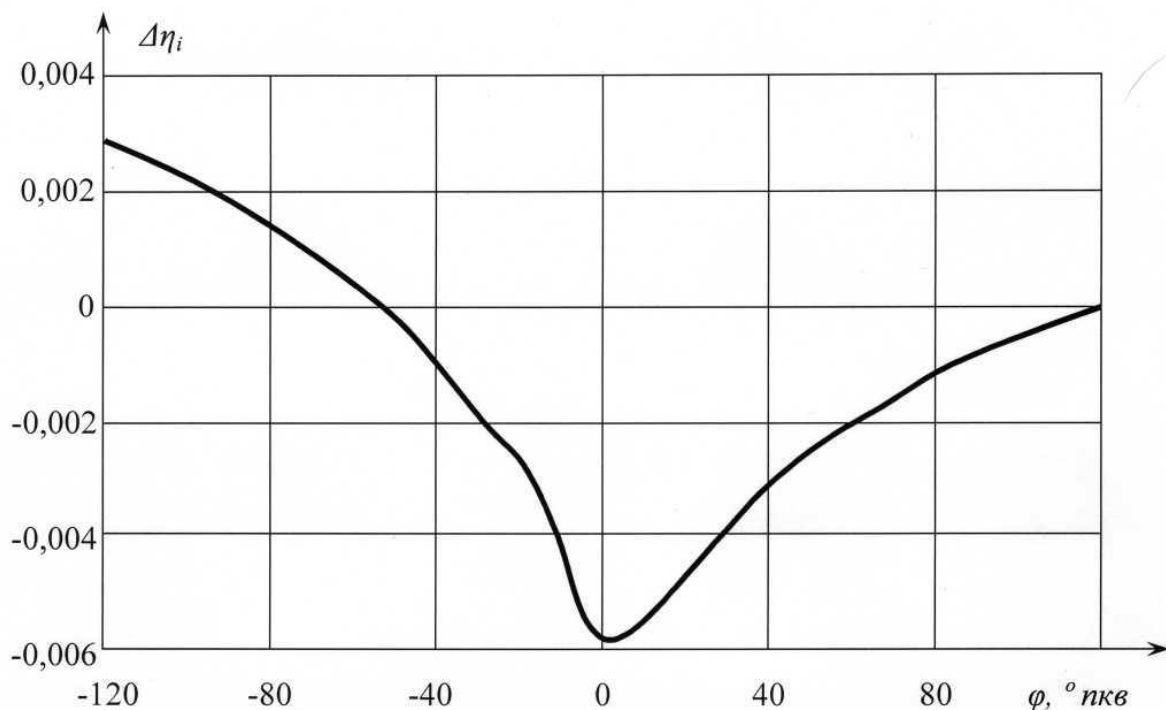


Рис.1. Вплив моменту введення присадки води на зміну індикаторного ККД для $\zeta=0,2$

Тобто, з термодинамічної точки зору найефективніше вводити присадку води на лінії стискання раніше -60° пкв, а найбільш несприятливим моментом для присадки води є місце в районі ВМТ. При використанні ВПЕ її введення відбувається за $10-20^{\circ}$ до ВМТ – у самому несприятливому місці, внаслідок чого введення води має негативний вплив на ККД циклу і призводить до його зниження. Крім цього, існують також інші негативні сторони від використання води в ДВЗ у вигляді ВПЕ, а саме: можливість збільшення зносу та виникнення корозії деталей паливної апаратури; нестабільність ВПЕ і можливість її розшарування з часом у зв'язку зі значною різницею в густині палива і води, що призводить до погіршення якості ВПЕ та зменшення її позитивного впливу на процеси в ДВЗ; негативний вплив поверхнево-активних речовин (ПАР), що є невід'ємною складовою ВПЕ, на процеси, які протікають у ДВЗ.

Розглядаючи наслідки від присадки води, слід зазначити і те, що в усіх вищезазначених варіантах додавання води застосовується дистиллят, отримання якого пов'язано з додатковими істотними енерговитратами і наявністю відповідного обладнання.

Більшість недоліків від використання води в ДВЗ при збереженні її позитивного впливу на процес згоряння може бути усунено, якщо застосовувати воду у вигляді водяної пари. У випадку використання водяної пари розподіл води в циліндрах двигуна більш рівномірний в порівнянні з вприскуванням води, що забезпечує ефективне згоряння паливної суміші, стабільну і надійну роботу двигуна. Значним позитивним моментом від додавання водяної пари є можливість роботи двигуна без використання ПАР, що запобігає утворенню відкладень у двигуні, які пов'язані із ними. Крім того, зволожене повітря не призводить до сольових відкладень у циліндрах двигуна, що позитивно позначається на його безаварійній роботі. Але застосування води у вигляді пари потребує великих енергетичних витрат на її отримання, пов'язаних зі значною величиною прихованої теплоти пароутворення води, і відповідного парогенеруючого обладнання. Ці питання можуть бути вирішені шляхом отримання водяної пари у складі зволоженого дуттьового повітря при використанні тепла охолоджуючої рідини ДВЗ або тепла відпрацьованих газів [1,19]. На рис.2 показана схема циклу поршневого ДВЗ без додавання води та з додаванням води у вигляді зволоженого повітря на прикладі дизельного двигуна. За рахунок більшої теплоємності води при всмоктуванні зволоженого повітря відбувається охолодження стінок циліндрів до більш низької температури, внаслідок чого зменшується мінімальна температура циклу. Всі інші температури циклу також знижуються, тобто цикл двигуна здійснюється в діапазоні менших температур. У процесі спалювання палива вода, що знаходиться в повітряно-паливній суміші, затягує процес згоряння палива, що сприяє деякому подовженню процесу 2 – 3 на Pv -діаграмі, як і в випадку використання ВПЕ. Таким чином, зростанню ККД двигуна при використанні зволоженого повітря на відміну від використання ПВЕ сприяють обидва фактори: як затягування процесу згоряння палива, так і зменшення мінімальної температури циклу. Крім того, за відсутності процесів випаровування води при згорянні палива в випадку використання зволоженого повітря зниження максимальної температури циклу не таке значне, як у випадку використання ПВЕ, що також сприяє збільшенню ККД двигуна.

За рахунок зазначених вище факторів при додаванні води у вигляді зволоженого повітря можна отримати збільшення ККД поршневих ДВЗ на 2,5–4,5 %. При цьому загальне зменшення температур циклу відкриває можливість використовувати паливо з меншим октановим числом і, відповідно, більш дешеве. Ще більших значень ККД циклу і, відповідно, більшої економії палива можна досягти при роботі на стандартному паливі зі зволоженням дуттьового повітря шляхом збільшення ступеня стискання робочої суміші до тисків, як у циклах ДВЗ без додавання води. В цьому випадку при додаванні води у кількості 20 % від маси палива приріст електричної потужності становить близько 10–15 %.

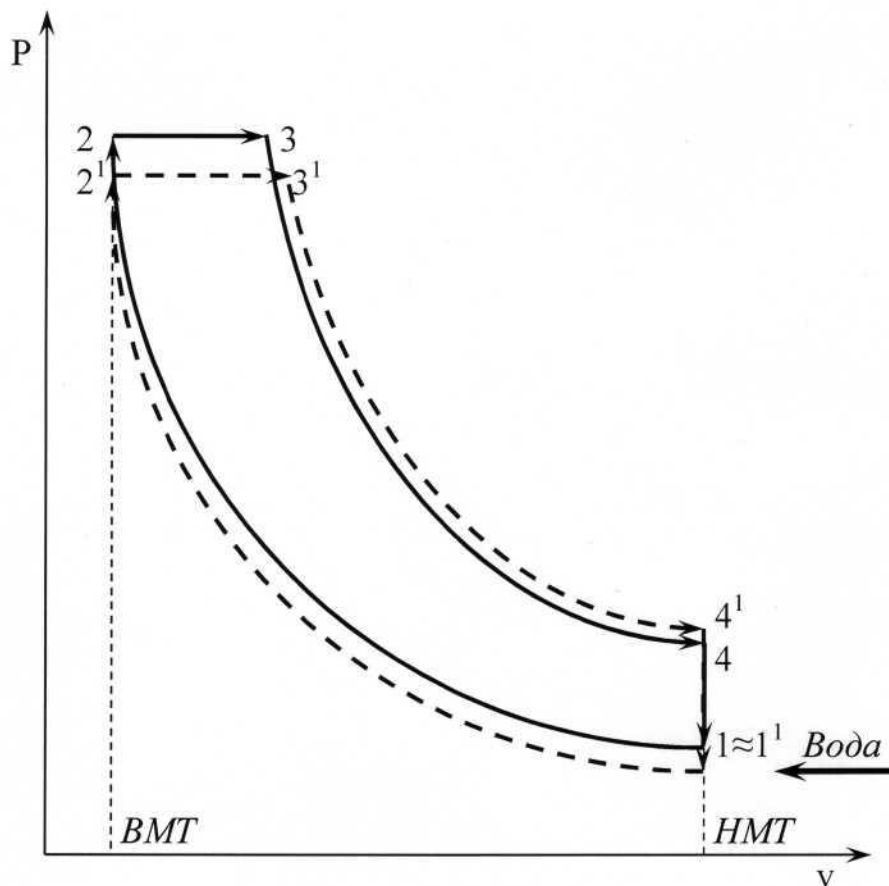


Рис.2. Схема циклу дизельного ДВЗ без додавання води (12341) та з додаванням води ($1^1 2^1 3^1 4^1 1^1$) у вигляді зволоженого повітря

Треба зауважити, що додана вода впливає не тільки на процеси, що протікають у камері згоряння двигуна та змінює екологічні показники відпрацьованих газів, але й покращує умови для інтенсифікації процесів теплообміну в теплоутилізаторах КГУ. Збільшення концентрації водяної пари у відпрацьованих газах сприяє збільшенню температури точки роси, що дозволяє проводити теплообмін у більш ефективному конденсаційному режимі та отримати більші теплові потужності КГУ. Таким чином, КГУ на базі ДВЗ, що працює з додаванням водяної пари, має більшу електричну і теплову потужності, сумарний ККД може досягати 0,98 за вищою теплою згоряння в порівнянні з 0,82 для існуючих КГУ [20]. Показник підвищення ефективності когенераційного енергопостачання на етапі вироблення енергоносіїв може досягати, відповідно, $k_1=1,1-1,2$ залежно від використаного палива і кількості доданої води.

Втрати енергоносіїв при передачі їх споживачеві можна мінімізувати розташуванням КГУ поблизу споживача та проведенням періодичних регламентних робіт з виявлення та усунення витоків енергій. Що стосується АПК, то розташування КГУ в безпосередній близькості до об'єкта забезпечує надійність його енергопостачання. Відомо, що енергогенеруючі

об'єкти розташовуються або поблизу постачальників палива, або поблизу великих споживачів виробленої енергії – значних промислових підприємств, великих міст і т.д., до яких об'єкти АПК не належать. Тому, поки тепла або електрична енергія доходить до споживача, частина її втрачається – і чим більше відстань, тим більше втрати. Раціональна відстань, наприклад, від постачальника теплової енергії у вигляді нагрітої води до споживача за вітчизняними даними не перевищує 10 км [3], а за рекомендаціями закордонних вчених – не повинна перевищувати 1 км [24]. В Україні втрати теплової енергії при транспортуванні складають 10–25 % залежно від довжини теплотраси. За цих умов більшість потенційних споживачів тепла в АПК вимушені користуватися тепловою енергією, виробленою у місцевих котельних агрегатах, що мають значно меншу ефективність використання палива, ніж при використанні КГУ. З усієї кількості газу, що споживається в енергетиці України, приблизно дві третини витрачаються у районних котельних виключно для вироблення теплоти. Що стосується електричної енергії, то постачання цим видом енергії віддаленого населеного пункту залежить не тільки від місцевих втрат при подоланні відстані до споживача (до 10 %), але й від несприятливих погодних умов, які можуть суттєво впливати на надійність електропостачання, а іноді й залишити населений пункт зовсім без електроенергії, що в деяких випадках категорично недопустимо – наприклад, у лікарняних закладах або в будь-яких виробництвах з безперервним електропостачанням. За таких умов енергетична самостійність і самодостатність віддаленого об'єкта АПК може бути забезпечена за допомогою організації когенераційного способу вироблення енергій у самому об'єкті або в безпосередній близькості до нього з використанням переважно місцевих видів палива. При цьому показник підвищення ефективності когенераційного енергопостачання на етапі транспортування енергоносіїв в порівнянні з когенераційним енергопостачанням від ТЕЦ становитиме $k_2=1,1-1,25$.

Необхідною умовою ефективного когенераційного енергопостачання є узгодження генеруючих можливостей КГУ та енергетичних потреб споживача з метою максимального використання вироблених енергій. Зважаючи на те, що надлишкову електричну енергію, вироблену в КГУ, в силу прийнятого в Україні закону про когенерацію [11], можна направити до єдиної електромережі, а надлишкова тепла енергія, що вироблена в КГУ, – викидається в навколишнє середовище і втрачається, найперспективнішим вважають узгодження потужностей КГУ та споживача за тепловою енергією. При такому виді узгодження потужності КГУ регулюються так, що вироблена нею тепла 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. При використанні КГУ на базі ДВЗ можна регулювати потужність КГУ відповідно до добових коливань енергоспоживання. Проте потреби споживача в тепловій енергії в різні періоди року суттєво відрізняються – для об'єктів АПК споживання теплової енергії в опалювальний період збільшується у 3–4 рази в порівнянні з неопалювальним періодом.

лювальним періодом при практично незмінному електроспоживанні протягом всього року [2]. В існуючих схемах енергопостачання на базі КГУ нарощування теплопостачання в опалювальний період відбувається за рахунок додаткових теплових потужностей, що не є ефективним використанням первинного палива.

У роботі [21] запропоновано більш ефективну схему когенераційного енергопостачання (рис.3), в якій КГУ складається з декількох агрегатів.

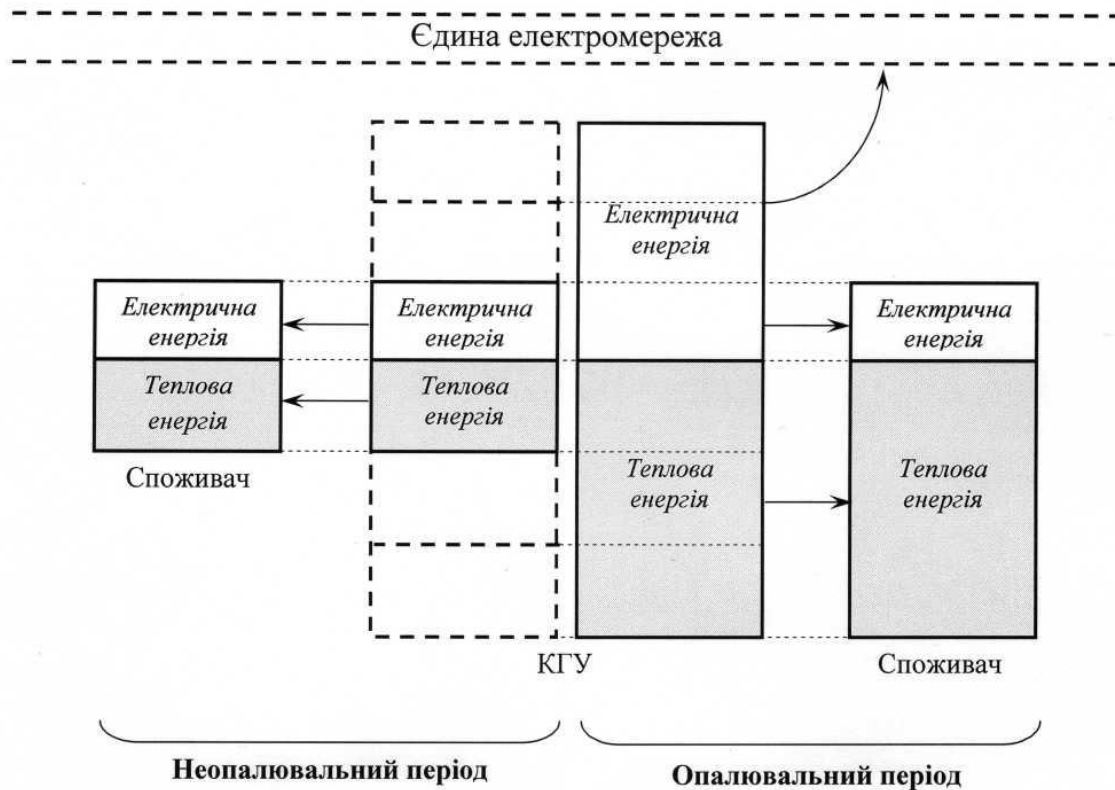


Рис.3. Схема енергопостачання на базі КГУ

Дроблення енергетичних потужностей КГУ дозволяє забезпечити цілорічне постачання споживача енергоносіями, виробленими за когенераційною технологією, в порівнянні з існуючим варіантом. Порівняння різних схем когенераційного енергопостачання дозволило підтвердити високу ефективність запропонованої схеми, яка, незважаючи на більшу початкову вартість обладнання, має приблизно однаковий строк окупності. Це відбувається завдяки більш значній економії первинного палива (більше ніж у 2 рази), що приводить до вагомих зменшень фактичних витрат і отримання більших доходів після закінчення строку окупності когенераційного обладнання [22]. Крім того, запропонована схема підвищує надійність когенераційного енергопостачання та дозволяє проводити регламентні ремонтні роботи окремих агрегатів без зупинки всієї КГУ. Таким чином, виконання КГУ у складі декількох агрегатів і організація відповідним чином узгодження енергетичних потреб споживача і можливостей КГУ дозволяє підвищити ефективність когенераційного енергопостачання у декілька разів: $k_3=2-2,3$.

Висновки

Враховуючи показники підвищення ефективності на кожному етапі когенераційного енергопостачання отримуємо загальний показник можливого підвищення його ефективності $k = 2,42\text{--}3,45$. Тобто, завдяки описаним вище заходам ефективність когенераційного енергопостачання можна збільшити у декілька разів.

Список літератури

1. А.с. 1347602 СССР, МКИ³ F 02 В 43/00. Способ работы двигателя внутреннего сгорания / А.А.Долинский, А.И.Гуров, И.В.Феофилов (СССР). – №4020981 ; заявл. 12.02.86; опубл. 07.08.87, Бюл. № 39.
2. Баласанян Г.А. Ефективність перспективних інтегрованих систем енергозабезпечення на базі установок когенерації малої потужності: автореф. дис. на здобуття наук ступеня д-ра техн. наук / Г.А.Баласанян. – Одеса, 2007. – 36 с.
3. Батуев Б.Б. Система теплоснабжения предприятия / Б.Б.Батуев, В.Э.Матханова. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2005. – 10 с.
4. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях / А.Н.Войнов. – М.: Машиностроение, 1977. – 276 с.
5. Гайстер Ю.С. Опыт проектирования миниТЭЦ с газопоршневыми агрегатами / Ю.С.Гайстер // Малые и средние ТЭЦ. Современные решения: материалы науч.-практ. конф. / НПО «Ростеплоснабжение». – Голицино, Москов. обл.: УМЦ, 2005. – 6 с.
6. Горобець В.Г. Когенераційні установки та їх використання в агропромисловому комплексі / В.Г.Горобець, І.В.Феофілов. – К.: ЦП «Компринт», 2012. – 294 с.
7. Гриценко Е. Разработка малоэмиссионных камер сгорания для ГТУ авиационного типа / Е.Гриценко, В.Орлов, В.Павлов // Газотурбинные технологии. – 2001. – № 6. – С. 6-8.
8. Гуменюк А.Е. Киотский протокол и инвестиции: возможности для Украины / А.Е.Гуменюк, Е.А.Алтухов, И.В.Антипов // Энергоснабжение. – 2003. – №10. – С. 9–15.
9. Дубовський С.В. Сучасний стан і перспективи розвитку комбінованого виробництва електричної і теплової енергії в Україні / С.В.Дубовський // Матеріали першої міжнар. конф. «Когенерація в промисловості і комунальній енергетиці». – К.:Теза, 2004. – 266 с.
10. Дьяченко Н.Х. Теория двигателей внутреннего сгорания / Н.Х.Дьяченко. – Л.: Машиностроение, 1974. – 552 с.
11. 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.
12. Кветковский В.И. Исследование динамики тепловыделения в судовых среднеоборотных дизелях: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук / В.И.Кветковский. – Одесса, 1980. – 17 с.
13. Клименко В.Н. Когенерационные системы с тепловыми двигателями: справ. пособие: [в 3 ч.]. Ч. 1: Общие вопросы когенерационных технологий / В.Н.Клименко, А.И.Мазур, П.П.Сабашук – К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2008. – 560 с.
14. Когенерационные технологии производства тепловой и электрической энергии (вопросы и ответы) [Электронный ресурс] / В.Ф.Гершкович, И.В.Плачков, В.Н.Клименко, Б.Д.Билека. – Режим доступа: http://www.truba.ua/artic/ru_31.

15. Коломейко Д.А. Энергоекономічний аналіз когенераційних схем на основі поршневих теплових двигунів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Д.А.Коломейко. – К., 2009. – 31 с.

16. Лебедев О.Н. Исследование и повышение эффективности объемного смесеобразования в судовых четырехтактных дизелях: автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора техн. наук / О.Н.Лебедев. – Л., 1979. – 34 с.

17. Покровский Е.А. Исследование особенностей рабочего процесса дизеля при впрыске воды в цилиндры: дисс... канд. техн. наук / Покровский Е.А. – Калининград, 1978. – 217 с.

18. Тактак А. Улучшение рабочего процесса дизеля присадкой воды к топливу: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук / А.Тактак. – Барнаул, 2005. – 16 с.

19. Феофілов І.В. Зволожувач дуттьового повітря для двигуна внутрішнього згоряння / І.В.Феофілов // Науковий вісник НУБіП України. – 2013. – №184, ч.1.- С.233–240.

20. 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.161–171.

21. 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.

22. Феофілов І.В. Порівняння різних схем когенераційного енергопостачання за наявності зв'язку з єдиною електромережею / І.В.Феофілов // Науковий вісник НУБіП України. – 2013. – №184, ч.2. – С.265–274.

