

МЕТОДОЛОГІЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В БАГАТОРІВНЕВІЙ СТРУКТУРІ ЕЛЕКТРООБІГРІВНОЇ ПІДЛОГИ

Романченко М. А.¹, Бритта Шульцз Свеннигсен², Кунденко О. М.²

¹Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка,

² Фермерське тваринницьке господарство (Скиве, Данія)

В роботі представлено новий підхід щодо ідентифікації енергопотоків живлення електронагрівачів обігрівної підлоги в виробничих спорудах АПК з позиції енергоефективних технологій забезпечення заданих теплових режимів на її поверхні.

Постановка проблеми. Підвищення рентабельності виробництва продукції тваринництва нерозривно пов'язана з більш ефективним використанням кормових та енергетичних ресурсів. Це в повній мірі стосується і виробництва конкурентоспроможної продукції свинини, яка потребує в нашій природно-кліматичній зоні значних енерговитрат для забезпечення ветеринарно-санітарних вимог щодо умов утримання і розведення цих тварин. В першу чергу мова йде про формування систем мікроклімату, які б характеризувались більш високим рівнем функціональності, безпекою, надійністю, зручністю в експлуатації. Крім того вони повинні забезпечувати, з урахуванням виду тварин і метеорологічних умов, автоматичний режим підтримання заданої температури поверхні підлоги в технологічно активних зонах виробничих споруд АПК, працюючи тільки в нічний час з урахуванням зонних тарифів в режимі "споживач-регулятор".

Тому наукові дослідження, спрямовані на пошук енергоефективних електротехнологічних комплексів забезпечення заданих температурних режимів поверхні підлоги і повітря на заданій висоті тваринницьких споруд АПК є актуальними і такими, що мають велике значення для народного господарства країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз науково-технічної літератури свідчить про те, що вітчизняні і зарубіжні автори, роботи яких присвячені розробкам автоматизованих електротехнологічних комплексів для формування і підтримання температурних режимів мікроклімату в тваринницьких спорудах висловлюють думки про доцільність розробок ресурсозберігаючих електротехнічних комплексів до складу яких входять електротеплоакумуляційні системи які можуть працювати за схемою "знизу-вверх". Уже відомі системи мікроклімату з використанням електронагрівальних кабелів, обігрівальних сталевих дротів в ізоляції і без неї замонтованих в теплоакумуляційний шар бетону. Відомі також електротеплоакумуляційні комплекси, до складу яких входять спеціальні електронагрівальники трубчатого типу, розташовані в траншеї, виконаній в ґрунті підлоги, наприклад, в свинарниках-маточниках.

Особливий інтерес і значущість представляє розробка і застосування електротехнологічних автоматизованих комплексів, до складу яких входять багаторівневі (БЕТСО) електротеплоакумуляючі модулі з спеціальними електронагрівальниками трубчатого типу (СЕТ), об'єднані в m-ярусні блоки обігрівальних секцій.

Прогнозний режим керування енергопотоками живлення СЕТ забезпечує енергоефективний процес формування теплових параметрів поверхні підлоги з використанням енергії традиційних та відновлювальних джерел. Разом з тим, відсутність теоретичних досліджень, щодо впливу геометричних параметрів, теплотехнічних та електроенергетичних характеристик, режимів роботи СЕТ, а також методології побудови алгоритмів і обчислювальних програм для роботи систем керування БЕТСО з урахуванням метеорологічних умов з експрес аналізом і оцінкою їх впливу на біооб'єкти, робить проблематичною розробку енергоефективних автоматизованих комплексів на базі децентралізованого опалення обігрівними підлогами з керуваннями енергопотоками живлення СЕТ БЕТСО.

Мета статті. Підвищення ефективності виробництва продукції тваринництва за рахунок застосування енерго- і ресурсозберігаючих електротехнологічних комплексів для термостабілізації обігрівної підлоги та повітря тваринницьких споруд і створення бази даних структурно-функціонального керування СЕТ з урахуванням зовнішніх кліматичних умов.

Основні матеріали дослідження. Для отримання розрахункових параметрів при проведенні машинного експерименту була використана фізична модель з 9-шаровою прямокутною структурою. Причому кількість активних шарів з наявністю СЕТ задається в інтерфейсній частині комп'ютерної моделі [1,4,5].

Геометричні розміри технологічно активної зони обігрівної підлоги та наявність СЕТ обирається шляхом оптимізації енергоспоживання їх нагрівальних елементів. В результаті моделювання було отримано в верхньому ярусі дев'ять, в середньому – сім і нижньому – п'ять СЕТ. Секції СЕТ розташовані в шарах симетрично щодо площини симетрії траншеї $y=0$. Була обрана спрощена математична модель БЕТСО для моделювання процесів теплопередачі. По формулі (1) визначався розподіл щільності потужностей живлення СЕТ

$$p_i(y) = \sum_{j=-(M_i-1)/2}^{(M_i-1)/2} p_{i,j} \cdot f(y-y_{i,j}^c), \quad (1)$$

де $p_{i,j}$ - щільність потужності розподілених джерел у трубці СЕТ, $Вт/м^3$;

$f(y-y_{i,j}^c)$ - функція розподілу теплової потужності в області локалізації труби з координатою

центра $u_{i,j}^c$, для моделювання прийнятій трапецієподібний розподіл потужності в області перетину СЕТ.