23. Шпак Я. Загальна ситуація, основні проблеми та перспективи запровадження когенераційних систем в Україні // Матеріали першої міжнародної конференції «Когенерація в промисловості і комунальній енергетиці». – К.:Теза, 2004. – 266 с.

24. Pierce M. The history of cogeneration - the dawning of the age of electricity // Cogeneration and On-Site Power Production. – 2000. – July-August. – P. 26-31.

25. RSR 440 Turbo Water Injection [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rbracing-rsr.com/waterinjection.html>

Проанализированы возможности повышения эффективности когенерационного энергоснабжения объектов агропромышленного комплекса при использовании в качестве силового агрегата поршневого двигателя внутреннего сгорания.

Когенерационная установка, когенерационное энергоснабжение, согласование поставщика и потребителя энергий, добавление воды к топливу, конденсационные утилизаторы теплоты.

The analysis of opportunities of increase of efficiency of the cogeneration of energy supply of objects of the agro-industrial complex when used as a power plant of piston internal combustion engine.

The cogeneration plant, a cogeneration power supply, agreement of the supplier and the consumer energies, adding water into fuel, condensing recovery of heat.

АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ СТВОРЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ В КАМЕРІ ПЛОДООВОЧЕСХОВИЩ

В.О. Грищенко, асистент

Наведено математичний опис процесів зберігання плодоовочевої продукції з використанням машинного охолодження. Розроблено автоматичну систему керування, яка реалізує імпульсний режим охолодження.

Холодильне обладнання, плодоовочесховище, зберігання, автоматичне керування.

Зростаючі вимоги до зменшення втрат плодоовочевої продукції в умовах господарств-виробників зумовлюють нагальну необхідність поширення застосування систем машинного охолодження повітря – холодильних установок [1,5,8]. Але застосування систем створення мікроклімату з машинним охолодженням повітря потребує значних витрат енергії, що призводить до збільшення собівартості продукції.

Одним із способів, що забезпечують зниження питомої енергоемності процесів холодильного зберігання є автоматизація керування температурно-вологісними режимами [4].

Найпоширеніші - позиційні системи автоматичного регулювання температури не забезпечують задовільної ефективності як в технологічному так і в енергетичному плані, тому що не враховують змінення теплового навантаження в часі (доба, місяць, рік).

Мета досліджень – створення автоматизованої системи керування мікрокліматом у камері плодоовочесховища.

Матеріали та методика досліджень. В роботі як основний метод дослідження динамічних властивостей сховищ використано аналітичний метод із наступною експериментальною перевіркою отриманого математичного опису. Аналітичний метод синтезу систем автоматизації можна використовувати за наявності математичного опису досліджуваного процесу зберігання плодоовочевої продукції.

Результати досліджень. При описі фізичних процесів у холодильній камері для зберігання плодоовочевої продукції використано такі передумови та спрощуючі допущення. Повітря в об'ємі плодоовочесховища добре перемішується і рівномірно омиває тепломасообмінні поверхні. Теплофізичні параметри елементів приміщень, біологічних об'єктів, а також значення коефіцієнтів тепломасообміну не залежать від температури, вологості та є незмінними в часі. Теплові опори огорожень від параметрів середовища не залежать, теплообмін випромінюванням всередині приміщення відсутній. Вплив сонячного опромінення зовнішньої поверхні враховується при визначенні умовної зовнішньої температури [2]. Питомі те-

пло- і вологовиділення залежать від температури лінійно. Температура технологічного обладнання дорівнює температурі повітря.

Система лінеаризованих диференціальних рівнянь, якими описуються нестационарні процеси в холодильній камері для зберігання фруктів мають вигляд:

- для випарника:

$$m_x c_x \frac{dt_{x2}}{d\tau} = 2G_x c_x (t_{x1} - t_{x2}) + k_o F_o (0.5(t_{v1} + t_{v2}) - 0.5(t_{x1} + t_{x2})), \quad (1)$$

- для повітроохолоджувача:

$$m_v c_p \frac{dt_{v2}}{d\tau} = 2G_v c_{vp} (t_{v1} - t_{v2}) - k_o F_o (0.5(t_{v1} + t_{v2}) - 0.5(t_{x1} + t_{x2})), \quad (2)$$

- для камери зберігання:

$$(m_n c_n + m_k c_p) \frac{dt_{k2}}{d\tau} = k_z F_z (t_z - 0.5(t_{k1} + t_{k2})) - G_v c_p (t_{k2} - t_{k1}), \quad (3)$$

де m_x – маса холодоагента (Фреон-22), кг; m_v – маса повітря в повітроохолоджувачі, кг; m_n – маса продукції, що зберігається, кг; m_k – маса повітря в камері, кг; c_x – питома теплоємність холодоагента, кДж/(кг·°C); c_p – питома теплоємність повітря, кДж/(кг·°C); c_n – питома теплоємність продукції, що зберігається, кДж/(кг·°C); k_o – коефіцієнт теплопередачі від холодоагента до внутрішньої поверхні, Вт/(м²·°C); F_o – поверхня теплообміну, м²; G_x – витрати холодоагента, кг/с; G_v – витрати повітря, кг/с; k_z – сумарний коефіцієнт теплопередачі зовнішньої поверхні огороження, Вт/(м²·K); F_z – зовнішня поверхня огороження, м²; t_{x1} – температура холодоагента на вході в повітроохолоджувач, °C; t_{x2} – температура холодоагента на виході з повітроохолоджувача, °C; t_0 – температура кипіння холодоагента, °C; t_{v1} – температура повітря на вході до повітроохолоджувача, °C; t_{v2} – температура повітря на виході з повітроохолоджувача, °C; t_z – температура зовнішнього повітря, °C; t_{k1} – температура повітря на вході в камеру, °C; t_{k2} – температура повітря на виході з камери, °C.

Якщо записати рівняння динаміки (1) – (3) в приростах: $t_{x1} = t_{x1}^0 + \Delta t_{x1}$; $t_{x2} = t_{x2}^0 + \Delta t_{x2}$; $t_{v2} = t_{v20} + \Delta t_{v2}$; $t_{k2} = t_{k2}^0 + \Delta t_{k2}$; $G_x = G_x^0 + \Delta G_x$; $G_v = G_v^0 + \Delta G_v$, віднімаючи рівняння статички і нехтуючи членами другого ступеня малості та приводячи рівняння до канонічного виду, отримуємо таку систему звичайних диференціальних рівнянь:

$$T_x \frac{d\Delta t_{x2}}{d\tau} + \Delta t_{x2} = k_1 \Delta t_{v1} + k_1 \Delta t_{v2} - k_2 \Delta t_{x1} + k_3 \Delta G_x; \quad (4)$$

$$T_v \frac{d\Delta t_{v2}}{d\tau} + \Delta t_{v2} = k_4 \Delta t_{x1} + k_4 \Delta t_{x2} - k_5 \Delta t_{v1} + k_6 \Delta G_v; \quad (5)$$

$$T_k \frac{d\Delta t_{k2}}{d\tau} + \Delta t_{k2} = k_7 \Delta t_z - k_8 \Delta t_{k1} - k_9 \Delta G_v. \quad (6)$$

У рівняннях T_x, T_v, T_k – сталі часу, які характеризують динаміку, $k_1, \dots, k_9$ – сталі коефіцієнти, виражені через конструктивні та технологічні параметри об'єкта:

$$k_1 = \frac{k_o F_o}{k_o F_o + 2G_x c_x}; k_2 = \frac{k_o F_o - 2G_x c_x}{k_o F_o + 2G_x c_x}; k_3 = \frac{2c_x(t_{x1}^0 - t_{x2}^0)}{k_o F_o + 2G_x c_x};$$

$$k_4 = \frac{0.5k_o F_o}{0.5k_o F_o + c_p G_v^0}; k_5 = \frac{0.5k_o F_o - c_p G_v^0}{0.5k_o F_o + c_p G_v^0}; k_6 = \frac{c_p(t_{v1}^0 + t_{v2}^0)}{0.5k_o F_o + c_p G_v^0};$$

$$k_7 = \frac{k_z F_z}{k_z F_z + 2c_p G_v^0}; k_8 = \frac{k_z F_z - 2c_p G_v^0}{k_z F_z + 2c_p G_v^0}; k_9 = \frac{2c_p(t_{k2}^0 - t_{k1}^0)}{k_z F_z + 2c_p G_v^0};$$

$$T_x = \frac{m_x c_x}{k_o F_o + 2G_x c_x}; T_v = \frac{m_v c_p}{0.5k_o F_o + c_p G_v^0}; T_k = \frac{m_n c_n + m_k c_p}{k_z F_z + 2c_p G_v^0}.$$

Застосовуючи перетворення Лапласа до рівнянь (4) – (6), отримаємо аналітичні вирази передаткових функцій по каналах, які зв'язують температуру на виході з камери з температурою повітря на її вході, температуру холодоагента на вході та виході з повітроохолоджувача, а також параметрами повітря.

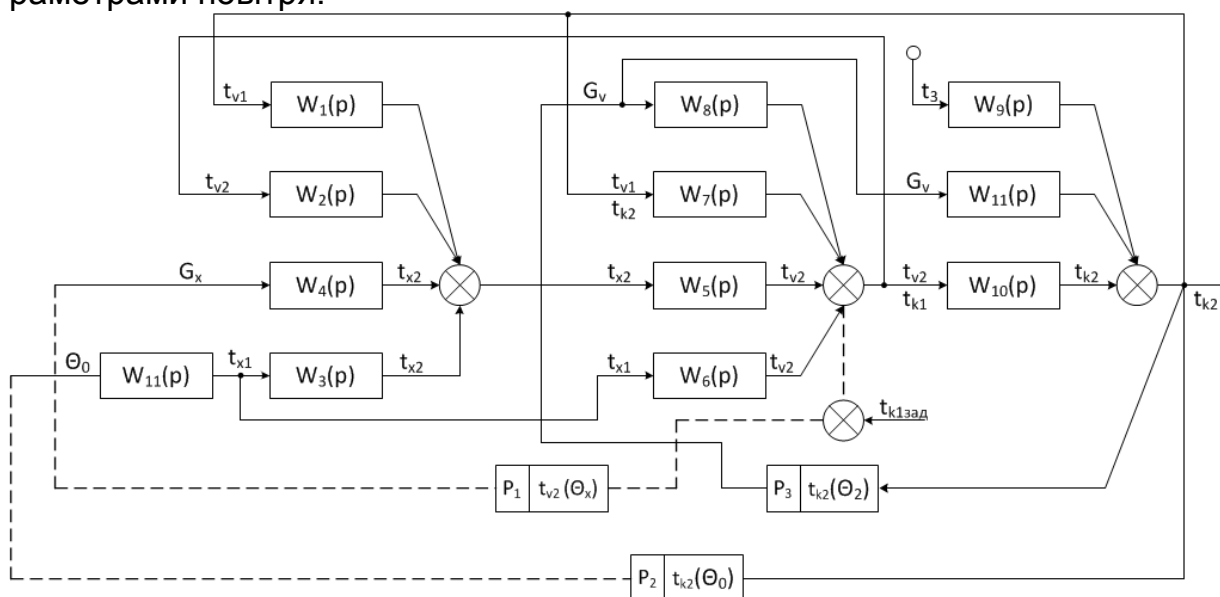


Рис 1. Структурна схема системи автоматичного керування режимами охолодження плодоовочевої продукції:

P_1 – регулятор витрат холодоагента, P_2 – регулятор витрат повітря, P_3 – регулятор холодопродуктивності (частота обертів вала компресора)

Передаткові функції інерційних елементів у системі забезпечення машинного зберігання плодоовочевої продукції по основних каналах отримано у вигляді:

$$\begin{aligned}
W_1 \Phi &\Rightarrow \frac{\Delta t_{v1}}{\Delta t_{x2}} = \frac{k_1}{T_x p + 1}; W_2 \Phi \Rightarrow \frac{\Delta t_{v2}}{\Delta t_{x2}} = \frac{k_1}{T_x p + 1}; W_3 \Phi \Rightarrow \frac{\Delta t_{x1}}{\Delta t_{x2}} = \frac{k_2}{T_x p + 1}; \\
W_4 \Phi &\Rightarrow \frac{\Delta G_x}{\Delta t_{x2}} = \frac{k_3}{T_x p + 1}; W_5 \Phi \Rightarrow \frac{\Delta t_{x2}}{\Delta t_{v2}} = \frac{k_4}{T_v p + 1}; W_6 \Phi \Rightarrow \frac{\Delta t_{x1}}{\Delta t_{v2}} = \frac{k_4}{T_v p + 1}; \\
W_7 \Phi &\Rightarrow \frac{\Delta t_{v1}}{\Delta t_{v2}} = \frac{k_5}{T_v p + 1}; W_8 \Phi \Rightarrow \frac{\Delta G_v}{\Delta t_{v2}} = \frac{k_6}{T_v p + 1}; W_9 \Phi \Rightarrow \frac{\Delta t_z}{\Delta t_{k2}} = \frac{k_7}{T_k p + 1}; \\
W_{10} \Phi &\Rightarrow \frac{\Delta t_{k1}}{\Delta t_{k2}} = \frac{k_8}{T_k p + 1}; W_{11} \Phi \Rightarrow \frac{\Delta G_v}{\Delta t_{k2}} = \frac{k_9}{T_k p + 1}.
\end{aligned}$$

Відповідно до рівнянь (4)–(6) та передаткових функцій елементарних ланок складено математичну модель динамічних процесів машинного зберігання плодоовочевої продукції у вигляді структурної схеми (рис. 1).

Використовуючи рівняння (1)–(3), побудовано перехідні процеси в камері зберігання плодоовочевої продукції (рис. 2).

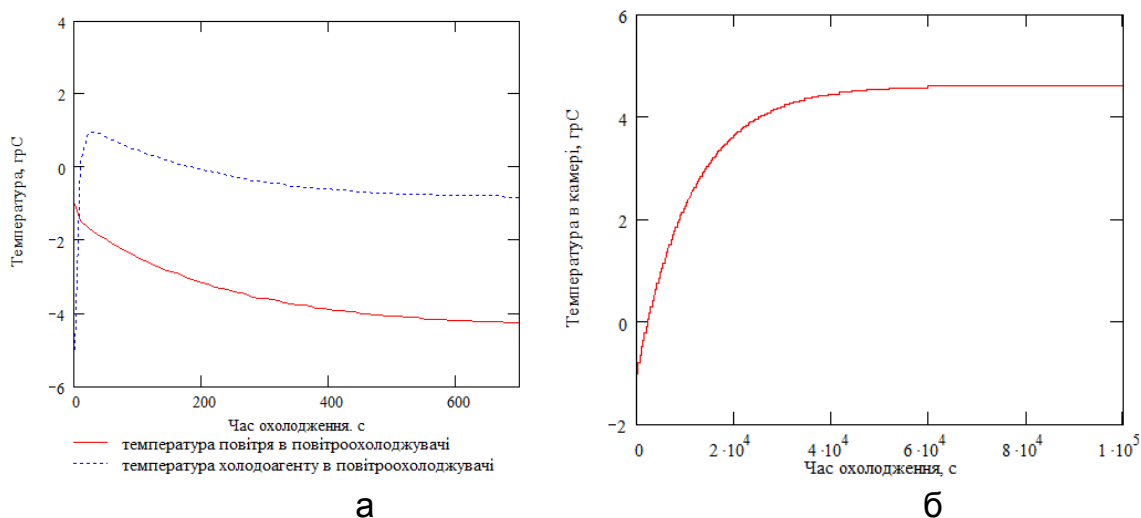


Рис. 2. Перехідні процеси в камері зберігання плодоовочевої продукції:
 а – температура повітря в повітроохолоджувачі та температура холодоагента; б – температура продукції, яка зберігається

Висновки

Розроблено замкнену математичну модель теплових процесів у холодильній установці, яка адекватно описує процес на основі синтезованої системи керування.

Список літератури

1. Бедин Ф.Н. Технология хранения растительного сырья/ Бедин Ф.Н., Балан Е.Ф., Чумак Н.И. – Одесса: "Астропринт", 2002 – 302 с.
2. Богословский В.Н. Строительная теплофизика/ В.Н. Богословский. – М.: Высш. шк., 1982 – 415 с.
3. Мартыненко И.И. Автоматическое управление температурно-влажностными режимами сельскохозяйственных объектов / И.И. Мартыненко, Н.Л. Гирнык. – М.: Колос, 1984 – 152 с.

4. Сотников А.Г. Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции/А.Г. Сотников. – Л.: Машиностроение, 1984 – 240 с.
5. Чумак И.Г. Холодильные установки / И.Г. Чумак, В.П. Чепуренко. – М.: Агропромиздат, 1991 – 495 с.

Приведено математическое описание процессов хранения плодово-овощной продукции с использованием машинного охлаждения. Разработана автоматическая система управления, которая реализует импульсный режим охлаждения.

Холодильное оборудование, плодовоовощехранилище, хранение, автоматическое управление.

The mathematical description of the processes produce storage using machine cooling, and developed an automated control system that implements pulse cooling.

Refrigeration equipment, storage for fruits and vegetables, storage, automatic control.

УДК 62 - 83 : 621. 313. 333

РЕЗОНАНСНІ РЕЖИМИ В КОМПЕНСОВАНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ

В.В. Гаврилюк, асистент

Розглянуто умови виникнення резонансних режимів у компенсованих асинхронних двигунах у пускових та номінальних режимах. Обґрунтовано вплив резонансів напруг та струмів на роботу двигунів.

Асинхронний двигун, компенсація реактивної потужності, резонанс.

Необхідність асинхронних електроприводів зі зменшеним споживанням реактивної потужності зумовила появу компенсованих асинхронних двигунів (КАД) [4,5]. Особливості будови цих електродвигунів, а саме, наявність у них індуктивних L (обмотка двигуна) та одночасно ємнісних C елементів (рис.1) у певних режимах роботи можуть призвести до виникнення резонансних явищ. При резонансі можливе збільшення струму в обмотках двигуна, що призведе до перегрівання останніх та виходу їх з ладу. Існуючі праці, присвячені КАД [4,5], не розкривають проблеми виникнення резонансів. Тому це питання є нині актуальним і потребує ґрунтовного вивчення.

4. Сотников А.Г. Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции/А.Г. Сотников. – Л.: Машиностроение, 1984 – 240 с.
5. Чумак И.Г. Холодильные установки / И.Г. Чумак, В.П. Чепуренко. – М.: Агропромиздат, 1991 – 495 с.

Приведено математическое описание процессов хранения плодово-овощной продукции с использованием машинного охлаждения. Разработана автоматическая система управления, которая реализует импульсный режим охлаждения.

Холодильное оборудование, плодовоовощехранилище, хранение, автоматическое управление.

The mathematical description of the processes produce storage using machine cooling, and developed an automated control system that implements pulse cooling.

Refrigeration equipment, storage for fruits and vegetables, storage, automatic control.

УДК 62 - 83 : 621. 313. 333

РЕЗОНАНСНІ РЕЖИМИ В КОМПЕНСОВАНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ

В.В. Гаврилюк, асистент

Розглянуто умови виникнення резонансних режимів у компенсованих асинхронних двигунах у пускових та номінальних режимах. Обґрунтовано вплив резонансів напруг та струмів на роботу двигунів.

Асинхронний двигун, компенсація реактивної потужності, резонанс.

Необхідність асинхронних електроприводів зі зменшеним споживанням реактивної потужності зумовила появу компенсованих асинхронних двигунів (КАД) [4,5]. Особливості будови цих електродвигунів, а саме, наявність у них індуктивних L (обмотка двигуна) та одночасно ємнісних C елементів (рис.1) у певних режимах роботи можуть призвести до виникнення резонансних явищ. При резонансі можливе збільшення струму в обмотках двигуна, що призведе до перегрівання останніх та виходу їх з ладу. Існуючі праці, присвячені КАД [4,5], не розкривають проблеми виникнення резонансів. Тому це питання є нині актуальним і потребує ґрунтовного вивчення.

Мета досліджень – вивчення КАД щодо виникнення резонансних режимів у його обмотках при різних режимах роботи.

Матеріали та методика досліджень. Об'єктом дослідження є резонансні процеси в компенсованих асинхронних двигунах. Вирішення поставлених завдань проводилось на основі методів теорії кіл.

Результати досліджень. Відомо, що резонансним режимом роботи є такий, при якому вхідний опір є чисто активним [2]. Оскільки резонанс напруг виникає при послідовному з'єднанні L , C елементів, то він можливий у додатковій напівобмотці двигуна (рис.1). За умовою виникнення резонансу струм I_{Δ} в напівобмотці повинен збігатися за фазою з напругою двигуна U_{∂} . Опір кола з додатковою напівобмоткою буде:

$$z_{\Delta} = r_{\Delta} + jx_{\Delta} + \frac{1}{\omega_0 C_{\Delta}}, \quad (1)$$

де r_{Δ} – активний опір додаткової напівобмотки КАД, Ом; x_{Δ} – індуктивний опір додаткової напівобмотки, Ом; C_{Δ} – ємність конденсатора, мкФ.

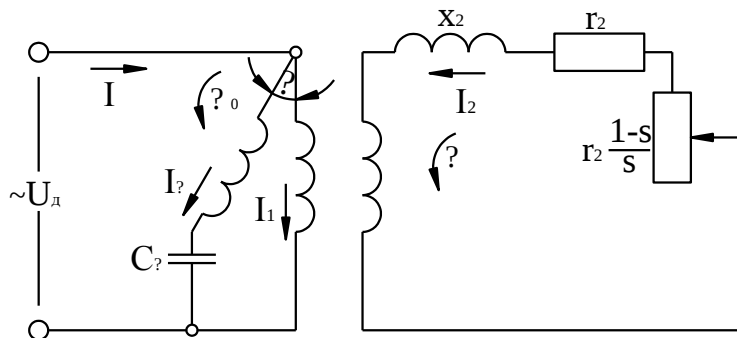


Рис.1. Схема заміщення компенсованого асинхронного двигуна

З цього співвідношення витікає, що струм додаткової напівобмотки $\dot{I}_{\Delta}$ з врахуванням взаємоіндуктивного зв'язку з первинною, або основною напівобмоткою, описується рівнянням:

$$\dot{I}_{\Delta} = \frac{\dot{U}_{\partial} + \dot{E}_{\Delta} - \dot{I}_1 jx_1 \cos(\theta)}{z_{\Delta} - j \frac{1}{\omega_0 C_{\Delta}}}, \quad (2)$$

де $\dot{E}_{\Delta}$ – ЕРС додаткової напівобмотки статора КАД [4,5], В; $\dot{I}_1$ – струм основної напівобмотки статора, А; x_1 – індуктивний опір основної напівобмотки, Ом; θ – кут між основною та додатковою напівобмотками, градус електричний.