Моделювання теплових процесів в НС зведено до рішення стаціонарної задачі теплопровідності:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} = -\frac{1}{\lambda_i} p_i(y), \quad i=1,2,\dots,N; \quad 0 \leq x \leq A, \quad 0 \leq y \leq B, \quad (2)$$

$$u_i(x,y)|_{x=0} = t_0; \quad -\lambda_N \frac{\partial u_N}{\partial x} \Big|_{x=x_N} = \alpha \cdot (u_N - t_c) \Big|_{x=x_N}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad u_i + h \frac{\partial u_i}{\partial y} \Big|_{y=B} = T_{ep,i}, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i \quad (i=1,\dots,N), \quad (4)$$

$$\lambda_i \frac{\partial u_i}{\partial x} \Big|_{x=x_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial u_{i+1}}{\partial x} \Big|_{x=x_i}; \quad u_i \Big|_{x=x_i} = \left(u_{i+1} - r_i^* \cdot \lambda_{i+1} \frac{\partial u_{i+1}}{\partial x} \Big|_{x=x_i} \right) \Big|_{x=x_i}, \quad (5)$$

де i – номер шару обігрівної структури;

$x_{i-1} \leq x \leq x_i$ – область локалізації i -го шару по глибині траншеї;

$u_i = u_i(x,y)$, $i=1,2,\dots,N$ – розподіл температури

по локальній області – i -му шару;

$p_i = p_i(y)$ – задана функція щільності джерел теп-

ла Wm/m^3 ;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності матеріалу i -го шару;

t_c – температура повітряного середовища на деякому видаленні від поверхні підлоги;

$d_i = x_i - x_{i-1}$ – товщина i -го шару;

$T_{ep,i}$ – температура ґрунту на висоті, приймається постійною в межах кожного шару;

r_i^* – термічні контактні опори між шарами;

α – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні підлоги у повітряне середовище, приймається постійною величиною;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності матеріалу i -го шару;

$h = \lambda^* / \alpha_s$ – параметр теплопередачі у ґрунт через бічну стінку;

λ^* – усереднене значення коефіцієнта теплопровідності по висоті траншеї;

α_s – коефіцієнт тепловіддачі в умовах ГУ 3-го роду.

Розв'язання цієї задачі можемо представити у вигляді функціональної суперпозиції, що враховує всі види джерел теплоти: повітряного середовища над поверхнею підлоги в технологічно активній зоні (ЗТА); глибинного ґрунту й ґрунту за боковою стінкою БЕТСО; кожного окремого СЕТ. Однією із складових частин рішення цієї задачі є визначення температури поверхні підлоги $t_n = u(x_N, y)$. Вона може бути представлена у вигляді функціонального ряду, що встановлює зв'язок між нормативними значеннями

нагріву поверхні підлоги в залежності від функціонального призначення тваринницького приміщення та потужністю енергопотоків СЕТ. Це дозволяє реалізувати спосіб структурно-функціонального керування енергопотоками живлення СЕТ, забезпечуючи оперативність і точність дотримання ветеринарно-санітарних нормативів та вимог ДБН щодо заданого рівня обігріву підлоги в технологічно активній зоні.

Аналітичне рішення граничної задачі теплопровідності (2) – (5), виконано методом кінцевих інтегральних перетворень (КІП) [2]. При побудові рішення застосовано принцип функціональної суперпозиції, зважаючи на лінійність вихідної задачі. Її рішення представимо у вигляді суперпозиції двох функцій для кожного активного шару представимо формулою (6):

$$u_i(x,y) = v_{0,i}(x,y) + v_i(x,y) \equiv [T_{ep,i} + v_{0,i}(x,y)] + v_i(x,y), \quad (6)$$

де $v_{0,i}(x,y)$ – рішення однорідного рівняння (2) із заданими ГУ (3) – (5);

$v_{00,i}(x,y)$ – рішення однорідного рівняння (2) зі змішаними граничними умовами;

$v_i(x,y)$ – часткове рішення неоднорідного рівняння з однорідними граничними умовами.