Вектор повного струму $\dot{I}_1$ статора КАД повинен бути якомога ближче до вектора напруги двигуна $\dot{U}_{\partial}$, чим забезпечиться найменше споживання реактивної потужності КАД. Цей струм визначається як сума ємнісного струму $\dot{I}_{\Delta}$ додаткової напівобмотки та індуктивного $\dot{I}_1$ основної $\dot{I} = \dot{I}_{\Delta} + \dot{I}_1$. Тому, в номінальному режимі роботи КАД завжди матиме реактивну складову, тобто

можливість виникнення резонансу виключається. Струм $\dot{I}_\Delta$ регулюється ємністю конденсатора C_Δ , що витікає з формули (2).

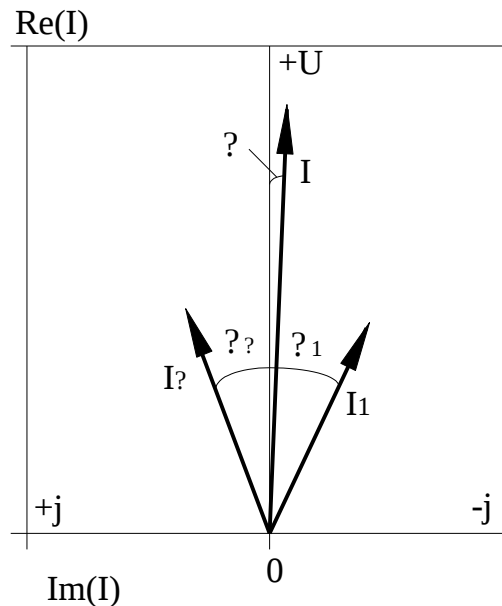


Рис.2. Векторна діаграма струмів КАД

Відомо, що в процесі пуску під навантаженням КАД потребує в кілька разів більшої ємності конденсатора в порівнянні з ємністю для номінального режиму роботи, а сам процес пуску супроводжується зміною ЕРС напівобмоток статора, яка описується співвідношенням:

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_\Delta e^{-j\theta} = -j x_m \dot{I}_0, \quad (3)$$

де x_m – головний опір намагнічуючого контуру, Ом; $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\theta} + \dot{I}_2$ – струм намагнічування КАД, А; $\dot{I}_2$ – струм ротора, А.

Це призводить до зміни як активної, так і реактивної складових струмів двигуна під час його пуску (рис.3). Так, на рис. 3,а зображені функції зміни активного $Re(I_\Delta)=f(s)$ та реактивного $Im(I_\Delta)=f(s)$ струмів під час пуску КАД. При цьому його реактивна складова в деякий момент часу дорівнює нулю $Im(I_\Delta)=0$ (при $s=0,5$). Це свідчить про те, що струм суто активний і в цей момент часу в додатковій обмотці КАД виникне резонанс напруг. Явище резонансу характеризується добротністю контуру Q , яка свідчить у скільки разів напруга на обмотці або конденсаторі перевищує напругу джерела живлення у резонансному режимі [2]:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}. \quad (4)$$

Оскільки індуктивність обмотки $L = \frac{x_L}{\omega_0}$, то формула (4) матиме вигляд:

$$Q = \frac{\omega_0 (x_L / \omega_0)}{R} = \frac{x_L}{R}. \quad (5)$$

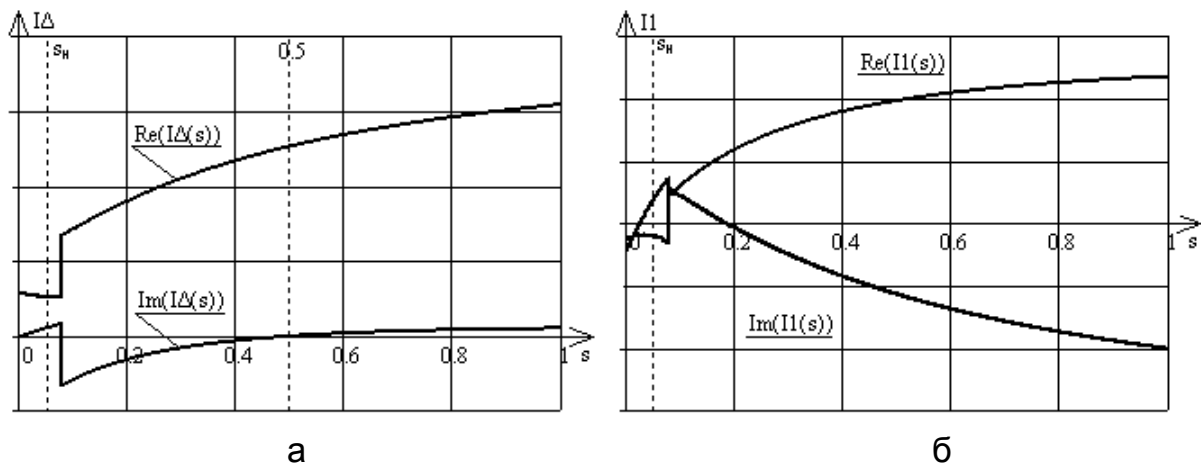


Рис. 3. Графіки зміни активних та реактивних струмів додаткової I_{Δ} (а) та основної I_1 (б) напівобмоток статора в процесі пуску КАД

В електричних двигунах потужністю до 11 кВт найбільшому значенню добротності Q індуктивно-ємнісного контуру напівобмотки КАД відповідає двигун зі значенням активного опору $R_1=0,43$ в.о. та індуктивного $X_1=0,085$ в.о. Цій умові відповідає асинхронний двигун потужністю 11 кВт, 1000 об/хв [1]. Враховуючи, що активний опір r_1 напівобмотки КАД становить $r_1=2R_1$ та (5), добротність контуру буде:

$$Q = \frac{x_{\Delta}}{r_1} = \frac{0,085}{2 \cdot 0,43} = 0,99.$$

Таким чином, у режимі резонансу напруга на додатковій напівобмотці не перевищуватиме $0,99U_n$, свого номінального значення. Таке твердження справедливе і для основної напівобмотки, оскільки вона має ті ж значення активного R_1 та індуктивного X_1 опорів, що й додаткова, а резонанс у ній може виникнути в процесі розгону (рис. 3,б) за рахунок впливу ємнісного струму $\dot{I}_{\Delta}$ через взаємоіндуктивний зв'язок основної напівобмотки з додатковою:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{\partial} + \dot{E}_1 - \dot{I}_{\Delta} j x_1 \cos(\theta)}{z_1}. \quad (6)$$

Резонанс струмів у паралельних напівобмотках КАД за визначенням настане тоді, коли струм двигуна $\dot{I}$ збігатиметься за фазою з напругою [2].

Такий режим роботи КАД досить ефективний, оскільки всю реактивну потужність, необхідну для його збудження забезпечуватиме конденсатор C_{Δ} , і двигун споживатиме з мережі суто активну потужність.

Однак на практиці в номінальному режимі роботи КАД працює в режимі, близькому до резонансного. Це пояснюється необхідністю рівності струмів $\dot{I}_1$ та $\dot{I}_{\Delta}$ що обумовлює рівність втрат в обох напівобмотках та однаковий тепловий режим у них (рис. 4). У цьому режимі загальний струм $\dot{I}$ двигуна не буде чисто активний (див. рис. 2), але в процесі роботи КАД можливі зміни навантаження, які спричинятимуть такий перерозподіл струмів у його напів-

бмотках, що призведе до збігу струму двигуна $\dot{I}$ за фазою з напругою його живлення $\dot{U}_\delta$ і до виникнення резонансу струмів.

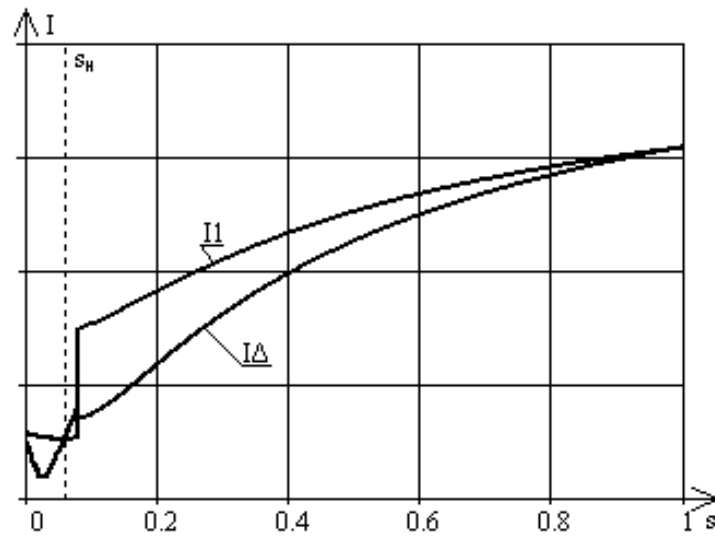


Рис. 4. Графіки зміни струмів основної I_1 та додаткової I_Δ напівобмоток статора в процесі пуску КАД

Згідно зі схемою заміщення (див. рис. 1) повний опір фази статора буде:

$$z_d = \frac{z_1 \left(\frac{1}{\omega_0 C_\Delta} + z_\Delta \right)}{z_1 + \frac{1}{\omega_0 C_\Delta} + z_\Delta} + \frac{jx_m z_2}{z_2 + jx_m}. \quad (7)$$

Звідки активний опір:

$$r_d = \frac{r_1 r_\Delta}{r_1 + r_\Delta} + \frac{r_2}{s} \quad (8)$$

та індуктивний:

$$x_d = \frac{x_1 x_\Delta}{x_1 + x_\Delta} + \frac{x_m x_2}{x_2 + x_m}. \quad (9)$$

Відповідно до джерел [1, 3] та формул (5), (8), (9) робимо висновок, що добротність контурів КАД на основі двигунів потужністю до 11 кВт при роботі в режимі резонансу струмів не перевищує $Q=0,16$.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що резонансні явища, які виникають у компенсованих асинхронних двигунах не впливають на його роботу. Резонанси напруг у процесі пуску двигунів та резонанси струмів в їх номінальних режимах роботи не призводять до збільшення струмів та напруг в його напівобмотках за рахунок низької добротності контурів КАД.

Список літератури

1. Асинхронные двигатели серии 4А : справ. / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 196 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1996. – 350 с.
3. Довідник сільського електрика / [В. В. Олійник, Л. П. Тищенко, Є. Л. Жулай та ін.] ; за ред. В. С. Олійника. – [3-є вид., перероб. і доп.]. – К. : Урожай, 1989. – 264 с.
4. Компенсовані асинхронні машини: монографія / [Мишин В.І., Каплун В.В., Чуенко Р.М. та ін.]. – К. : КНУТД, 2012. – 221 с.
5. Мишин В. И. Эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности в асинхронных двигателях / В. И. Мишин, Р. Н. Чуенко, В. В. Гаврилюк // Электротехника. – 2009. – № 8. – С. 30–36.

Рассмотрены условия возникновения резонансных режимов в компенсированных асинхронных двигателях в пусковых и номинальных режимах. Обосновано влияние резонансов напряжений и токов на работу двигателей.

Асинхронный двигатель, компенсация реактивной мощности, резонанс.

Resonance modes in compensated induction motors. The paper studies initiation conditions of resonance in compensated induction motors in starting condition and nominal rating. Influence of voltage resonance and current resonance on operation of induction motors is established.

Induction motor, reactive power compensation, resonance.

УДК 631.3:621.1

ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ЗАНУРЮВАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОНАСОСНОГО АГРЕГАТУ

***В.Є. Василенков, кандидат технічних наук
Д.В. Субіцький, студент***

Наведено дослідження щодо визначення теплового балансу занурювального електронасосного агрегату.

Температура, допустима частота включень, витрата води, занурювальний насос, об'єм башти.

При роботі в електродвигуні мають місце втрати електроенергії, які викликають нагрівання. Підвищення температури обмотки вищедопустимої значно скорочує термін служби ізоляції.

Список літератури

1. Асинхронные двигатели серии 4А : справ. / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 196 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1996. – 350 с.
3. Довідник сільського електрика / [В. В. Олійник, Л. П. Тищенко, Є. Л. Жулай та ін.] ; за ред. В. С. Олійника. – [3-є вид., перероб. і доп.]. – К. : Урожай, 1989. – 264 с.
4. Компенсовані асинхронні машини: монографія / [Мишин В.І., Каплун В.В., Чуенко Р.М. та ін.]. – К. : КНУТД, 2012. – 221 с.
5. Мишин В. И. Эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности в асинхронных двигателях / В. И. Мишин, Р. Н. Чуенко, В. В. Гаврилюк // Электротехника. – 2009. – № 8. – С. 30–36.

Рассмотрены условия возникновения резонансных режимов в компенсированных асинхронных двигателях в пусковых и номинальных режимах. Обосновано влияние резонансов напряжений и токов на работу двигателей.

Асинхронный двигатель, компенсация реактивной мощности, резонанс.

Resonance modes in compensated induction motors. The paper studies initiation conditions of resonance in compensated induction motors in starting condition and nominal rating. Influence of voltage resonance and current resonance on operation of induction motors is established.

Induction motor, reactive power compensation, resonance.

УДК 631.3:621.1

ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ЗАНУРЮВАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОНАСОСНОГО АГРЕГАТУ

**В.Є. Василенков, кандидат технічних наук
Д.В. Субіцький, студент**

Наведено дослідження щодо визначення теплового балансу занурювального електронасосного агрегату.

Температура, допустима частота включень, витрата води, занурювальний насос, об'єм башти.

При роботі в електродвигуні мають місце втрати електроенергії, які викликають нагрівання. Підвищення температури обмотки вищедопустимої значно скорочує термін служби ізоляції.

При аналізі нагрівання двигуна оцінюється перевищення його температури над температурою охолоджувального середовища. У стандартах за нормальну температуру газоподібного охолоджувального середовища прийнята температура + 40 °С.

У сучасних електродвигунах, як правило, використовуються ізоляційні матеріали класів В та F, для яких ГОСТ 8865–87 встановлює допустимі температури обмоток відповідно 130 та 155 °С. Допустиме перевищення температури частин машин наводиться з деяким запасом, враховуючи неточність вимірювання та неможливість визначити температуру в найгарячішому місці обмотки. За ГОСТ 183–74 “Машини електричні обертові” допустимі перевищення температури частин електричних машин при температурі охолоджувального повітря + 40 °С і висоті над рівнем моря до 1000 м залежно від методу вимірювання встановлюються за даними таблиці.

Допустимі перевищення температури частин електричних машин

Частини електричних машин	Допустимі перевищення температури, °С			
	Клас ізоляції В		Клас ізоляції F	
	Метод закладених температурних індикаторів	Метод опору	Метод закладених температурних індикаторів	Метод опору
Обмотки електричних машин змінного струму потужністю менше 5000 кВА і довжиною осердя менше 1 м	80	80	100	100
Стальні осердя та інші стальні частини, що дотикаються до ізолюваних обмоток	80	—	100	—

Допустимі температури нагрівання підшипників електричних машин: + 100 °С для підшипників кочення і + 80 °С для підшипників ковзання.

Аналітичне визначення перевищення температури обмоток та інших частин електродвигуна залежно від часу є досить важким через складність теплових процесів в електричних машинах. У першу чергу аналіз теплового режиму ускладнюється неоднорідністю машини в цілому (сталь, мідь, ізоляція) та окремих її частин. Тому для спрощення аналізу вважають двигун однорідним тілом. При цьому формули, що описують процеси нагрівання, спрощуються і полегшується аналіз температурного стану двигуна. Перевищення температури електродвигуна над температурою охолоджувального середовища визначають із залежності:

$$\tau = \frac{\Delta P}{A} \left(1 - e^{\frac{-t}{T_H}} \right) + \tau_{\text{ноч}} e^{\frac{-t}{T_H}}. \quad (1)$$

де τ – перевищення температури електродвигуна, град.; ΔP – потужність втрат у °вигуні, Дж/с (Вт); A – тепловіддача двигуна, Дж/с-град; t – час, с;

T_H – стала часу нагрівання, с ($T_H = C/A$); $\tau_{поч}$ – початкове перевищення температури двигуна, град; C – теплоємність двигуна, Дж/град.

При $t \rightarrow \infty$ температура двигуна набуває усталеного значення $\tau_{уст} = Q/A$ і рівняння (1) записується так:

$$\tau = \tau_{уст} \left(1 - e^{\frac{-t}{T_H}} \right) + \tau_{поч} e^{\frac{-t}{T_H}}. \quad (2)$$

Охолодження двигуна до температури охолоджувального середовища при вимиканні його з мережі описується залежністю:

$$\tau = \tau_{поч} e^{\frac{-t}{T_H}}. \quad (3)$$

Двигун набуває усталеної температури при роботі протягом часу, що дорівнює $t_{уст} = (4 - 5)T_H$.

На температуру двигуна особливе значення має частота його включень.

Припустима частота включень у годину насосних установок — це таке число включень, при якому середня температура двигуна після великої кількості робочих циклів буде рівна максимально допустимою. Двигун використовується повністю, якщо при роботі з номінальною швидкістю втрати енергії, виділювані в навколишнє середовище, ті ж, що й у номінальному режимі. Тому дослідження теплового балансу занурювального насоса, що впливає на визначення припустимої частоти його включень, і як похідна, підвищення його експлуатаційної надійності є актуальною задачею.

Мета досліджень – обґрунтування допустимої частоти включень занурювального насоса на основі дослідження теплового балансу занурювального електронасосного агрегату

Матеріали та методика досліджень. На основі дослідження технологічної схеми заповнення башти водою, визначення регульованого об'єма башти, подачі насосного агрегата визначається тепловий баланс занурювального електронасосного агрегату.

Результати досліджень. Об'єм башти визначають у результаті аналізу технологічної схеми заповнення її водою: 1) у башті об'ємом V_0 діє тиск повітря P_0 , а вода відсутня; 2) вода в башті перебуває на нижньому рівні HP , при якому відбувається автоматичне включення електронасоса, обсяг повітряної подушки V_1 тиск повітря P_1 ; 3) вода в башті перебуває на верхньому рівні BP , відбувається відключення електронасоса, об'єм повітря V_2 , тиск P_2 .

Регульований об'єм башти

$$V_p = V_1 - V_2. \quad (4)$$

Вважаючи, що кількість і температура повітря в процесі роботи залишаються постійними, за законом Бойля – Маріотта можна записати:

$$RT = P_0 V_0 = P_1 V_1 = P_2 V_2; \quad (5)$$

де R – газова постійна повітря; T – температура повітря, °C

З урахуванням виразу (5) регульований об'єм башти

$$V_p = P_0 V_0 \left(\frac{1}{P_1} - \frac{1}{P_2} \right); \quad (6)$$

повний об'єм

$$V_0 = V_p \frac{P_1}{P_0} \cdot \frac{1}{(1 - P_1/P_2)} . \quad (7)$$

Звичайний тиск $P_0=1$, а відношення $P_1/P_2=0,65...0,75$ для невеликих установок і $0,8...0,85$ для великих. Повний об'єм казана можна зменшити, створивши попередній тиск повітря в ньому, для чого потрібен додатковий компресор з ручним або механічним приводом. Тиск P_1 вибирають таким, щоб забезпечити подачу води до самого найвіддаленого споживача, а тиск P_2 визначають із відношення $P_1/P_2=0,65...0,85$.

Максимальну частоту включень у годину для установок з казаном визначають за формулою:

$$z_{\max} = \frac{Q_n}{4V_p} = \frac{Q_n P_1}{4P_0 V_0 (1 - P_1/P_2)} . \quad (8)$$

Погіршення умов охолодження нерухомого самовентильованого двигуна враховують коефіцієнтом

$$\beta = T_n/T_0 , \quad (9)$$

де T_n і T_0 — відповідно постійні часу нагрівання й охолодження.

Якщо знехтувати незначною зміною температури, то тепловіддачу під час паузи можна виразити у вигляді $\beta \Delta P_n t_0$. Під час пуску й гальмування тепловіддача змінюється в межах від $\beta \Delta P_n$ до ΔP_n , тому кількість теплоти, що виділяється при пуску, визначається як $((\beta+1)/2)\Delta P_n t_n$, а при гальмуванні — як $((\beta+1)/2)\Delta P_n t_T$.

Позначаючи втрати енергії, які виділяються при пуску, через ΔA_n , а за робочий період — через $\Delta P_n t_p$ складають рівняння енергетичного балансу за цикл:

$$\Delta A_n + \Delta P_n t_p = ((\beta+1)/2)\Delta P_n t_n + \Delta P_n t_p + ((\beta+1)/2)\Delta P_n t_T + \beta \Delta P_n t_0 , \quad (10)$$

де t_n , t_p , t_T , і t_0 — відповідно час пуску, роботи, що встановився, гальмування й паузи.

Час циклу $t_{\text{ц}}$ і частота включень за годину z зв'язані виразом

$$t_{\text{ц}} = 3600/z , \quad (11)$$

тому

$$t_p = \frac{3600}{z} \varepsilon - (t_n + t_T) ; \quad (12)$$

$$t_0 = \frac{3600}{z} (1 - \varepsilon) . \quad (13)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (10) і (13) відносно z , одержують формулу підрахунку для допустимого числа включень за годину при номінальному завантаженні двигуна:

$$z = \frac{3600\beta(1-\varepsilon)\Delta P_n}{\Delta A_n - \frac{1+\beta}{2}(t_n + t_T)\Delta P_n} . \quad (14)$$

З виразу (14) випливає, що припустима частота включень за годину тим більше, чим вище номінальні втрати ΔP_n (двигуни з більш теплостійкою ізоляцією), чим досконаліше вентиляція ($\beta = 1$) і чим менше пускові втрати ΔA_n .

Висновки

1. На основі дослідження технологічної схеми заповнення башти водою, визначення регульованого об'єма башти, подачі насосного агрегата визначається рівняння теплового балансу занурювального насоса за цикл роботи, отримано формулу підрахунку для допустимого числа включень за годину при номінальному завантаженні двигуна.

2. З досліджень випливає, що припустима частота включень за годину тим більше, чим вище номінальні втрати ΔP_n (двигуни з більш теплостійкою ізоляцією) і чим менше пускові втрати ΔA_n .

Список літератури

1. Гідравліка, сільськогосподарське водопостачання та гідропневмопривід / В.А. Дідур, О.Д. Савченко, С.І. Пастушенко, С.І. Мовчан. – Запоріжжя: Вид-во „Прем'єр”, 2005. – 461 с.

2. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. – М.: Колос, 1979. – 560 с.

Приведены исследования по определению теплового баланса погружного электронасосного агрегата.

Температура, допустимая частота включений, расход воды, погружной насос, объем башни.

Presented studies to determine the heat balance of submersible electric pump.

Temperature, permissible switching frequency, water flow, submersible pump, the volume of the tower.

УДК 620.92

ВИЗНАЧЕННЯ ГОРЮЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛОМИ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ЇЇ ГОРІННЯ І ГАЗИФІКАЦІЇ

***О.В. Шеліманова, кандидат технічних наук
В.А. Колієнко, асистент***

Проаналізовано характеристики процесу горіння біомаси залежно від її вологості. Показано, що у разі збільшення вологості біомаси характеристики процесу горіння суттєво погіршуються.

Біомаса, солома, температура горіння, теплота згоряння, вологість палива.

Висновки

1. На основі дослідження технологічної схеми заповнення башти водою, визначення регульованого об'єма башти, подачі насосного агрегата визначається рівняння теплового балансу занурювального насоса за цикл роботи, отримано формулу підрахунку для допустимого числа включень за годину при номінальному завантаженні двигуна.

2. З досліджень випливає, що припустима частота включень за годину тим більше, чим вище номінальні втрати ΔP_n (двигуни з більш теплостійкою ізоляцією) і чим менше пускові втрати ΔA_n .

Список літератури

1. Гідравліка, сільськогосподарське водопостачання та гідропневмопривід / В.А. Дідур, О.Д. Савченко, С.І. Пастушенко, С.І. Мовчан. – Запоріжжя: Вид-во „Прем'єр”, 2005. – 461 с.

2. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. – М.: Колос, 1979. – 560 с.

Приведены исследования по определению теплового баланса погружного электронасосного агрегата.

Температура, допустимая частота включений, расход воды, погружной насос, объем башни.

Presented studies to determine the heat balance of submersible electric pump.

Temperature, permissible switching frequency, water flow, submersible pump, the volume of the tower.

УДК 620.92

ВИЗНАЧЕННЯ ГОРЮЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛОМИ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ЇЇ ГОРІННЯ І ГАЗИФІКАЦІЇ

***О.В. Шеліманова, кандидат технічних наук
В.А. Колієнко, асистент***

Проаналізовано характеристики процесу горіння біомаси залежно від її вологості. Показано, що у разі збільшення вологості біомаси характеристики процесу горіння суттєво погіршуються.

Біомаса, солома, температура горіння, теплота згоряння, вологість палива.

Нині накопичено достатній досвід використання рослинної продукції сільськогосподарського виробництва (біомаси) і в першу чергу соломи як палива для опалювальних котелень. Деякі автори вважають, що солома – це відходи сільськогосподарського виробництва, проте її активне використання як органічного добрива (при застосуванні як потокової, так і розсівної технології збирання та оброблення соломи), на потреби тваринництва (як підстилки та грубого корму для худоби), для вирощування грибів у закритому ґрунті тощо дає можливість стверджувати, що солома скоріше належить до продукції, ніж до відходів сільського господарства.

З огляду на широке застосування соломи в самому агровиробництві виникає питання про те, яку її частку доцільно використати як паливо. Аналіз світового досвіду використання біомаси показує, що така частка коливається від 1 до 27 % від її збору. За оцінкою БАУ [3] станом на 2012 р. в Україні вихід соломи зернових культур (пшениці) становив близько 30,6 млн. т, а частка соломи, що була використана для отримання енергії та твердих біопалив склала 0,6 %.

Питання про можливість збільшення обсягів соломи для вироблення енергії потребує індивідуального вирішення для кожного господарства.

З деяких регіонів надходить інформація про повну відсутність соломи, доступної для вироблення енергії, у зв'язку з використанням її на власні потреби. Інші експерти прогнозують річну можливість використання соломи в обсягах, еквівалентних 4,0 — 4,5 млн т у.п., що становить третину загального потенціалу біомаси в Україні.

Як паливо солома може використовуватись у подрібненому вигляді, у вигляді туків різних розмірів, гранул і брикетів. Планується довести вироблення гранул із соломи в Україні до 2,5 – 3,0 млн т за рік.

Все це обумовлює актуальність цієї тематики.

Мета досліджень – визначення основних горючих характеристик соломи як палива.

Матеріали та методика досліджень. До горючих характеристик належать:

- склад горючих, баластних та інших компонентів соломи;
- теплота згоряння;
- об'єм повітря на горіння та об'єм продуктів згоряння;
- температура горіння;
- температура розм'якшення золи.

У табл. 1 наведено деякі характеристики соломи, які отримані різними авторами. Біогранули із соломи мають аналогічний склад, але меншу вологість: до 10 – 11 %, а тому їх теплота згоряння буде дещо більшою – до 15,42 МДж/кг (3683 ккал/кг).

Як видно з табл.1 основними горючими компонентами соломи є карбон С, у значно меншій кількості – гідроген Н.

Спалювання соломи пов'язано з розв'язанням низки проблем, які спричинені: неоднорідністю складу соломи; високим виходом летких речовин при її горінні; низькою теплотою згоряння (особливо за умови висо-

кої вологості палива); наявністю хлору, який призводить до корозії трубної частини котла, а також високою зольністю соломи і низькою температурою розм'якшення золи, що призводить до шлакування колосникової решітки і забруднення трубної поверхні нагрівання.

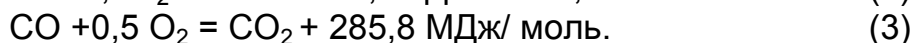
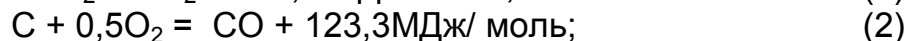
1. Основні характеристики біомаси

Показник	Свіжа со- лома (жо- вта)	Злежана соло- ма	Солома пшениці1	Солома пшениці2	Деревина(для порівняння)
Елементарний склад, % мас.:					
карбон	42	43	43,1	45,64	48 – 50
окисген	37	38	39,8	41,36	38 – 42
гідроген	5	5,2	5,3	5,97	6,0 – 6,5
хлор	0,75	0,2	0,8	0,392	0,01
калій	1,18	0,22	6,1мг/кг	–	–
азот	0,35	0,41	0,6	0,37	0,5 – 2,3
сірка	0,16	0,13	0,2	0,08	0,05
Нижча теплота згоряння Q_n^p , МДж/ кг	14,4	13,5	15	15,01	–
Вміст летких речо- вин, % мас.	>70	>70	72	80,2	–
Зольність, %	4,5	5,9	6,6	6,59	–
Температура початку деформа- ції золи, °С	735 – 840	–	–	730	1150 – 1450
Температура пла- влення золи, °С	800 – 1000	950 – 1100	1040– 1250	1150	1250 – 1650
Вологість, %мас	10 – 20	10 – 20	–	11,2	10 – 20

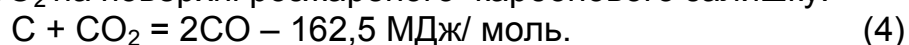
Процеси гетерогенного горіння, до яких належать процеси горіння біомаси, вивчалися багатьма дослідниками [4– 7]. Одним із висновків цих досліджень є те, що для подрібненого палива, до якого належить біомаса, за умови значної швидкості потоку процес горіння зміщується у зону кінетичного горіння. У цій зоні процес горіння обмежується лише швидкістю самої хімічної реакції, не залежить від умов підведення кисню і швидкості повітряного потоку. Згідно із законом Арреніуса збільшення температури процесу спричиняє різке збільшення швидкості горіння.

Основними продуктами реагування карбону палива з окиснювачем (киснем повітря) є складні киснево-карбонові комплекси C_xO_y , які розпадаються з прикінцевим утворенням CO_2 і CO . Рівень теоретичних досліджень з кінетики хімічного реагування не дає можливості вивести залежність для швидкості горіння карбону. Але з експериментальних досліджень відомо, що збільшення температури процесу спричиняє збільшення співвідношення CO/CO_2 .

Утворення зазначених компонентів продуктів горіння відбувається як у процесі окислювальних гетеро – і гомогенних реакцій:



так і відновлення CO_2 на поверхні розжареного карбонового залишку:



Швидкість хімічного реагування вуглецю визначається інтенсивністю витрачання ним кисню та інтенсивністю утворення продуктів реакції, Тому дослідження закономірностей хімічного реагування карбону можна вести у напрямку дослідження витрачання кисню O_2 та утворення оксидів вуглецю в реакціях (1 і 2), зменшення кількості CO_2 і збільшення частки CO для реакції (4), а також зростання CO_2 і зменшення O_2 і CO для реакції (3).

Леткі речовини і CO , що утворюються із твердої частинки біомаси згорають у газовій фазі. При цьому частинки знаходяться у складній взаємодії конвекцією з газовим середовищем топки і взаємодії випромінюванням з газами та огорожувальними поверхнями агрегату. Відтворити і промоделювати таке середовище досить важко. Тому дані про швидкість виділення летких речовин, а також швидкість горіння і вплив різних факторів на вигорання частинки відрізняються.

У процесі горіння і газифікації частинка біомаси проходить ряд стадій – по мірі нагрівання і підсушування починається процес сублімації і вихід летких речовин; вони дифундують у простір навколо частинки і окислюються (згідно із [2] на це витрачається до 10 % часу від загального часу процесу). Після цього залежно від наявності окислювача в зоні горіння відбувається складний комплекс паралельно-послідовних багатостадійних фізико-хімічних процесів, які призводять або до горіння коксу, або протікання вторинних реакцій відновлення CO_2 і H_2O на поверхні розжареного вуглецевого залишку.

Методика оперативного визначення технічних характеристик біомаси, як палива за результатами його комплексного термічного аналізу основана на аналізі кривих зменшення маси навіски палива залежно від температури і атмосфери печі [1]. Реакційна здатність палива при цьому визначається за величиною швидкості процесу випаровування вологи і виходу летких речовин в окислювальному середовищі.

Результати досліджень. При експериментальних дослідженнях виходу летких речовин окислювальне середовище створювалося шляхом подачі в реакційну зону повітря з постійними витратами 100 мл/хв. Досліджувалися такі види палива, як пелети із деревини і нафтовий кокс. Температура в реакційній зоні змінювалася від 80 до 1100 °С. Результати досліджень наведено на рис.1.

Динаміка термохімічного перетворення пелет показує втрату вологи на 10-тій хв нагрівання, інтенсивний вихід летких речовин на 20-тих, 30-тих хв, завершення газифікації вуглецю на 85-тій хв процесу і стабілізацію зольного залишку на завершальній стадії процесу. Вихід летких речовин становив до 70 %. Як видно із графіка термохімічного перетворення нафтового коксу проходили дещо інакше, що пояснюється іншою природою карбону у складі нафтового коксу.

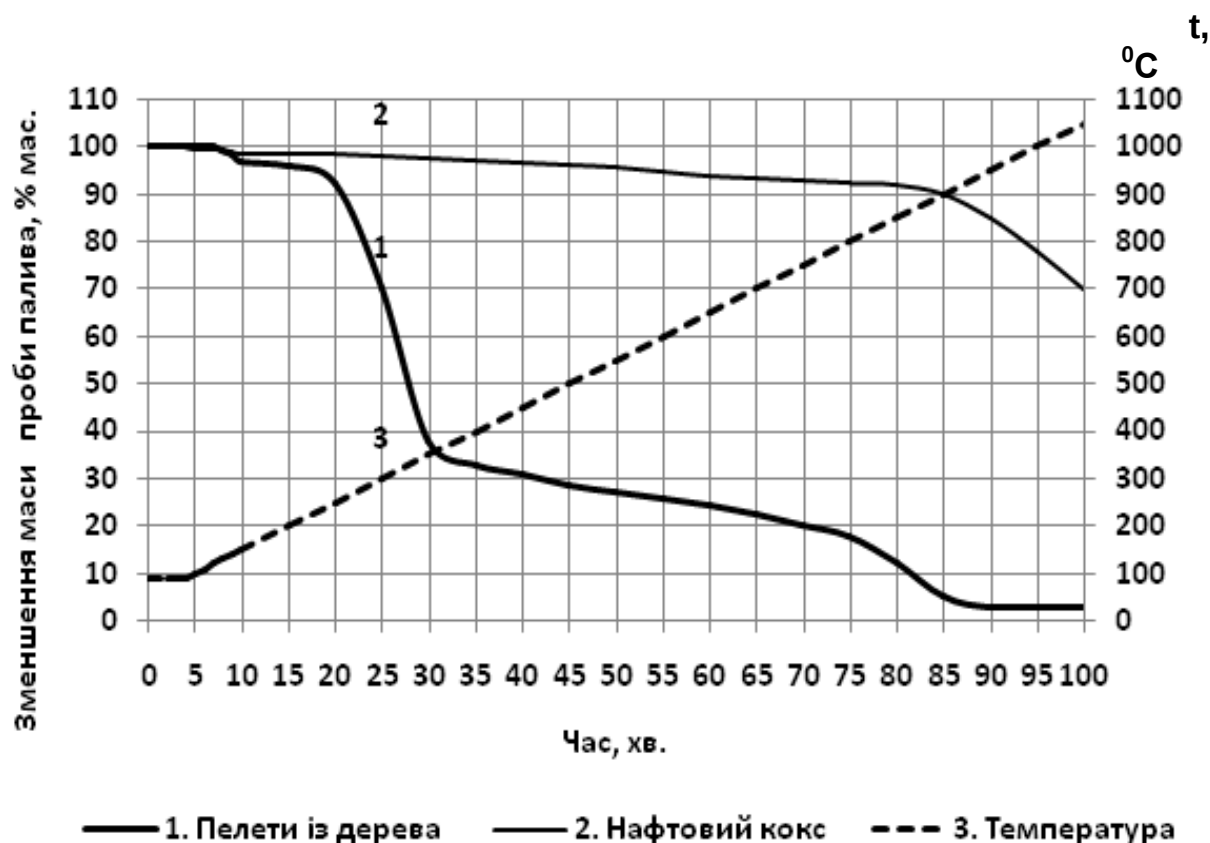


Рис. 1. Результати експериментальних досліджень реакційної здатності палива

У результаті виконання експериментальних досліджень визначено моменти (періоди) фази переходу від режиму сушіння біомаси до режиму виходу летких речовин і далі – до стадії горіння і газифікації вуглецевого залишку.

Показано, що температура, при якій починається вихід летких речовин, залежить від виду палива. З літературних джерел відомо, що вихід летких речовин залежить від віку палива і збільшується із зростанням його віку. Так, для бурого вугілля цей процес починається при температурі близько 170, а для антрациту – близько 320 °C. Дослідженнями встановлено, що вихід летких речовин для пелет із деревини починається при температурі близько 220 °C.

Особливо важливим в оцінюванні горючих властивостей біомаси є питання її вологості, оскільки для більшості котлів допустима вологість біомаси перед подачею до котла не повинна перевищувати 15 – 20 %. У ході ж збирання, перероблення і складування біомаси можливе її зволоження внаслідок контакту з атмосферною вологою. Щойно зрублена деревина має вологість до 50 % і більше, повітряно-суха деревина після річної витримки в лісі має вологість близько 20 – 30 %. Дані ж щодо вологості соломи відсутні.

Для визначення діапазону зміни вологості соломи було проведено експериментальне дослідження з визначення її вологості за різних умов зберігання і зволоження. Дослідження виконувалися згідно з методикою [1], яка

передбачає визначення вологості соломи за різницею маси до і після висушування зразка у сушильній шафі при температурі близько 105 °С.

Моделювання різних умов зберігання соломи і зволоження повітря, в якому вона знаходилась, здійснювалося внесенням до повітря розпиленої води із наступною витримкою соломи у зволоженому стані від 2 до 3 діб. На момент проведення досліджень з визначення вологості скраплена водяна пара по поверхні соломи і у чашці для визначення маси соломи була відсутня. Таким чином визначалася кількість води, яка була поглинута соломкою. Кількість води, яку вносили до повітря та соломи поступово збільшували. Основні результати досліджень наведено в табл. 2. Кожен результат отримано на основі 4 – 5- разових повторень досліджень.

2. Результати експериментальних досліджень вологості соломи

№ з/п	Кількість внесеної води, г	Маса соломи, нетто г		Вологість, % мас. до маси вологої соломи	
		вологої	після висушування	згідно з розрахунком внесеної води	згідно з експериментальними даними
1	0	13,95	12,72	—	8,8
2	3	12,09	10,70	24,8	11,5
3	10	17,95	10,63	55,7	40,7
4	20	25,07	6,92	79,7	72,3
5	30	24,20	6,04	100	75,0
6	40	24,11	5,62	100	76,6
7	50	28,16	6,47	100	77,0

Як видно із табл.. 2 абсорбційна здатність соломи відносно водяної пари обмежує величину максимальної вологості на рівні близько 77 %. Після досягнення зазначеної величини вологості настає насичення, і вологість соломи практично не збільшується. Зміну вологості соломи залежно від кількості внесеної на неї води показано на графіку (рис. 2).

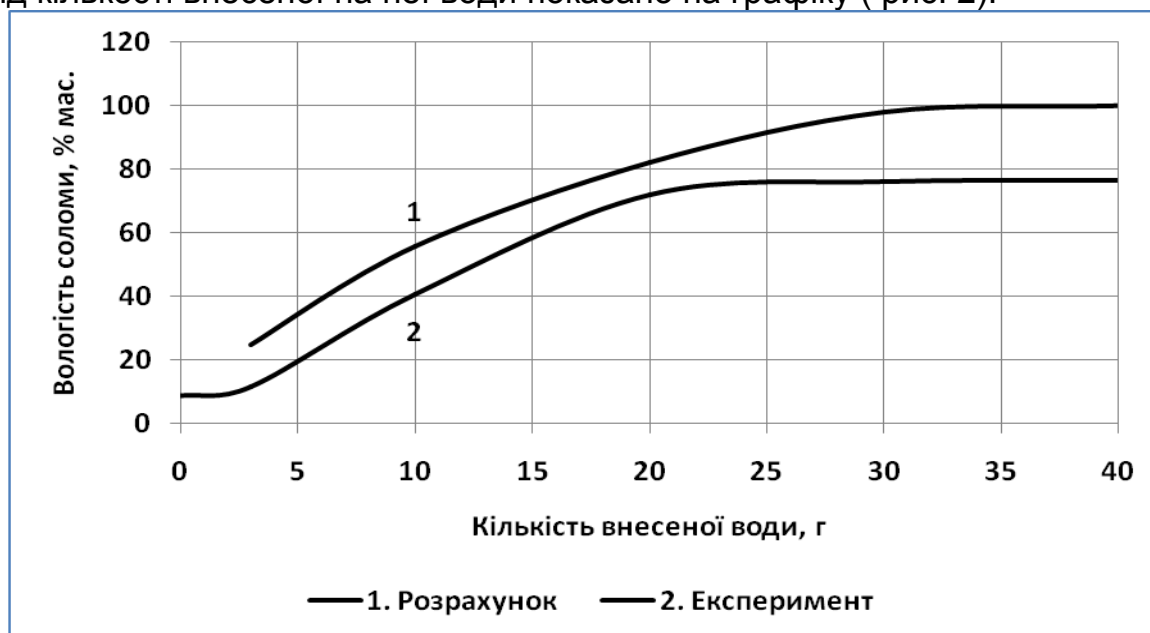


Рис. 2. Зміна масової вологості соломи залежно від кількості водяної пари у середовищі зберігання соломи

Отримані дані показують, що за умови зволоження соломи атмосферою вологою її максимальна масова вологість може досягати високих значень (до 77 % мас.), що суттєво погіршує горючі властивості біомаси як палива (зменшення теплоти згоряння, збільшення витрат теплоти на висушування, погіршення якості горіння, зменшення температури продуктів згоряння).

На рис. 3–5 показано динаміку зміни основних характеристик процесу горіння залежно від вологості соломи, елементарний склад якої наведено в табл. 1. Теплота згоряння соломи із збільшенням її вологості суттєво зменшується – з 15,2 МДж/кг за вологості 10 % мас. до 3,9 МДж/кг – за вологості 77 % мас.

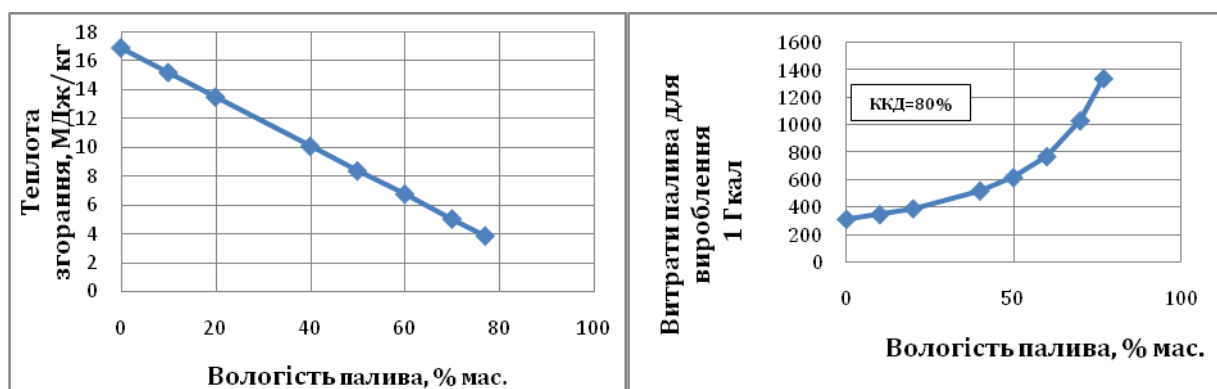


Рис. 3. Графік залежності питомої теплоти згоряння і витрат соломи для вироблення 1 Гкал теплоти залежно від вологості

Уже при збільшенні вологості до 30 – 40 % мас. використання соломи як палива стає недоцільним. Разом із зменшенням теплоти згоряння збільшуються витрати соломи для отримання одиниці теплоти. Так, за умови 10 % -ної вологості витрати соломи для котла потужністю 1 Гкал/год становлять близько 350 кг за год., а за максимально можливої вологості такі витрати зростають до 1350 кг за год., що суттєво збільшує логістичну складову вартості палива

Разом із зменшенням теплоти згоряння вологого палива зростає та частина теплоти палива, яка буде витрачатися на випаровування води, що міститься у паливі після потрапляння його до топки котла. Графік залежності таких витрат теплоти від вологості палива наведено на рис. 4.

Процес горіння вологої соломи супроводжується зниженням температури горіння і збільшенням втрат теплоти з відхідними газами. Збільшення вологості продуктів згоряння за присутності сірчистого ангідриду призводить до необхідності підтримувати на виході із котла більшу температуру продуктів згоряння, що спричинене властивістю сірчистого ангідриду збільшувати точку роси продуктів згоряння. Це також збільшує втрати теплоти з відхідними газами.

На рис. 5 показано зміну величини втрат теплоти з відхідними газами і зменшення дійсної температури горіння при збільшенні вологості соломи.



Рис.4. Витрати теплоти палива на випаровування води

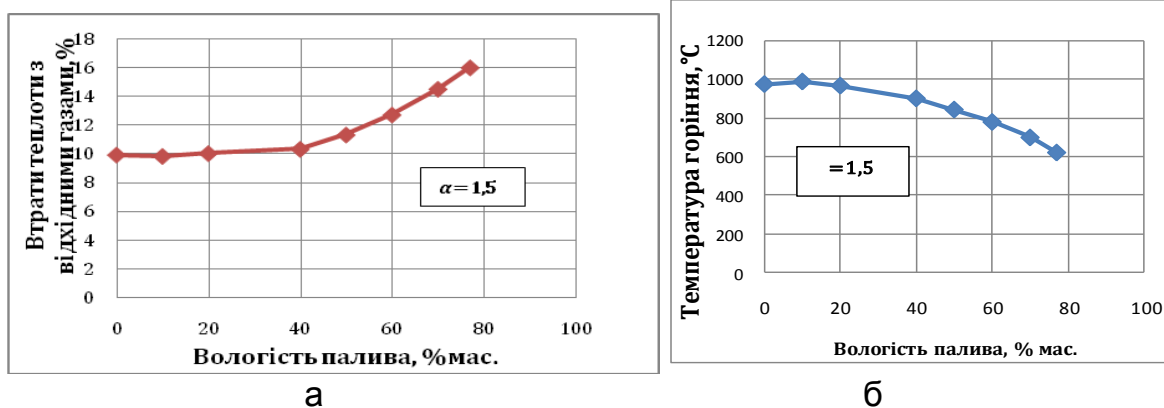


Рис.5. Зміна втрат теплоти з відхідними газами (а) і дійсної температури горіння у котлі (б) при спалюванні соломи різної вологості

Збільшення вологості біомаси спричинює також зростання парникового газу CO_2 при спалюванні палива, що пояснюється збільшенням об'єму продуктів згоряння за рахунок зростання вмісту в них водяної пари.

Висновки

Аналіз характеристик процесу горіння біомаси залежно від її вологості показує, що у разі збільшення вологості біомаси характеристики процесу горіння суттєво погіршуються. Таким чином, можна зробити висновок, що внаслідок значної гігроскопічності соломи у логістичних схемах забезпечення об'єктів теплоенергетики біомасою необхідно обов'язково зберігати і транспортувати солому у закритому і захищеному від атмосферної вологості просторі з метою запобігання збільшенню вологості біомаси.

Список літератури

1. Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием. Часть 1. Общая влага. Стандартный метод: ГОСТ Р 54186–2010 (ЕН 14774-1:2009). – [Введен 2012-07-01]. – М.: Стандартинформ, 2012. – 8 с.
2. Бойко Е.А. Комплексное исследование и учет реакционной способности энергетических углей в практике моделирования и совершенствования тепло-

технологических процессов и оборудования: Автореф. дис. на соискание уч. степени доктора техн. наук / Е.А. Бойко. – Красноярск, 2008. – 44 с.

3. Гелетука Г.Г. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні / Г.Г. Гелетука, Т.А. Желєзна. //Аналітична записка БАУ №7. – К, 2014. – 31 с. [Електронне видання]. – Режим доступу: <http://www.uabio.org/img/files/docs/Position-paper-uabio-7-ru.pdf>

4. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива / Б.В. Канторович. – М.: Металлургиздат, 1960. – 355 с.

5. Льюис Б. Горение, пламя и взрывы в газах / Б. Льюис., Г. Эльбе. . – М.: Мир, 1968. – 592 с.

6. Математическая теория горения и взрыва / [Зельдович Я.Б., Барренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М]. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

7. Хзмалян Д..М. Теория горения и топочные устройства / Д..М. Хзмалян, Я.А. Каган. – М.: Энергия, 1976. – 486 с.

Проанализированы характеристики процесса горения соломы в зависимости от ее влажности. Показано, что при увеличении влажности биомассы характеристики процесса горения существенно ухудшаются.

Биомасса, солома, температура горения, теплота сгорания, влажность топлива.

The characteristics of the combustion process of straw depending on its moisture content are analyzed. It is shown that in the case of increasing the fuel moisture characteristics of biomass combustion process cjme significantly worse.

Biomass, straw, combustion temperature, combustion heat, fuel moisture.

УДК 621.314

ПЛАНУВАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНІКИ ЗАПАСНИМИ ЧАСТИНАМИ

О.І. Щепотьєв, кандидат технічних наук

А.В. Жильцов, доктор технічних наук

В.В. Васюк, аспірант*

Розроблено методику планування і забезпечення запасними частинами при експлуатації технічних об'єктів.

Надійність, планування, експлуатація, показники ефективності, резервування.

Успішне вирішення задач щодо забезпечення своєчасного відновлення техніки можливе лише за умову своєчасної заміни агрегатів, які відмовили або виробили ресурс у процесі експлуатації.

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

технологических процессов и оборудования: Автореф. дис. на соискание уч. степени доктора техн. наук / Е.А. Бойко. – Красноярск, 2008. – 44 с.

3. Гелетука Г.Г. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні / Г.Г. Гелетука, Т.А. Желєзна. //Аналітична записка БАУ №7. – К, 2014. – 31 с. [Електронне видання]. – Режим доступу: <http://www.uabio.org/img/files/docs/Position-paper-uabio-7-ru.pdf>

4. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива / Б.В. Канторович. – М.: Металлургиздат, 1960. – 355 с.

5. Льюис Б. Горение, пламя и взрывы в газах / Б. Льюис., Г. Эльбе. . – М.: Мир, 1968. – 592 с.

6. Математическая теория горения и взрыва / [Зельдович Я.Б., Барренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М]. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

7. Хзмалян Д..М. Теория горения и топочные устройства / Д..М. Хзмалян, Я.А. Каган. – М.: Энергия, 1976. – 486 с.

Проанализированы характеристики процесса горения соломы в зависимости от ее влажности. Показано, что при увеличении влажности биомассы характеристики процесса горения существенно ухудшаются.

Биомасса, солома, температура горения, теплота сгорания, влажность топлива.

The characteristics of the combustion process of straw depending on its moisture content are analyzed. It is shown that in the case of increasing the fuel moisture characteristics of biomass combustion process cjme significantly worse.

Biomass, straw, combustion temperature, combustion heat, fuel moisture.

УДК 621.314

ПЛАНУВАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНІКИ ЗАПАСНИМИ ЧАСТИНАМИ

О.І. Щепотьєв, кандидат технічних наук

А.В. Жильцов, доктор технічних наук

В.В. Васюк, аспірант*

Розроблено методику планування і забезпечення запасними частинами при експлуатації технічних об'єктів.

Надійність, планування, експлуатація, показники ефективності, резервування.

Успішне вирішення задач щодо забезпечення своєчасного відновлення техніки можливе лише за умову своєчасної заміни агрегатів, які відмовили або виробили ресурс у процесі експлуатації.

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

Для забезпечення своєчасної заміни на складах різних рівнів створюються комплекси запасних частин (ЗЧ).

Номенклатура ЗЧ повинна відображати характер типових відмов, які виникають в об'єкті, а їх кількість відповідати потребі, виходячи з термінів служби і методів ремонту. У зв'язку з цим конструкція об'єкта повинна відповідати вимогам швидкознімності і швидкозамінності агрегатів. У різних галузях машинобудування створюються спеціалізовані підприємства для виготовлення ЗЧ, причому це виробництво займає звичайно суттєву частину у загальному обсязі продукції.

Планування випуску ЗЧ є дуже складною задачею.

По-перше, встановлення номенклатури ЗЧ на стадії проектування або для нової машини за відсутності досвіду її експлуатації не завжди можливо. Відсутність даних щодо швидкості зношування і термінів служби, недостатня інформація про експлуатацію прототипів, або аналогічних виробів, неточність методів розрахунку термінів служби – все це призводить до того, що конструктор має можливість встановити перелік деталей, що швидко зношуються, лише з грубим наближенням.

По-друге, при визначенні потреб у ЗЧ на весь період експлуатації машини не завжди відомі усі спектри передбачуваних експлуатаційних навантажень і умов роботи та ремонту машин.

Кількість необхідних ЗЧ при експлуатації парку машин можна оцінити двома основними способами:

- на базі статистичних даних із сфери експлуатації прототипів, що дає достатньо точну картину лише для стійких у конструктивному відношенні моделей машин і при постійному аналізі тенденції у потребі ЗЧ;
- методами розрахунку у поєднанні з статистичним моделюванням.

Технічне обслуговування і ремонт техніки вимагають, з одного боку, децентралізації постачання запасних частин, з другого – підтримки на складах експлуатаційних підприємств рівня запасів агрегатів не нижче доцільної норми, що забезпечує потрібну готовність. Таким чином, важливість ЗЧ визначається необхідністю забезпечення готовності техніки, а також можливістю зниження економічних витрат у процесі її експлуатації.

Мета досліджень – розробка методики планування і забезпечення запасними частинами при експлуатації технічних об'єктів.

Матеріали та методика досліджень. Задача забезпечення вирішується достатньо складною ешелонованою системою з взаємопов'язаними ланками і різноманітними функціями. Модель системи забезпечення ЗЧ підприємств, у яких здійснюється експлуатація техніки, може бути подана у вигляді многорівневої, ієрархічної системи з простим підпорядкуванням $\{S\}$.

Під ефективністю функціонування розуміють здатність системи забезпечення задовольняти потреби експлуатаційних підприємств (ЕП), які забезпечують об'єкти техніки запасними частинами. Найчастіше як показники ефективності застосовуються такі:

- допустимий час простою об'єктів постачання в непрацездатному стані через відсутність запасних частин;

- значення комплексних показників надійності у вигляді коефіцієнта оперативної готовності чи коефіцієнта технічного використання техніки та ін.

Основну вимогу ставлять до оцінки якості рішення задачі забезпечення функції ризику $F\{Q, Q^*\}$, яка визначається співвідношенням між дійсною Q і запланованою Q^* вимогами на запчастини. Критерій оптимальності для системи забезпечення можна подати у вигляді мінімуму математичного очікування середнього ризику [2]

$$M[F\{Q, Q^*\}] = \min.$$

Конкретна форма цього критерію може бути визначена, якщо задані штраф за дефіцит $P(q)$ при незадоволенні попиту на q одиниць предметів постачання і штраф $h(q)$ за збереження за плановий період q одиниць, які залишилися після задоволення усіх замовлень.

При цьому функція середнього ризику має вигляд [1]:

$$F(x+z) = \begin{cases} \int_0^{x+z} h(x+z-v)\gamma(v)dv + \int_{x+z}^{\infty} (v-x-z)\gamma(v)dv, & \text{при } x+z > 0 \\ \int_0^{\infty} P(v-x-z)dv, & \text{при } x+z \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

де x – кількість запчастин, які зберігаються на складі з початку планового періоду; z – кількість запчастин, які надходять на склад за плановий період; $\gamma(v)$ – щільність розподілу ймовірностей v замовлень ЗЧ.

Вплив системи забезпечення ЗЧ на коефіцієнт готовності об'єктів, які обслуговуються, характеризує середній час простою об'єктів, що ремонтуються через відсутність ЗЧ.

Основним показником оцінки ефективності системи забезпечення є ймовірність того, що простоїв N об'єктів через систему забезпечення на інтервалі T не буде:

$$P_0(T) = P\{\tau = 0 / N, T\} \quad \{\tau = 0 / N, T\}. \quad (2)$$

Методика планування суттєво залежить від структури системи. Розглянемо випадок, коли у системі забезпечення склади є тільки на об'єктах нижнього рівня, тобто при кожному ЕП. В органі верхнього рівня S_0 складу немає, він здійснює тільки функції планування та управління.

Постачання запчастин на склад ЕП здійснюється на початку планового періоду T . Задача зводиться до формування замовлення на потрібну кількість запчастин і організації постачання запчастин зі складу вищестоящої організації чи від промисловості на склади ЕП на початку планового періоду. Відновлення зводиться до заміни елемента (об'єкта), що відмовив, новим, який отримано зі складу. Тому модель ЕП буде подана ланцюгом з N одиночно з'єднаних однакових «робочих» елементів із функцією надійності $P(t)$. Ці елементи знаходяться у робочому режимі, а можливі їх відмови є незалежними.

Відповідно склад при ЕП уявляється у вигляді K таких елементів, які знаходяться у режимі зберігання. Кожен із цих елементів може миттєво замінити будь-який із робочих у випадку його відмови. Відмова цієї системи буде тільки у тому випадку, якщо втрачений запас, і після цього відмовив один із робочих елементів, тобто відмова системи відповідає $K+1$ і більш відмов елементів. Необхідно, регулюючи запас K , забезпечити ймовірність не появи відмов елементів у плановому періоді T не менше заданої P_3 :

$$P(T) \geq P_3.$$

Неважко бачити, що ця задача аналогічна задачі про оцінку функції надійності системи з ненавантаженим ковзним резервом. Для одержання її рішення достатньо конкретизувати функцію надійності $P(T)$ і будемо вважати її експоненціальною на інтервалі планування T :

$$P(T) = \exp(-\lambda t),$$

де λ – інтенсивність відмов.

$$P(t) = \exp(-N\lambda t) \sum_{i=0}^N \frac{(N\lambda t)^i}{i!}. \quad (3)$$

Тому умова безвідмовності системи забезпечення має вигляд

$$P(t) = \exp(-N\lambda t) \sum_{i=0}^N \frac{(N\lambda t)^i}{i!} \geq P_3(T),$$

де $P(t)$ – ймовірність забезпечення запчастинами на інтервалі T ; $P_3(T)$ – допустимий рівень ймовірності забезпечення, який визначається вищою інстанцією.

Для визначення мінімальної кількості запчастин K^* після перетворень отримуємо

$$\sum_{i=0}^K \frac{(N\lambda t)^i}{i!} \geq P_3 / \exp(-N\lambda t). \quad (4)$$

Підставляючи значення $i = 0, 1, 2, \dots$, знайдемо таке $i = K^*$, при якому рівняння (4) уперше задовольняється. Значення K^* означає оптимальну кількість запчастин, котрі необхідно поставити до ЕП на плановий період.

Наприклад, необхідно визначити кількість запасних елементів N для того, щоб ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ системи з одного і запасних елементів з інтенсивністю відмов $\lambda = 0,5$ 1/год. була рівною 0,95 при $t = 8$ год.

Рішення. Визначаємо $a = N\lambda t = 1 \cdot 0,5 \cdot 8 = 4$. Зі стопчика табл. 8 [3], який відповідає $a = 4$, підсумовуємо усі ймовірності, починаючи з останньої доти, поки сума не становитиме $1 - 0,95 = 0,05$.

Отримуємо:

$$0,0001 + 0,0002 + 0,0006 + 0,0019 + 0,0053 + 0,0132 = 0,0213 < 0,05.$$

Таким чином, вибираємо кількість запасних частин $N = 6$. При $N = 7$ підсумовування дає число більше, ніж 0,05.

Можна й іншим шляхом спланувати кількість ЗЧ на плановий період за таких умов:

$N = 50$ – кількість об'єктів в ЕП;

$P_3 = 0,9$ – задана припустима ймовірність забезпечення;

$T = 13000$ год – напрацювання ЕП, встановлене на плановий період.

При цьому інтенсивність відмов ЗЧ цього типу за попередній період експлуатації становитиме:

$$\lambda = 1,03 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год.}$$

Рішення. Визначимо величину змінної a :

$$a = N\lambda t = 50 \cdot 1,03 \cdot 10^{-4} \cdot 13000 = 66,95 = 67.$$

У цьому разі маємо вираз:

$$\sum_{i=0}^K \frac{67^i}{i!} = \frac{0,9}{\exp(-67)}.$$

Підставляючи у ліву частину цього виразу значення $i = 0, 1, 2, \dots$, отримаємо таке $i = K$, при якому рівняння задовольняється. В результаті одержимо величину $K = 78$.

Для випадку, коли об'єкт складається з r однакових елементів, функція надійності описується виразом:

$$P_0(t) = \exp\{-r\lambda t\},$$

а ймовірність безвідмовної роботи ЕП, що включає N об'єктів, які експлуатуються, і K запасних частин, виразом:

$$P(t) = \exp[-Nr\lambda T] \sum_{i=0}^K \frac{(Nr\lambda t)^i}{i!}. \quad (5)$$

Якщо планування запчастин здійснюється для декількох ЄП _{m} , $\overline{m} = \overline{1, M}$ при заданих для кожного з підприємств вимогах щодо ймовірності забезпечення $P_{3m}, \overline{m} = \overline{1, M}$, то мінімально необхідну кількість K_m^* запчастин для конктерного ЕП _{m} слід визначати виразом:

$$\exp(-N_m \lambda T) \sum_{i=0}^{K_m} \frac{(N_m \lambda t)^i}{i!} \geq P_{3m}.$$

Якщо підсумувати K_m^* для усіх ЕП, знайдемо потрібну кількість запчастин для всіх ЕП _{m} , $\overline{m} = \overline{1, M}$ на плановий період постачання запчастин

$$K_m^* = \sum_{m=1}^M K_m^*.$$

У випадку, коли відсутні локальні склади для кожного ЕП, постачання запчастин для заміни елементів, які відмовили, здійснюється безпосередньо з єдиного центрального складу, який знаходиться на другому рівні. В цьому випадку можна вважати, що всі M підприємства об'єднуються в загальне підприємство з кількістю робочих елементів

$$N_{\Sigma} = \sum_{m=1}^M N_m.$$

Для об'єднаного ЕП мінімально припустимий рівень ймовірності забезпечення може бути визначений виразом:

$$P_{\partial\Sigma} = \frac{\sum_{m=1}^M N_m P_{\partial m}}{\sum_{m=1}^M N_m}, \quad (6)$$

де $P_{\partial m}$ – задана ймовірність забезпечення m -го підприємства, $m = \overline{1, M}$.

Якісне порівняння двох наведених стратегій (рисунок) можна провести на базі аналогії моделей, що розглядаються, з моделями теорії резервування.

У цьому випадку перехід до другої (з центральним складом) структури забезпечення повністю аналогічний збільшенню масштабу (кратності) резервування ненавантаженого ковшного резервування. Тому справедливо співвідношення

$$K_M = \sum_{i=1}^M K_m^* \succ K_{\Sigma}^*,$$

де K_{Σ}^* – потрібна кількість запчастин для об'єднаного ЕП.

Аналіз отриманих залежностей показує, що система забезпечення з центральним складом дає суттєву економію щодо кількості необхідних запчастин, причому ця економія значно зростає з підвищенням вимог щодо ймовірності забезпечення.

У випадку постачань із складів нижчого рівня необхідно забезпечити разову максимальну за обсягом поставку у всі ЕП на весь плановий період. Тому витрати на купівлю запчастин у цьому випадку є максимальними, а на транспортування – мінімальними.

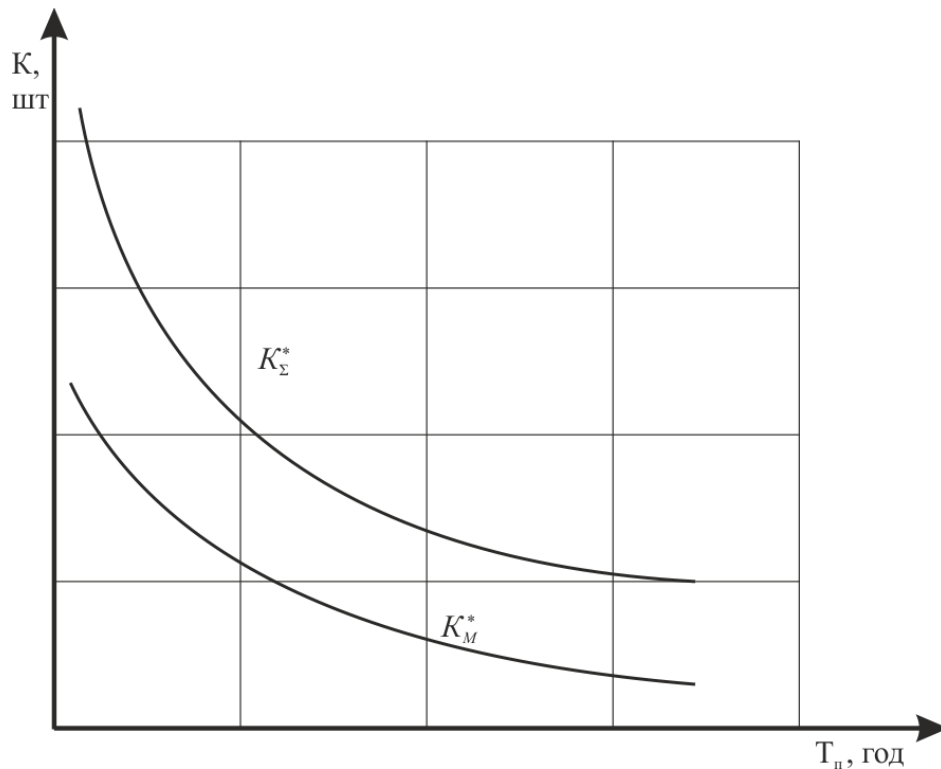
У випадку безпосередніх постачань з центрального складу витрати на купівлю запчастин є мінімальними, але в значній мірі зростають транспортні витрати.

Процес подібних розрахунків є дуже трудомістким. Для спрощення процедури цих розрахунків застосовують заздалегідь розроблені таблиці або номограми. Крім того, використовують спрощений метод визначення кількості запасних частин, при якому середня норма витрат запасних частин на один об'єкт у рік (8760 год.) визначається з виразу:

$$n_{зсп} = \frac{8760 K_{\epsilon}}{t_{псп}}.$$

де K_{ϵ} – коефіцієнт використання об'єкта; $t_{псп}$ – середній ресурс агрегату.

Звичайно використовується заплановане сумарне напруження протягом року t_{Σ} .



Залежність кількості запчастин від часу простою T_{Π} .

Тоді

$$n_{зср} = \frac{t_{\Sigma}}{t_{рср}}.$$

Для підтримання надійності систем кількість запасних частин залежно від терміну експлуатації змінюється і може бути визначена за емпіричною формулою [4]:

$$n_{зм} = \frac{n_{зср} N}{C} (1 - e^{-Bm}),$$

де m – поточний рік експлуатації об'єкта, $m = 1, 2, 3, \dots$; C – коефіцієнт скорочення ремонтного циклу об'єкта, $c = 0,8 \dots 0,9$; B – емпірична величина, яка залежить від $n_{зср}$.

Для $n_{зср} = 0,005 \dots 0,095$: $B = 76,315 n_{зср}^{3,29}$;

для $n_{зср} = 0,096 \dots 1,0$: $B = 0,38 n_{зср}^{1,038}$.

Результати досліджень. Приклад 1. Визначити кількість запасних частин для першого ($m=1$) і третього ($m=3$) років експлуатації $N = 40$ об'єктів при $n_{зср} = 0,5$; $C = 0,8$.

Рішення. Для першого року експлуатації:

$$n_{з1} = \frac{0,5 \cdot 40}{0,8} (1 - e^{-0,38 \cdot 0,5^{-1,038} \cdot 1}) = 4,2.$$

Необхідно прийняти $n_{з1} = 5$.

Для третього року експлуатації:

$$n_{33} = \frac{0,5 \cdot 40}{0,8} (1 - e^{-0,38 \cdot 0,5^{-1,038} \cdot 3}) = 10,65 \approx 11.$$

Приклад 2. Визначити мінімальну кількість Z_{min} запчастин на складі зворотних клапанів, для яких норма витрат на 100 год роботи об'єктів $N_e = 0,05$. Плановий рік напрацювання $T = 3500$ год, середній час доставки із складів $\tau = 5$ діб, кількість номенклатур $M = 200$, коефіцієнт готовності запасів складу $K = 0,8$.

Рішення. Визначаємо середні витрати зворотних клапанів за рік:

$$a = 0,01 N_e T = 0,01 \cdot 0,05 \cdot 3500 = 1,75 \approx 2 \text{ од/рік.}$$

Зі спеціальної таблиці при $a = 2$ і $\tau = 5$ для $K = 0,8$ визначаємо $Z_{min} = 1$.

Таким чином, використовувати стратегію забезпечення з центральним складом доцільно тільки для важливих об'єктів, що дорого коштують, і об'єктів, у яких рідко виникають відмови, коли витрати на транспортування цілком компенсуються економією на купівлю запчастин.

Висновки

Використання наведених методик дозволяє визначити необхідну кількість запасних частин, що обумовить виключення можливих простоїв технічних об'єктів через відсутність запасних частин. Таким чином, вирішується задача забезпечення заданого рівня технічної готовності об'єктів та мінімізації витрат на їх експлуатацію.

Список літератури

1. Голушко И.М. Основы моделирования и автоматизации управления тылом / И.М. Голушко, Н.В. Варламов. – М.: Воениздат, 1982. – 237 с.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций / Е.С. Вентцель. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
4. Мушик Э. Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер. – М.: Мир, 1990. – 206 с.

Разработана методика планирования и обеспечения запасными частями при эксплуатации технических объектов.

Надежность, планирование, эксплуатация, показатели эффективности, резервирование.

Developed a method of planning and provision of spare parts in the operation of technical facilities.

Reliability, planning, operation, performance, redundancy.

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИЙ ВІДГУК МАЛИХ ЧАСТИНОК НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

*О.Ю. Грищук, Н.Г. Шкода, кандидати фізико-математичних наук
Інститут хімії поверхні НАН України
С.В. Стеценко, старший викладач
Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

Досліджено вплив електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на взаємодію з малими частинками (МЧ) кульової форми і дисперсними системами (ДС) на їх основі на межі розділу фаз. Узагальнено застосування теорії Максвелла-Гарнетта (МГ) та наближення ефективного середовища для ДС з відповідними включеннями. Проаналізовано умови збудження і поширення поверхневих електромагнітних мод (ПЕМ) у ДС під дією ЕМВ та вплив міжфазних границь розділу на оптичні спектри поглинання і розсіяння.

Електромагнітне випромінювання, дисперсна система, електродинамічний відгук, поверхневі плазмони.

У роботі наведено результати досліджень відгуку двошарових МЧ на дію електромагнітного поля з точки зору їх можливого практичного використання. Отримати практично повну інформацію про відгук частинок на дію ЕМВ дають частотні залежності діелектричної проникності. Показано, що в таких частинках екстремуми в частотних залежностях проникності пов'язані з колективними електронними збудженнями на міжфазних границях.

Мета досліджень – розробка теоретичної методики розрахунку процесів поглинання електромагнітного випромінювання дисперсними системами на основі двошарових частинок сферичної форми із врахуванням у них поверхневих збуджень.

Матеріали та методика досліджень. Вивчення процесів взаємодії малих частинок у різноманітних дисперсних системах під дією ЕМВ зводиться до використання діелектричного підходу. Суть останнього полягає у застосуванні діелектричної функції $\varepsilon(\omega) = n^2 + ik^2$ (n – показник заломлення, k – коефіцієнт поглинання), яка описує властивості малих частинок та дисперсних систем на їх основі і водночас визначає їх відгук на електромагнітне випромінювання, враховуючи форму, будову та структуру.

Теоретично ефективну діелектричну проникність кульових включень визначають у наближенні Максвелла-Гарнетта, яке дає коректні результати при невисоких значеннях ступеня заповнення, коли $f \leq 1[1,10]$:

$$\frac{\tilde{\varepsilon} - \varepsilon_m}{\tilde{\varepsilon} + 2\varepsilon_m} = f\alpha / a^3. \quad (1)$$

Порушення коректності виразу при $f > 0,1$ обумовлено, переважно, колективними ефектами, які виникають при зближенні частинок. Зазначимо, що формула (1) справедлива при однорідному розподілі частинок в ансамблі [1].

В електростатичному наближенні задача взаємодії ЕМВ з малими частинками зводиться до розрахунку її тензора поляризованості [2, 11].

1. Поляризованість двошарової кульової малої частинки

Для знаходження поляризованості МЧ, вкритої оболонкою, та поміщеної в зовнішнє електричне поле, перепишемо вираз, який було отримано в [1], так [2, 5]:

$$\alpha = 4\pi a^3 \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_m)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_m + 2\varepsilon_2)v}{(\varepsilon_2 + 2\varepsilon_m)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2) + 2(\varepsilon_2 - \varepsilon_m)(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)v}, \quad (2)$$

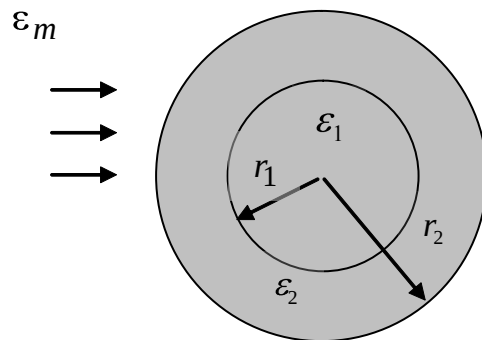
де параметр $v = r_2^3 / r_1^3$ визначає об'ємну частку ядра в суцільній кулі.

Відомо, що спектр ПП можна знаходити з умови зростання величини поляризованості [1]. Для цього потрібно, щоб знаменник у виразі (2) прямував до нуля за умови відсутності згасання:

$$(\varepsilon_2 + 2\varepsilon_m)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2) + 2v(\varepsilon_2 - \varepsilon_m)(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = 0. \quad (3)$$

При постановці задачі було розглянуто такий випадок будови частинок, коли ядро МЧ і навколишнє середовище – звичайні діелектрики, а матеріал оболонки – напівпровідник [6].

Відносні діелектричні проникності ядра, оболонки та навколишнього середовища позначено через $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_m$ відповідно, а радіуси внутрішньої і зовнішньої кулі через r_1, r_2 (рисунок).



Двошарова МЧ

Утворена ДС, як і будь-яка неоднорідна система, має поверхні розділу, що розділяють область з різними електродинамічними властивостями. При внесенні таких неоднорідних матеріалів в електричне поле вільні електрони або іони, що знаходяться в напівпровідних включеннях, починають переміщуватися в межах кожного включення, яке набуває індукованого дипольного моменту і поводить себе подібно гігантській поляризованій молекулі. Неоднорідність структури системи призводить до

обмеження переміщення зарядів, які, будучи вільними в межах однієї частинки, відносно всього об'єму виявляються зв'язаними.

У прийнятій моделі задача з визначення ефективної діелектричної проникності ДС зводилась до знаходження поляризованості такої МЧ. Це завдання, в свою чергу, пов'язане з розв'язанням задачі теорії потенціалу.

Припускали, що мала двошарова частинка знаходилась в діелектричному оточенні під дією зовнішнього електричного поля, напруженість якого гармонічно змінюється у часі $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r})e^{i\omega t}$, де ω – частота, Гц, t – час, с. Саме ж поле описується потенціалом $\phi_e = \phi_e(r, \theta, \varphi)$.

Зовнішнє електричне поле в загальному випадку вважається просторово-неоднорідним. Зв'яжемо з центром кулі декартову (x, y, z) і сферичну системи координат (r, φ, θ) . Концентрації носіїв обох знаків у напівпровіднику позначимо через n_+ і n_- , а їх рухливості – через u_+ і u_- . За відсутності електричного поля вважається, що $n_+ = n_- = n$. Нехай потенціали електричних полів у ядрі $\phi_1 = \phi_1(r, \theta)$ і навколишньому середовищі $\phi_m = \phi_m(r, \theta)$ задовольняють рівнянню Лапласа [1].

Розв'язок рівняння Лапласа для ядра, обмеженого в нулі, і розв'язок для оболонки, яка згасає на нескінченності, мають відповідно вигляд:

$$\phi_1(r, \theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l B_{lm}^{(1)} r^l Y_l^{(m)}(\theta, \varphi), \quad (4)$$

$$\phi_m(r, \theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \frac{A_{lm}^{(3)}}{r^{l+1}} Y_l^{(m)}(\theta, \varphi), \quad (5)$$

де $B_{lm}^{(1)}$, $A_{lm}^{(3)}$ – невідомі коефіцієнти розкладів, $Y_l^{(m)}(\theta, \varphi)$ – сферичні функції [7], які вважаються нормованими.

1.1. Моделювання впливу дифузії носіїв у напівпровідниковій оболонці на поляризованість двошарової частинки

Розглянемо модельну ситуацію, при якій вільні носії могли б посилити поляризованість і впливати на діелектричну проникність на міжфазній границі та частоту колективних збуджень. Запишемо рівняння нерозривності для носіїв в напівпровідниковій оболонці [8]:

$$\frac{\partial n_+}{\partial t} = -\text{div} \vec{j}_+ = \text{div}(n_+ u_+ \text{grad} U + D_+ \text{grad} n_+), \quad (6)$$

$$\frac{\partial n_-}{\partial t} = -\text{div} \vec{j}_- = \text{div}(n_- u_- \text{grad} U + D_- \text{grad} n_-),$$

де $\vec{j}_+$, $\vec{j}_-$ – потоки; $U = \phi_2$ – потенціал в напівпровідниковій оболонці; D_+ , D_- – коефіцієнти дифузії носіїв.

Для спрощення задачі припускали, що коефіцієнти дифузії однакові $D_+ = D_- = D$. У силу рівняння Ейнштейна маємо:

$$eD = \mu kT, \quad (7)$$

де e – заряд носіїв; μ – концентрація носіїв, які переносять заряд; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура.

Для низьких рівнів напруженості, як і в [8], запишемо:

$$n_+(\vec{r}, t) = n + \mu_+(\vec{r}) \exp(i\omega t); \quad n_-(\vec{r}, t) = n + \mu_-(\vec{r}) \exp(i\omega t), \quad (8)$$

де $\mu_+(\vec{r})$, $\mu_-(\vec{r})$ – концентрації носіїв, які беруть участь у переносі зарядів.

При цьому вважається, що справджуються сильні нерівності:

$$|\mu_+| \ll n, \quad |\mu_-| \ll n. \quad (9)$$

Із урахуванням виразу (7) і представлень концентрацій носіїв (8) рівняння нерозривності в гармонічному полі приймають вигляд:

$$\frac{i\omega}{D} \mu_+ = \frac{e}{kT} \operatorname{div}(n + \mu_+) \operatorname{grad} U + \operatorname{div} \operatorname{grad}(n + \mu_+); \quad (10)$$

$$\frac{i\omega}{D} \mu_- = \frac{e}{kT} \operatorname{div}(n + \mu_-) \operatorname{grad} U + \operatorname{div} \operatorname{grad}(n + \mu_-). \quad (11)$$

Рівняння (10), (11) – нелінійні, але за умови виконання нерівностей (9) вони допускають лінеаризацію, в результаті отримаємо:

$$\frac{i\omega}{D} \mu_+ = \frac{ne}{kT} \Delta U + \Delta \mu_+; \quad \frac{i\omega}{D} \mu_- = \frac{ne}{kT} \Delta U + \Delta \mu_-. \quad (12)$$

За умови наявності зарядів потенціал в ядрі повинен задовольняти рівнянню Пуассона:

$$\Delta U = -\frac{4\pi e}{\varepsilon_0 \varepsilon_2} \mu, \quad \mu = \mu_+ - \mu_-, \quad (13)$$

де ε_0 – діелектрична стала.

Отримана система рівнянь (12), (13) – замкнена відносно функцій U і μ . Підставивши вираз для ΔU з рівняння (13) до рівнянь (12), одержимо для невідомої функції $\mu = \mu_+ - \mu_-$ рівняння:

$$\Delta \mu = \gamma^2 \mu, \quad (14)$$

де $\gamma^2 = \kappa^2 + i\omega / D$; $\kappa^2 = 8\pi e^2 / (\varepsilon_0 \varepsilon_2 kT)$.

Розв'язок рівняння (14), що описує потенціал у напівпровідниковій оболонці, можна подати у вигляді:

$$\mu(\rho, \theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \left[C_{lm}^{(1)} i_l(\gamma r) + C_{lm}^{(2)} k_l(\gamma r) \right] \tilde{Y}_l^{(m)}(\theta, \varphi), \quad (15)$$

де $C_{lm}^{(1)}$, $C_{lm}^{(2)}$ – довільні сталі; $i_l(\gamma r)$, $k_l(\gamma r)$ – модифіковані сферичні функції Бесселя комплексного аргументу першого і третього роду відповідно [7].

Розв'язок рівняння (13) – це сума загального розв'язку однорідного рівняння U_{gen} і частинного розв'язку неоднорідного рівняння U_{par} . Загальний розв'язок запишеться у вигляді:

$$U_{gen} = \sum_{l=0}^{\infty} \left(\frac{A_{lm}^{(2)}}{r^{l+1}} + B_{lm}^{(2)} r^l \right) Y_l^{(m)}(\theta, \varphi). \quad (16)$$

Із врахуванням проведених вище розрахунків отримаємо розклад для потенціалу в напівпровідниковій оболонці двошарової МЧ:

$$\begin{aligned} \phi_2 = U(r, \theta, \varphi) = & \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \left(\frac{A_{lm}^{(2)}}{r^{l+1}} + B_{lm}^{(2)} r^l \right) Y_l^{(m)}(\theta, \varphi) - \\ & - \frac{4\pi e}{\varepsilon_0 \varepsilon_2 \gamma^2} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \left(C_{lm}^{(1)} i_l(\gamma r) + C_{lm}^{(2)} k_l(\gamma r) \right) \tilde{Y}_l^{(m)}(\theta, \varphi) \end{aligned} \quad (17)$$

Розв'язки диференціальних рівнянь побудовані, тепер задача зводиться до того, щоб зв'язати внутрішнє поле в двошаровій частинці з зовнішнім полем, іншими словами, до визначення сталих $B_{lm}^{(1)}, A_{lm}^{(2)}, B_{lm}^{(2)}, A_{lm}^{(3)}, C_{lm}^{(1)}, C_{lm}^{(2)}$. Для їх знаходження необхідно розв'язати систему з чотирьох рівнянь для потенціалів, які задовольняють рівнянню Лапласа з граничними умовами:

$$\phi_1(r_1) = \phi_2(r_1); \quad \phi_2(r_2) = \phi_3(r_2) + \phi_e(r_2) \quad (18)$$

$$\varepsilon_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \varepsilon_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial r} \Big|_{r=r_1}; \quad \varepsilon_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \varepsilon_m \frac{\partial \phi_3}{\partial r} \Big|_{r=r_2} + \varepsilon_m \frac{\partial \phi_e}{\partial r} \Big|_{r=r_2}. \quad (19)$$

Ще два рівняння дають умови обертання на нуль нормальних компонент потоків носіїв на межах кульового шару [9]:

$$\left(\frac{\partial \phi_2}{\partial r} + \frac{kT}{2en} \frac{\partial \mu}{\partial r} \right)_{r=r_1} = 0; \quad \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial r} + \frac{kT}{2en} \frac{\partial \mu}{\partial r} \right)_{r=r_2} = 0. \quad (20)$$

Для таких полів у [2] отримано сім'ю незалежних алгебраїчних систем рівнянь шостого порядку для визначення l -польної поляризованості двошарової МЧ.

Практично важливим є випадок, коли поле, що діє на МЧ, на нескінченно великій відстані від МЧ переходить в однорідне, тобто

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \rightarrow \mathbf{E}_0 \text{ при } r \rightarrow \infty. \quad (21)$$

У цьому випадку задача має осьову симетрію, розв'язки не залежать від координати φ , і сферичні функції перетворюються на поліноми Лежандра [7]. Більш того, у зв'язку з тим, що потенціал зовнішнього поля має вигляд $\phi_e = E_0 r \cos \theta + \text{const}$, то в розкладах шуканих потенціалів слід покласти $l=1, m=0$. Отже, відповідно до асимптотичної умови $B_3 = -E_0$, і будемо мати такий вигляд розв'язків:

$$\phi_1(r, \theta) = B_1 r \cos \theta, \quad \phi_3(r, \theta) = \left(\frac{A_3}{r^2} - E_0 r \right) \cos \theta. \quad (22)$$

Із використанням формул для модифікованих сферичних функцій Бесселя першого порядку [7] розв'язок(15) набуває вигляду:

$$\mu(r, \theta) = \left[C_1 e^{\gamma r} \left(1 - \frac{1}{\gamma r}\right) + C_2 e^{-\gamma r} \left(1 + \frac{1}{\gamma r}\right) \right] \frac{\cos \theta}{\gamma r}, \quad (23)$$

де C_1, C_2 – довільні сталі, що збігаються з результатами, наведеними в [8]. Отже, має місце таке рівняння для потенціалу в напівпровідниковій оболонці:

$$\phi_2 = U(r, \theta) = \left(\frac{A_2}{r^2} + B_2 r \right) \cos \theta - \frac{4\pi e}{\varepsilon_2 \gamma^2} \left[C_1 e^{\gamma r} \left(1 - \frac{1}{\gamma r}\right) + C_2 e^{-\gamma r} \left(1 + \frac{1}{\gamma r}\right) \right] \frac{\cos \theta}{\gamma r}. \quad (24)$$

Розв'язки диференціальних рівнянь побудовані, і задача зводиться до визначення сталих $C_1, C_2, B_1, B_2, A_2, A_3$. Шляхом громіздких та численних математичних перетворень було виведено рівняння для них. Наведемо вираз для сталої A_3 , яка дає зменшений в ε_m разів дипольний момент двошарової МЧ:

$$A_3 = r_2^3 \frac{c_{21} r_2 - \varepsilon_m c_{11}}{c_{21} r_2 + 2\varepsilon_m c_{11}} E_0.$$

і дозволяє визначати її поляризованість [3]:

$$\alpha = \varepsilon_m A_3. \quad (25)$$

Після знаходження поляризованості двошарової кульової МЧ (діелектричне ядро – напівпровідникова оболонка), знайдено значення $\tilde{\varepsilon}$ для ДС з відповідними включеннями, використовуючи (1).

2. Чисельні результати досліджень

Наведемо результати розрахунків, виконаних для двошарових МЧ, що складаються із діелектричного ядра і напівпровідникової оболонки. Вважатимемо, що частинки розташовані у вакуумі. Дані про діелектричні характеристики напівпровідника із врахуванням залежності від частоти приймаємо згідно з експериментальними результатами, наведеними в [8], а для діелектрика вважаємо, що дійсна та уявна частини діелектричної проникності не залежать від частоти.

Розраховуються частотні залежності $\text{Im} \tilde{\varepsilon}$ та $\text{Re} \tilde{\varepsilon}$ ДС із врахуванням диполь-дипольної взаємодії двошарових кульових включень при різних значеннях фактора заповнення $f = 0,1$ і $f = 0,2$.

Розрахунки ефективної діелектричної проникності ДС із двошаровими кульовими МЧ (діелектричне ядро – напівпровідникова оболонка) здійснені за формулами Максвелла–Гарнетта (1) і Максвелла [1] для двох значень діелектричної проникності напівпровідникової оболонки $\varepsilon_2 = 10$ і $\varepsilon_2 = 20$ та для трьох значень радіуса ядра МЧ. Було проведено чисельне моделювання для випадку однакових двошарових включень із радіусом ядра r_1 і радіусом оболонки r_2 відповідно.

При розрахунках приймали також, що коефіцієнт дифузії [6] $D = 25 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$, концентрація носіїв $n = 10^{14} \text{ м}^{-3}$, діелектрична проникність ядра $\varepsilon_1 = 3$, зовнішній радіус кульових включень $r_2 = 50 \text{ нм}$ для всіх наведених випадків. Значення резонансних частот, які відповідають різним значен-

ням радіусів ядра при постійному значенні $r_2 = 50 \text{ нм}$ при вказаних вище параметрах задачі, обчислені за наближенням Максвелла-Гарнетта, наведено в таблиці.

Резонансні частоти в МДС з двошаровими кульовими включеннями (діелектричне ядро – напівпровідникова оболонка).

r_1/r_2	$\varepsilon_2 = 10$		$\varepsilon_2 = 20$	
	$\omega_1, \text{ Гц}$	$\omega_2, \text{ Гц}$	$\omega_1, \text{ Гц}$	$\omega_2, \text{ Гц}$
0,9	$3,98 \cdot 10^{11}$	$2,00 \cdot 10^{14}$	$3,98 \cdot 10^{11}$	$2,51 \cdot 10^{14}$
0,8	$6,31 \cdot 10^{11}$	$7,94 \cdot 10^{13}$	$1,58 \cdot 10^{12}$	$1,00 \cdot 10^{14}$
0,7	$7,94 \cdot 10^{11}$	$5,01 \cdot 10^{13}$	$2,00 \cdot 10^{12}$	$2,00 \cdot 10^{13}$

Наведені результати свідчать, що в ДС з двошаровими кульовими включеннями виникають дві резонансні частоти $\omega_1 < \omega_2$, які відповідають максимальним значенням ефективної діелектричної проникності [5]. Зміною одного з параметрів системи (товщини оболонки МЧ або її ε) можна налаштувати резонансні частоти на потрібний діапазон. Із збільшенням діелектричної проникності напівпровідникової оболонки значення другого максимуму збільшуються.

Результати досліджень. Як видно з таблиці зменшення розміру МЧ зменшує інтенсивність поглинання і викликає зсув резонансних частот. Зауважимо, що такі частоти суттєво рознесені у частотному діапазоні. Збудження резонансів в одному частотному діапазоні є причиною взаємодії резонансів різної природи. Ширина діапазону залежить від умов збудження ПП у системі на двох межах поділу і від параметрів системи. Наприклад, для частинок з відношенням радіусів $r_1/r_2 = 0.9$ відношення резонансних частот становить $\omega_2/\omega_1 = 630$ при $\varepsilon_2 = 20$ і $\omega_2/\omega_1 = 500$ при $\varepsilon_2 = 10$.

Аналіз даних показує, що збільшення товщини оболонки збільшує меншу частоту ω_1 і зменшує більшу частоту ω_2 . Так, для частинки з відношенням радіусів $r_1/r_2 = 0.9$ максимальне значення відповідає більшій частоті ω_2 , а для $r_1/r_2 = 0.7$, навпаки, меншій частоті ω_1 . При відношенні радіусів $r_1/r_2 = 0.8$ максимуми стають приблизно рівними.

Видно також, що різниця між екстремумами стає більш помітною при більшому значенні діелектричної проникності оболонки ε_2 . Таким чином, штучною зміною товщини оболонки виявляється можливим керувати як розміщенням резонансних частот, так і відносною величиною екстремумів. Отже, процес взаємодії мод можна налаштувати на певну резонансну частоту змінюючи оптичні властивості структури в цілому, що є необхідним при проектуванні оптоелектронних приладів. Результати будуть

корисні при проектуванні оптоелектронних приладів для оптимізації їх резонансних властивостей.

Висновки

Отримано вираз для розрахунку поляризованості двошарової малої частинки (діелектричне ядро - напівпровідникова оболонка) в електричному полі, яке гармонічно змінюється у часі. Отримані частотні залежності ефективної діелектричної функції дисперсних систем з такими включеннями вказують на існування можливості керування не тільки положеннями резонансних частот у досить широкому частотному інтервалі, а також величиною самих екстремумів.

На основі наведених розрахунків можна стверджувати, що наявність зовнішнього електричного поля призводить до зміни електродинамічних властивостей: перерозподілу зарядів, зсуву положення піків і зміни інтенсивності поглинання електромагнітного випромінювання системою малих частинок. При цьому характер зміни процесів поглинання залежить від електродинамічних параметрів (ефективні діелектричні проникності, власні моди коливань, фізико-хімічний стан тощо).

Список літератури

1. Борен К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. – М.: Мир, 1986. – 660 с.
2. Взаимодействие электромагнитного излучения с ансамблем малых частиц / [Л.М. Белокриницкая, Л.Г. Гречко, Е.Ю. Грищук и др.] // Вісник Київ. ун-ту. – 2008. – Вып.3. – С. 226–232.
3. Максвелл-Вагнерівська поляризація матричних дисперсних систем з кульовими напівпровідниковими включеннями в електричному полі / [Л.Г. Гречко, Л.Б. Лерман, О.Ю. Грищук та ін.] // Вісник Київ. ун-ту. Серія "Фіз.-мат. науки". – 2006. – № 1. – С. 376–384.
4. Поглинання електромагнітного випромінювання в матрично-дисперсних системах з багатшаровими кулястими включеннями / Л.Г. Гречко, О.Ю. Грищук, Л.Б. Лерман [та ін.] // Металофізика: новітні технології. – 2008. – Т. 30, № 6. – С. 789–804.
5. Поляризація матричних дисперсних систем з кульовими напівпровідниковими включеннями в електричному полі (чисельні результати) / Л.Г. Гречко, Л.Б. Лерман, О.Ю. Грищук [та ін.] // Вісник Київ. ун-ту. Серія "Фіз.-мат. науки". – 2006. – № 3. – С. 451–456.
6. Смит Р. Полупроводники / Р. Смит. – М.: Мир, 1988. – 558 с.
7. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / [ред. М. Абрамовица и И. Стиган]. – М.: Наука, 1979. – 830 с.
8. Трухан Э.М. Дисперсия диэлектрической проницаемости гетерогенных систем / Э.М. Трухан // Физика твердого тела. – 1962. – Т. 4, № 12. – С. 3496 – 3511.
9. Electro dynamical properties of the matrix disperse systems with two layer edinclusions / L.G. Grechko, V.N. Malnev, N.G. Shkoda[et. al.] // Chemistry, Physics and Technology of Surfaces. – 2002. – Vol. 7. – P. 89-95.
10. Kreibig U. M. Optical properties of metal clusters. / Kreibig U., Volmer M. – Springer, 1995. – Vol. 25. – 527 p.

11. Relative contributions to the plasmon lines of metal nanoshells / S.L. Westcott, J.B. Jackson, C. Radloff [et. al.] // Physical Review B. – 2002. – N 66. – P. 155–431.

Исследовано влияние электромагнитного излучения (ЭМИ) на взаимодействие с малыми частицами (МЧ) и дисперсными системами (ДС) на их основе на границе раздела фаз. Обобщено применение теории Максвелл-Гарнетта (МГ) и приближения эффективной среды для дисперсных систем с соответствующими включениями. Проанализированы условия возбуждения и распространения поверхностных электромагнитных мод (ПЭМ) в дисперсных системах под воздействием ЭМИ и влияние межфазных границ раздела на оптические спектры поглощения и рассеяния.

Электромагнитное излучение, дисперсная система, электродинамический отклик, поверхностные плазмоны.

The influence of the electromagnetic radiation to interact with the small particle spherical disperse system on their basis at the interface. Generalized application of the theory of Maxwell-Garnett and effective medium approximation to disperse systems with appropriate inclusions, analyzed the conditions of excitation and propagation of surface electromagnetic modes in disperse system under the influence of electromagnetic radiation and the effect of interphase boundaries on the optical absorption and scattering.

Electromagnetic radiation, dispersed systems, electrodynamic response, surface plasmons.

УДК 681.5.07

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДАЧ ОБМЕЖЕНОЇ ЧУТЛИВОСТІ МЕТОДАМИ ПРАКТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ

Л.А.Панталієнко, кандидат фізико-математичних наук

Наведено результати розрахунку областей стійкості для функцій чутливості у заданих структурах за наявності динамічних обмежень. Розглянуто постановки задач обмеженої та гарантованої чутливості, що охоплюються алгоритмами практичної стійкості.

Функції чутливості, параметри, збурена траєкторія, практична стійкість.

Проблема чутливості безпосередньо пов'язана з оцінюванням впливу збурень на працездатність реальної динамічної системи та охоп-

11. Relative contributions to the plasmon lines of metal nanoshells / S.L. Westcott, J.B. Jackson, C. Radloff [et. al.] // Physical Review B. – 2002. – N 66. – P. 155–431.

Исследовано влияние электромагнитного излучения (ЭМИ) на взаимодействие с малыми частицами (МЧ) и дисперсными системами (ДС) на их основе на границе раздела фаз. Обобщено применение теории Максвелл-Гарнетта (МГ) и приближения эффективной среды для дисперсных систем с соответствующими включениями. Проанализированы условия возбуждения и распространения поверхностных электромагнитных мод (ПЭМ) в дисперсных системах под воздействием ЭМИ и влияние межфазных границ раздела на оптические спектры поглощения и рассеяния.

Электромагнитное излучение, дисперсная система, электродинамический отклик, поверхностные плазмоны.

The influence of the electromagnetic radiation to interact with the small particle spherical disperse system on their basis at the interface. Generalized application of the theory of Maxwell-Garnett and effective medium approximation to disperse systems with appropriate inclusions, analyzed the conditions of excitation and propagation of surface electromagnetic modes in disperse system under the influence of electromagnetic radiation and the effect of interphase boundaries on the optical absorption and scattering.

Electromagnetic radiation, dispersed systems, electrodynamic response, surface plasmons.

УДК 681.5.07

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДАЧ ОБМЕЖЕНОЇ ЧУТЛИВОСТІ МЕТОДАМИ ПРАКТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ

Л.А.Панталієнко, кандидат фізико-математичних наук

Наведено результати розрахунку областей стійкості для функцій чутливості у заданих структурах за наявності динамічних обмежень. Розглянуто постановки задач обмеженої та гарантованої чутливості, що охоплюються алгоритмами практичної стійкості.

Функції чутливості, параметри, збурена траєкторія, практична стійкість.

Проблема чутливості безпосередньо пов'язана з оцінюванням впливу збурень на працездатність реальної динамічної системи та охоп-

лює низку задач різної природи [2]. Часто аналіз чутливості доцільно здійснювати за допомогою функцій чутливості, що визначаються як похідні функцій стану за параметрами при наявності певних вимог щодо диференційованості. Такий підхід стосується класу задач обмеженої та гарантованої чутливості, зокрема оптимізаційних постановок, що пропонується розв'язувати методами практичної стійкості [4].

Мета досліджень — розробка ефективних методів розрахунку об'ластей початкових умов для задач обмеженої та гарантованої чутливості методами практичної стійкості.

Матеріали та методика досліджень. У роботі застосовуються математичні методи параметричної стійкості, що ґрунтуються на методі порівняння в якісній теорії систем диференціальних рівнянь.

Припустимо, що за деяким принципом визначена структура реальної системи у вигляді параметричної моделі, що досить об'єктивно відображує її основні властивості, у тому числі можливу залежність від параметрів.

Нехай динаміка об'єкта описується нелінійною системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t, \alpha), \quad f(0, t, 0) \equiv 0, \quad t \in [0, T] \quad (1)$$

з початковими умовами

$$x(0) = x_0, \quad t_0 = t_0 \quad (2)$$

де α — m -вимірний вектор параметрів, що вибирається з деякої множини G_α , $x = x(\alpha)$ — вектор фазових координат вимірності n . При цьому залежність $x = x(\alpha)$ є однозначною, а множина G_α однозначно визначає усі змінні станів параметричної моделі.

Позначаючи через P_x множину бажаних станів об'єкта, а через $R_x(\alpha)$ — множину його реальних станів, що відповідають значенню параметра α , запишемо умови нормальної працездатності у вигляді:

$$R_x(\alpha) \subseteq P_x, \quad \alpha \in G_\alpha. \quad (3)$$

Іноді умови бажаного функціонування об'єкта (3) зручно подавати так:

$$R_J(\alpha) \subseteq P_J, \quad \alpha \in G_\alpha, \quad (4)$$

де $R_J(\alpha)$ — сукупність деяких функціоналів, визначених на множині вектора станів; P_J — множина допустимих станів цих функціоналів.

Нехай $\bar{\alpha} \in G_\alpha \subset G_\alpha$ — деяке (незбурене) значення вектора параметрів, при якому виконується умова (3) або (4). Цьому значенню відповідає незбурена (розрахункова) траєкторія $\bar{x} = x(\bar{\alpha})$. При збуренні вектора $\bar{\alpha}$ одержимо значення $\alpha = \bar{\alpha} + \Delta\alpha$, $\Delta\alpha \in \Delta G_\alpha(\bar{\alpha})$ та відповідну йому збурену траєкторію $x(\alpha) = x(\bar{\alpha} + \Delta\alpha)$, де $\Delta G_\alpha(\bar{\alpha})$ — множина флуктуацій розрахункового значення вектора параметрів $\bar{\alpha}$. У термінах цих позначень співвідношення (3), (4) набувають відповідно вигляду:

$$R_x(\bar{\alpha} + \Delta\alpha) \subseteq P_x, \quad \Delta\alpha \in \Delta G_\alpha(\bar{\alpha}), \quad \bar{\alpha} \in G_\alpha;$$

$$R_j(\bar{x} + \Delta\alpha) \subset P_j, \Delta\alpha \in \Delta G_{\bar{\alpha}}(\bar{\alpha}), \bar{\alpha} \in G_{\bar{\alpha}}.$$

Для конкретизації наведених умов працездатності системи (1) скористаємося поняттям функцій чутливості [1].

За умовою виконання певних умов неперервності та диференційованості функції $u_i(\alpha) = \frac{\partial x_i(\alpha)}{\partial \alpha_j}$, $i=1,2,\dots,n$, $j=1,2,\dots,m$ є розв'язками спеціальної задачі Коші (для кожного конкретного значення α), що одержується прямим диференціюванням вихідної системи (1):

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{\partial f(x,t,\bar{\alpha})}{\partial x} \Big|_{x=x(\alpha)} + \frac{\partial f(x,t,\bar{\alpha})}{\partial \alpha} \Big|_{x=x(\alpha)}, \\ u(\alpha_0) &= \frac{dx_0(\alpha)}{d\alpha} - f(x_0, t_0, \alpha) \frac{dt_0(\alpha)}{d\alpha}. \end{aligned}$$

Іноді функції чутливості необхідно визначити лише в момент T , який, крім умов (2), залежить від α : $T = T(\alpha)$.

Якщо розкид значення вектора параметрів в околі розрахункового значення $\bar{\alpha}$ є досить малим за величиною, то має місце наближена рівність:

$$x(\bar{\alpha} + \Delta\alpha) \approx x(\bar{\alpha}) + U(\alpha) \Big|_{\alpha=\bar{\alpha}} \cdot \Delta\alpha, \quad (5)$$

де $U(\alpha) \Big|_{\alpha=\bar{\alpha}}$ – матриця функцій чутливості з елементами $u_i(\alpha) \Big|_{\alpha=\bar{\alpha}}$ вимірності $n \times m$, обчислена в точці $\alpha = \bar{\alpha}$. Припускаючи додатково, що в околі точки $\bar{\alpha}$ існують неперервні функції чутливості до $(+1)$ -го порядку включно за комбінаціями параметрів $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$, одержимо за формулою Тейлора відповідний наближений вираз для збуреного руху $x(\alpha)$ [1].

Позначимо через $\Delta x(\alpha)$ величину відхилення збуреного руху системи відносно незбуреного:

$$\begin{aligned} \Delta x(\alpha) &= x(\alpha) - x(\bar{\alpha}) = x(\bar{\alpha} + \Delta\alpha) - x(\bar{\alpha}); \\ \bar{\alpha} &\in G_{\bar{\alpha}}, \Delta\alpha \in \Delta G_{\bar{\alpha}}(\bar{\alpha}). \end{aligned} \quad (6)$$

З урахуванням (5) вираз для відхилення (6) набуває вигляду:

$$\Delta x(\alpha) = U(\alpha) \Big|_{\alpha=\bar{\alpha}} \cdot \Delta\alpha$$

або

$$\Delta x(\alpha) = \sum_{j=1}^m u(\alpha) \Big|_{\alpha=\bar{\alpha}} \Delta\alpha_j. \quad (7)$$

Тут $u(\alpha) \Big|_{\alpha=\bar{\alpha}} = \frac{\partial x(\alpha)}{\partial \alpha_j} \Big|_{\alpha=\bar{\alpha}}$ – n -вимірний вектор функцій чутливості, що

характеризує величину швидкості змінювання збуреного руху відносно розрахункового значення $\bar{\alpha}_j$ ($j=1,2,\dots,m$).

Так само, за наявності припущень щодо неперервності та диференційованості, можна записати й вираз для відхилення показника якості

$$\Delta J(\alpha) = J(\alpha) - J(\bar{\alpha}) = J(\bar{\alpha} + \Delta\alpha) - J(\bar{\alpha}) \approx u^*(\bar{\alpha}) \Delta\alpha = \sum_{j=1}^m u^{(j)}(\bar{\alpha}) \Delta\alpha_j, \quad (8)$$

де $u^{(j)}(\bar{\alpha}) = \frac{\partial J(\bar{\alpha})}{\partial \alpha_j}$ – функція чутливості функціонала за j -тим параметром, обчислена при $\alpha = \bar{\alpha}$ ($j = 1, 2, \dots, m$), $u^*(\bar{\alpha}) = (u^{(1)}(\bar{\alpha}), u^{(2)}(\bar{\alpha}), \dots, u^{(m)}(\bar{\alpha}))$.

Щоб одержати поширені на практиці постановки задач теорії чутливості, виділимо з постановок (3), (4) клас задач відповідно вигляду:

$$R_x(\alpha) \subseteq P_x, \quad R_u(\alpha) \subseteq P_u, \quad \alpha \in G_\alpha; \quad (9)$$

$$R_J(\alpha) \subseteq P_J, \quad \bar{R}_u(\alpha) \subseteq \bar{P}_u, \quad \alpha \in G_\alpha. \quad (10)$$

Тут $R_u(\alpha)$, $\bar{R}_u(\alpha)$ – сукупність функцій чутливості, що відповідають конкретному значенню вектора параметрів α ; P_u , $\bar{P}_u$ – бажані множини функцій чутливості $u_i^{(j)}(\alpha) = \frac{\partial x_i(\alpha)}{\partial \alpha_j}$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$; $u_i^{(j)}(\alpha) = \frac{\partial J(\alpha)}{\partial \alpha_j}$, $j = 1, 2, \dots, m$ відповідно.

Постановки задач (9), (10) стосуються класу задач проектування систем з обмеженою чутливістю, а найпростіший аналіз чутливості тут може полягати у перевірці згаданих співвідношень для розрахункового значення $\alpha = \bar{\alpha}$. При цьому задача (10) охоплює й оптимізаційні постановки з урахуванням вимог до чутливості: знайти вектор α^* за умовою

$$J(\alpha^*) \leq J(\bar{\alpha}) \quad (11)$$

за наявності обмежень

$$R_u(\alpha) \subseteq P_u, \quad \alpha \in G_\alpha, \quad (12)$$

де $J(\alpha) = J(\bar{\alpha} + \Delta\alpha)$, $J(\bar{\alpha})$ – значення показників якості для збуреного та незбуреного рухів, $\Delta\alpha \in \Delta G_\alpha(\bar{\alpha})$.

Розглянемо, наприклад, задачу мінімізації функціонала від кінцевого стану системи (1) по вектору параметрів α :

$$J(\alpha^*) = \min_{\alpha \in G_\alpha} \Phi(\alpha, \alpha^*) \quad (13)$$

при достатньо загальних обмеженнях на функції чутливості:

$$\Phi_t = \Gamma_t = \left\{ \alpha \in G_\alpha : \left| \sum_{i=1}^m l_s^{(i)}(\alpha) u^{(i)}(\alpha) \right| \leq 1, s = 1, 2, \dots, N \right\}, \quad t \in [0, T], \quad (14)$$

$$\Phi_t = \Psi_t = \left\{ \alpha \in G_\alpha : \psi(\alpha, \alpha^*) \leq \psi(\alpha, \alpha^*), u^{(1)}(\alpha), \dots, u^{(m)}(\alpha) \leq 1 \right\}, \quad t \in [0, T]. \quad (15)$$

Тут $l_s^{(i)}(\alpha)$, $i = 1, 2, \dots, m$, $s = 1, 2, \dots, N$ – відомі неперервні вектор-функції вимірності n ;

$u^*(\alpha) = (u^{(1)}(\alpha), \dots, u^{(m)}(\alpha))$ – вектор вимірності $n \cdot m$; $\psi(\alpha, \alpha^*)$ – скалярна функція, неперервна за своїми аргументами разом з частинними похідни-

ми по елементах вектора $u \in \mathbb{R}^n$, причому множина Ψ_t опукла, замкнена та містить внутрішню точку $u \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ для будь-яких $t \in [t_0, T]$.

Для розв'язання задачі (13) можна скористатися схемою градієнтного спуску [3]. Щоб задані обмеження (14), (15) виконувалися на кожному кроці ітераційної процедури на фіксованому $\alpha \in \mathbb{R}^m$, застосуємо методи практичної стійкості параметричних систем [1] у просторі функції чутливості.

Введемо до розгляду множину початкових умов $G_0 = \left\{ u \in \mathbb{R}^n : \sum_{i=1}^m u^T \left(B_i^{-1} u \right) \leq c^2 \right\}$, що характеризує ті значення $u \in \mathbb{R}^n$, при яких будуть виконуватися співвідношення (14), (15) на фіксованому $\alpha \in \mathbb{R}^m$. Використовуючи алгоритми стійкості, одержимо оцінку множини G_0 за наявності умови (14):

$$c^2 \leq \min_{t \in [t_0, T]} \min_{s=1,2,\dots,N} \frac{\left(1 - \left| \sum_{i=1}^m l_s^T \left(X(t_0) B_i^{-1} X^T(t_0) l_s \right) \right| \right)^2}{\sum_{i=1}^m l_s^T \left(X(t_0) B_i^{-1} X^T(t_0) l_s \right)}, \quad \left| \sum_{i=1}^m l_s^T \left(X(t_0) B_i^{-1} X^T(t_0) l_s \right) \right| < 1, \quad s=1,2,\dots,N, \quad t \in [t_0, T], \quad (16)$$

де $X(t_0)$ – нормована фундаментальна матриця розв'язків однорідної системи:

$$\frac{dX(t_0)}{dt} = \frac{\partial f(t, \bar{\alpha})}{\partial x} \Big|_{x=X(t_0)} X(t_0), \quad X(t_0) = E;$$

$$a_i(t) = \int_{t_0}^t X(t, \tau) \frac{\partial f(t, \bar{\alpha})}{\partial \alpha_i} d\tau, \quad i=1,2,\dots,m.$$

Для нелінійних обмежень на функції чутливості (15) оцінка області G_0 буде такою:

$$c^2 \leq \min_{t \in [t_0, T]} \min_{\bar{u} \in \Psi_t'} \frac{[g^*(\bar{u}, t)(\bar{u} - a(t))]^2}{g^*(\bar{u}, t) Q^{-1} \left(\bar{g}(\bar{u}, t) \right)},$$

$$g^*(t, \bar{u}) - a(t) > 0, \quad \bar{u} \in \Psi_t', \quad t \in [t_0, T].$$

Тут $g^*(t, \bar{u}) = \text{grad}_{\bar{u}}^* \psi(t, \bar{u})$; Q^{-1} – діагональна матриця вимірності $n \cdot m$ з елементами $X(t_0) B_i^{-1} X^T(t_0)$, $i=1,2,\dots,m$ головної діагоналі; Ψ_t' – межа замкненої опуклої множини Ψ_t , $t \in [t_0, T]$.

У зв'язку з постановками задач (11), (12) виникає необхідність задовольнити вимоги до чутливості не тільки при $\alpha = \bar{\alpha}$ (тут $\bar{\alpha} = \alpha$), а й визначити область параметрів $\Delta G_{\bar{\alpha}}(\alpha)$, для кожного $\Delta \alpha$ з якої виконуються співвідношення (12). Остання задача являє собою задачу гарантованої чутливості [3].

Реалізація сформульованих вимог за методами практичної стійкості можлива для випадку лінійної параметричної системи. З таких позицій можна підходити до розв'язання задачі гарантованої чутливості для вихідної нелінійної системи (1), здійснюючи її лінеаризацію в околі розрахункового руху [1].

Результати досліджень. Здійснено формалізацію загальних постановок поширених задач теорії чутливості. Для неперервного випадку параметричних систем одержано чисельні оцінки розрахунку задач обмеженої та гарантованої чутливості методами практичної стійкості.

Висновки

На підставі критеріїв практичної стійкості для параметричних систем розроблено алгоритми оцінювання областей початкових умов для функцій чутливості, зв'язаних з проектуванням малочутливих систем керування.

Список літератури

1. Розенвассер Е.Н. Чувствительность систем управления / Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
2. Дончев А. Системы оптимального управления: Возмущения, приближения и анализ чувствительности / А. Дончев. – М.: Мир, 1987. – 156 с.
3. Панталиенко Л.А. Оценивание и оптимизация параметрических систем методами практической устойчивости / Л.А. Панталиенко // Доповіді Національної академії наук України. Математика. Природознавство. Технічні науки. – 1998. – №8. – С.110-114.
4. Панталиєнко Л.А. Дослідження практичної стійкості нелінійних систем, залежних від параметрів / Л.А. Панталиєнко // Науковий вісник НАУ. – 2005. – №90 – С. 185–191.

Приведены результаты расчета областей устойчивости для функций чувствительности в заданных структурах при наличии динамических ограничений. Рассмотрены постановки задач ограниченной и гарантированной чувствительности, которые охватываются алгоритмами практической устойчивости.

Функции чувствительности, параметры, возмущенная траектория, практическая устойчивость.

The results of the calculation of stability regions for sensitivity functions defined structures in the presence of dynamic constraints. Considered problem statement and a guaranteed limited sensitivity covered algorithms practical stability.

Features sensitivity, parameters, perturbed trajectory, practical stability.

ION TRANSPORT INTO PLANT CELLS BY A MAGNETIC FIELD

*V. Kozyrsky, doctor of technical science**V. Savchenko, A. Sinyavsky, candidate of technical science*

The results of research of the effect of magnetic field on the transport of ions in plant cells are shown. The interrelation between the changes in the concentration of ions in the plant cell with magnetic treatment and magnetic field parameters has been established.

Magnetic field, magnetic induction, magnetic field gradient, ion velocity, ion concentration.

Pre-sowing treatment of seeds makes it possible to raise agricultural crops yield, to reduce plant disease incidence and increase agricultural products quality.

To implement the technology of magnetic treatment of seeds it is necessary to reveal the mechanism of magnetic field effect on seeds, which will allow to determine optimal modes of processing. For this purpose it is necessary to research effect of magnetic field on ions transport in plant cells.

The purpose of research - study the effect of magnetic field on transport ions in the cells of plants

Results of research. It is currently believed that transport of nutrients into the cell involves two autonomous mechanisms – passive movement of substances along electrochemical gradient and their active transport against electrochemical gradient. Since ions are electrically charged, their distribution between the cell and its environment is defined both by potential difference and concentration difference. These two values are commonly designated as electrochemical gradient.

If a membrane is placed between solutions with different ions concentration, diffusion potential emerges, whose value is determined by the Henderson equation [1]:

$$\varphi = \frac{RT}{F} \frac{(U_1 - V_1) - (U_2 - V_2)}{(U_1' - V_1') - (U_2' - V_2')} \ln \frac{U_1' + V_1'}{U_2' + V_2'}, \quad (1)$$

where R is universal gas constant, J/mole·K; T – solution temperature, K; F – the Faraday number, C/mole;

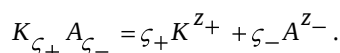
$$U_{1(2)} = \Sigma(C_+ v_+)_{1(2)}; V_{1(2)} = \Sigma(C_- v_-)_{1(2)};$$

$$U_{1(2)}' = \Sigma(C_+ z_+ v_+)_{1(2)}; V_{1(2)}' = \Sigma(C_- z_- v_-)_{1(2)};$$

where C_+, C_- – concentrations of cations and anions correspondingly, mole/m³; v_+, v_- – velocity of cations and anions movement, m/sec, m/c; z_+, z_- – valence of cations and anions; index 1 refers to ions in solution1, index 2 – in solution 2.

Diffusion potential is responsible for ion movement through phospholipid membranes in plant cells.

Ions are formed in the process of salts and acids dissociation due to chemical reaction:



In the process of dissociation one molecule produces $\zeta+$ cations with valence $z+$ and $\zeta-$ with valence $z-$. Let us denote the product of these values by β :

$$\beta = \zeta+ z+ = \zeta- z-. \quad (2)$$

Part of molecules that have been broken down to ions, is determined by the degree of electrolytic dissociation [2, 3]:

$$\alpha = \frac{n}{N_a C}. \quad (3)$$

where n – number of molecules having broken into ions; N_a – Avogadro's number, molecules/mole; C – molar concentration of substance, mole/l.

Under the effect of diffusion potential, ions start ordered motion generating electric current I . Current intensity is equal to the total charge of positive and negative ions passing through the membrane pores per unit time.

It is the ions that are at the distance not exceeding their motion speed, notably in the volume $v_i a^2$, that will pass through the membrane per unit time. Then current intensity will amount to:

$$I = \sum_{i=1}^k (n_{i+} a^2 v_{i+} z_{i+} e + n_{i-} a^2 v_{i-} z_{i-} e), \quad (4)$$

where e – elementary charge, C.

When in motion, ions are affected by forces of electric field F_e , friction F_{m_i} and interaction between ions and solvent molecules F_{ϵ_i} [2]. In accordance with the Newton's second law we get:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = F_{e_i} - F_{m_i} - F_{\epsilon_i}, \quad (5)$$

where m_i – ion mass, kg.

Electric field strength is determined by the formula [2]:

$$F_{e_i} = z_i e E = z_i e \text{grad} \phi. \quad (6)$$

Forces of friction and interaction among ions are directly proportional to speed [2]:

$$F_{m_i} = k_{m_i} v_i; \quad (7)$$

$$F_{\epsilon_i} = k_{\epsilon_i} v_i, \quad (8)$$

where k_m and k_{ϵ} – coefficients of friction and ions interaction, N·c/m, correspondingly.

Inserting (6), (7), (8) into the equation (5), we get:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = z_i e \text{grad} \phi - k_{m_i} v_i - k_{\epsilon_i} v_i. \quad (9)$$

Having solved (9), we obtain the equation of ion motion:

$$v_i = \frac{z_i e \text{ grad } \varphi}{k_{m_i} + k_{e_i}} \left(1 - e^{-\frac{k_{m_i} + k_{e_i}}{m_i} t} \right). \quad (10)$$

As coefficients of friction and ions interaction by far exceed ion mass, we can neglect the value $e^{-\frac{k_{m_i} + k_{e_i}}{m_i} t}$ [2] and consider that ion is moving with uniform speed

$$v_i = \frac{z_i e \text{ grad } \varphi}{k_{m_i} + k_{e_i}}. \quad (11)$$

At $\text{grad } \varphi = 1$ V/m and $k_{e_i} = 0$ ion is moving with absolute speed [2]:

$$v_i^0 = \frac{z_i e}{k_{m_i}}. \quad (12)$$

Interaction between ions and molecules can be considered with the use of electric conductivity coefficient:

$$f_i = \frac{k_{m_i}}{k_{m_i} + k_{e_i}}. \quad (13)$$

Then speed of ion movement will be defined by the expression:

$$v_i = v_i^0 f_i \text{ grad } \varphi. \quad (14)$$

Substituting the expression for speed of ion motion (14) in the equation (4), we shall obtain:

$$I = \sum_{i=1}^k (n_{i+} a^2 v_{i+}^0 f_{i+} z_{i+} e \text{ grad } \varphi + n_{i-} a^2 v_{i-}^0 f_{i-} z_{i-} e \text{ grad } \varphi). \quad (15)$$

As the Faraday number is determined by the expression

$$F = e N_a, \quad (16)$$

the formula (15) can be written in the following form:

$$I = \frac{a^2 F \text{ grad } \varphi}{N_a} \sum_{i=1}^k (n_{i+} v_{i+}^0 f_{i+} z_{i+} + n_{i-} v_{i-}^0 f_{i-} z_{i-}). \quad (17)$$

In the process of dissociation one molecule produces ζ_+ cations and ζ_- anions, therefore

$$n_{i+} = \zeta_{i+} n_i; n_{i-} = \zeta_{i-} n_i. \quad (18)$$

Substituting the expression (18) into the membrane pores area and degree of electrolytic dissociation are increased.

When in motion, ions are affected by forces of electric field F_e , friction F_m , interaction between ions and solvent molecules $F_{e\mu}$ and Lorentz force F_L . In accordance with the Newton's second law of thermodynamics for normal velocity component we get:

$$m_i \frac{dv_{x_i}}{dt} = F_{e_i} - F_{m_i} - F_{e_i}, \quad (21)$$

or

$$m_i \frac{dv_{x_i}}{dt} = z_i e \text{grad} \varphi - k_{m_i} v_i - k_{\theta_i} v_i. \quad (22)$$

If we neglect coefficients of friction and ions interaction [2], the solution of the equation (22) will be:

$$v_{x_i} = v_i^0 f_i \text{grad} \varphi. \quad (23)$$

Correspondingly, for tangential component we get:

$$m_i \frac{dv_{y_i}}{dt} = F_{\mathcal{A}_i} - F_{m_i} - F_{\theta_i}, \quad (24)$$

or

$$m_i \frac{dv_{y_i}}{dt} = z_i e B v - k_{m_i} v_i - k_{\theta_i} v_i. \quad (25)$$

Having solved the equation (25), we get:

$$v_{y_i} = v_i^0 f_i B v. \quad (26)$$

Per unit time through membranes pores whose area will increase under magnetic field effect and will amount to $(a + K_M \text{grad} B)^2$, those ions will pass that are in the volume (Fig. 1)

$$V_1 = a S_{ABCD} = v_{x_i} \cdot (a + K_M \text{grad} B)^2 + \frac{1}{2} K_{\theta} v_{y_i} (a + K_M \text{grad} B) \text{grad} \varphi, \quad (27)$$

where K_{θ} — coefficient of proportionality between distance that ions pass and the gradient of diffusion potential, m^2/T .

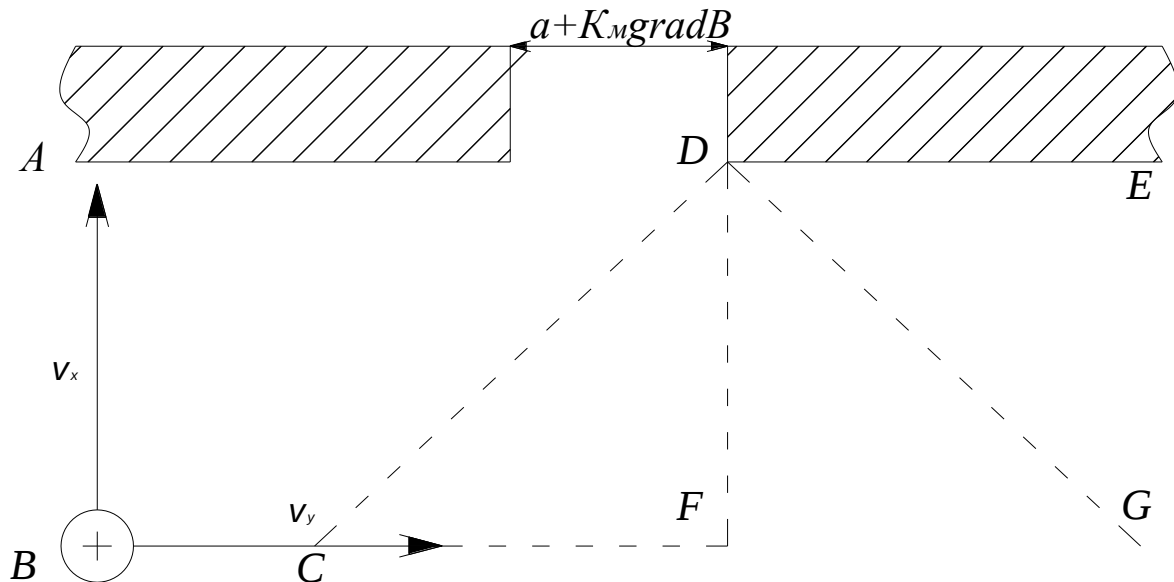


Fig. 1. The diagram of ions motion through the membrane

Under the effect of Lorentz force, ions that are in the *CDF* area (Fig. 1), will move to the *DEG* area where concentration will increase. Therefore, it is

advisable to change the direction of magnetic field action for these ions to pass the membrane. In this case ions that are in the following volume, will pass through the membrane:

$$V_2 = v_{x_i} \cdot (a + K_M \text{grad} B)^2 + K_K K_\theta v_{y_i} (a + K_M \text{grad} B) \text{grad} \varphi, \quad (28)$$

where K_K – coefficient considering the number of ions remaining in the *DEG* area, of their total number that have moved from the *CDF* area. In the general case coefficient K_K is in the range from 0.5 to 1.0.

Intensity of current passing through cell membrane under the effect of magnetic field will amount to:

$$I = \sum_{i=1}^k (n_{i+} v_{x_{i+}} (a + K_M \text{grad} B)(a + K_M \text{grad} B + K_K K_\theta v_{y_{i+}} \text{grad} \varphi) z_{i+} e + \\ + n_{i-} v_{x_{i-}} (a + K_M \text{grad} B)(a + K_M \text{grad} B + K_K K_\theta v_{y_{i-}} \text{grad} \varphi) z_{i-} e). \quad (29)$$

Substituting the expressions for component of ions motion speed (23) and (26) in the equation (29), we get:

$$I = \sum_{i=1}^k (n_{i+} v_{i+}^0 f_{i+} (a + K_M \text{grad} B)(a + K_M \text{grad} B + K_K K_\theta B v) z_{i+} e \text{grad} \varphi + \\ + n_{i-} v_{i-}^0 f_{i-} (a + K_M \text{grad} B)(a + K_M \text{grad} B + K_K K_\theta B v) z_{i-} e \text{grad} \varphi). \quad (30)$$

Under the effect of magnetic field concentration of mineral elements that enter plant cells, is changed. The speed of changing ions concentration will be defined by dependence following from the expression (30):

$$\frac{dn_{i2}}{dt} = n_{i1} v_i^0 f_i (a + K_M \text{grad} B)(a + K_M \text{grad} B + K_K K_\theta B v) \text{grad} \varphi, \quad (31)$$

where n_{i2} – number of ions that have moved from the solution 1 to the solution 2.

In this case the change of ions number in the solution 2 will be:

$$\Delta n_{i2} = \int_0^{t_{\text{o6p}}} n_{i1} v_i^0 f_i (a + K_M \text{grad} B)(a + K_M \text{grad} B + K_K K_\theta B v) \text{grad} \varphi dt. \quad (32)$$

If magnetic induction is changed along seeds motion trajectory, for periodic magnetic field [4]

$$\text{grad} B = \frac{2B}{\tau}, \quad (33)$$

where τ – pole pitch, m.

In this case the number of ions in plant cells will increase by the value

$$\Delta n_{i2} = n_{i1} v_i^0 f_i (a + \frac{2K_M B}{\tau}) ((a + \frac{2K_M B}{\tau}) t_{\text{o6p}} + \frac{1}{2} K_K K_\theta B N_n \tau) \text{grad} \varphi, \quad (34)$$

where t_{o6p} – time of seeds processing in magnetic field, c; N_n – number of magnetic reversals.

Considering (3) and (18) the expression (34) can be written in the following form:

$$\Delta n_{i2} = \alpha_i N_a C_{i1} \varphi_i v_i^0 f_i (a + \frac{2K_M B}{\tau}) ((a + \frac{2K_M B}{\tau}) t_{\text{o6p}} + \frac{1}{2} K_K K_\theta B N_n \tau) \text{grad} \varphi. \quad (35)$$

Change of ions concentration in the solution 2 will be defined by the dependence:

$$\Delta C_{i_2} = C_{i_1} v_i^0 f_i (a + K_M \text{grad} B) (a + \frac{2K_M B}{\tau}) ((a + \frac{2K_M B}{\tau}) t_{\text{обп}} + \frac{1}{2} K_K K_B N_n \tau) \text{grad} \varphi. \quad (36)$$

As the time of seeds in magnetic field is

$$t_{\text{обп}} = \frac{l}{v} = \frac{N_n \tau}{v}, \quad (37)$$

where l – the path that seeds pass in magnetic field, m,
the expression (36) will have the following form:

$$\Delta C_{i_2} = C_{i_1} v_i^0 f_i N_n \tau (a + \frac{2K_M B}{\tau}) (\frac{a}{v} + \frac{2K_M B}{\tau v} + \frac{1}{2} K_K K_B B) \text{grad} \varphi. \quad (38)$$

Conclusions

Under the effect of magnetic field current passing through plant cells membranes, intensifies. Current intensity depends on diffusion potential, gradient and value of magnetic induction, as well as the speed of seeds motion in magnetic field.

This leads to increased concentration of mineral substances involved in chemical reactions, thus increasing their speed.

References

4. Nikolsky B.P., Smirnova N.A., Panov M.Yu., etc. Fizicheskaja khimija. Teoreticheskoe i prakticheskoe rukovodstvo [Physical chemistry. Theoretical and practical guidance] / under the editorship of Akad. B.P. Nikolskogo. – L.: Chemistry, 1987. – 880 pp.
5. Antropov L.I. Teoreticheskaja elektrohimiya [Theoretical electrochemistry]. – 2nd prod., reslave. and additional – M.: Vyssh. school, 1969. – 512 pp.
6. Khmelnytsky R.V. Fizicheskaja i kolloidnaja khimija [Physical and colloidal chemistry]. – M.: Vyssh. school, 1988. – 400 pp.
7. Savchenko V.V. Ustanovka dlja magnitnoj obrabotki semjan selskohozjajstvennyh kultur [Installation for magnetic processing of seeds of crops] // Vestnik VIESH. – 2013. – No.4(13). – P. 12 – 14.

Наведено результати досліджень впливу магнітного поля на транспорт іонів у клітині рослини. Встановлено взаємозв'язок зміни концентрації іонів в клітині рослини при магнітній обробці і параметрів магнітного поля.

Магнітне поле, магнітна індукція, градієнт магнітного поля, швидкість іонів, концентрація іонів.

Приведены результаты исследований влияния магнитного поля на транспорт ионов в клетке растений. Установлена взаимосвязь изменения концентрации ионов в клетке растения при магнитной обработке и параметров магнитного поля.

Магнитное поле, магнитная индукция, градиент магнитного поля, скорость ионов, концентрация ионов.