Функція $v_{0,i}(x,y)$, надає можливість врахувати внесок зовнішніх впливів у температурне поле i -го шару, а $v_i(x,y)$ – лише від набору зосереджених джерел у вигляді системи нагрівальних елементів при однорідних граничних умовах на частинах поверхні обігрівної підлоги. Функції $v_{00,i}(x,y)$ й $v_i(x,y)$ для відповідних шарів структури БЕТСО крім граничних умов повинні бути підлеглі умовам сполучення на внутрішніх міжшарових границях. Погіршення термічного контакту зовнішніх поверхонь нагрітих елементів із наповнювачем добре відомо в практиці, і його необхідно враховувати [3].

Рішення задач теплопровідності в області зображень кінцевих інтегральних перетворень (КІП) для функцій $v_{00,i}(x,y)$ і $v_i(x,y)$ та $p_i(x,y) = p_i(y)$ у рівнянні (2) має вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{00,i}(x,\mu) &= \frac{1}{B} \int_0^B K(y,\mu) \cdot v_{00,i}(x,y) dy; \\ \tilde{v}_i(x,\mu) &= \frac{1}{B} \int_0^B K(y,\mu) \cdot v_i(x,y) dy, \end{aligned} \quad (7)$$

де $K(y,\mu)$ – ядро перетворень, загальне для всіх шарів, що є рішенням задачі Штурма-Ліувілля для області $0 \leq y \leq B$:

$$\frac{d^2 K}{dy^2} + \mu^2 K = 0, \quad \frac{\partial K}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad \left(K + h \frac{\partial K}{\partial y} \right) \Big|_{y=B} = 0. \quad (8)$$

Рішенням (8) є функція $\cos(\mu \cdot y)$, де параметр μ

є коренем рівняння: $ctg(\mu_q B) = h \cdot \mu_q$, $q = 1, 2, \dots$

Відповідно, ядро перетворення має вигляд:

$$K(\mu_q y) = \cos(\mu_q y), \quad q = 1, 2, \dots \quad (9)$$

Рішення задачі (2) – (5) окремо для кожного шару можливо представити у вигляді $u_i(x, y) = v_{0,i}(x, y) + v_i(x, y)$, де:

$$v_{0,i}(x, y) = T_{zp,i} + \sum_{q=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_q y)}{N_q} \cdot \tilde{v}_{00,i}(x, \mu_q); \quad (10)$$

$$v_i(x, y) = \sum_{q=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_q y)}{N_q} \cdot \tilde{v}_i(x, \mu_q), \quad N_q = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{(h/B)}{1 + (\mu_q h)^2} \right]. \quad (11)$$

Визначення функцій $\tilde{v}_i(x, \mu_q)$ і $\tilde{v}_{00,i}(x, \mu_q)$ в області зображень зводиться до інтегрування звичайних диференціальних рівнянь для кожного шару ($i = 1, 2, \dots, N$):

$$\frac{d^2 \tilde{v}_i}{dx^2} + \mu_q^2 \tilde{v}_i = -\frac{\cos(\mu_q B)}{h \cdot B} \cdot T_{zp,i}; \quad \frac{d^2 \tilde{v}_{00,i}}{dx^2} + \mu_q^2 \tilde{v}_{00,i} = 0. \quad (12)$$

Таким чином, рішення відповідних задач для кожного шару в області зображень буде у вигляді комбінацій гіперболічних функцій:

$$\tilde{v}_i(x, \mu_q) = \frac{W_{i,q}}{\mu_q^2} + a_{i,q} \cdot ch[\mu_q(x - x_i)] + b_{i,q} \cdot sh[\mu_q(x - x_i)], \quad (13)$$

$$\tilde{v}_{00,i}(x, \mu_q) = c_{i,q} \cdot ch[\mu_q(x - x_i)] + d_{i,q} \cdot sh[\mu_q(x - x_i)], \quad (14)$$

де $W_{i,q} = -\frac{1}{\lambda_i B} \int_0^B K(y, \mu_q) \cdot p_i(y) dy$ (15) – КПФ функції розподілу джерел у смугі БЕТСО.

Числові значення $2N$ коефіцієнтів $a_{i,q}, b_{i,q}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) для кожного значення індексу q визначаються з рішення системи лінійних неоднорідних рівнянь порядку $2N$:

$$\begin{aligned} a_{1,q} ch(\mu_q h_1) - b_{1,q} sh(\mu_q h_1) &= -\frac{W_{1,q}}{\mu_q^2}; \quad a_{N,q} + b_{1,q} \frac{\lambda_N}{\alpha} = -\frac{W_{N,q}}{\mu_q^2}; \\ a_{i,q} &= \frac{W_{i+1,q} - W_{i,q}}{\mu_q^2} + a_{i+1,q} [ch(\mu_q h_{i+1}) + \mu_q r_i^* \lambda_{r+1} sh(\mu_q h_{i+1})] - \\ &\quad - b_{i+1,q} [sh(\mu_q h_{i+1}) + \mu_q r_i^* \lambda_{r+1} ch(\mu_q h_{i+1})]; \\ b_{i,q} &= \frac{\lambda_{r+1}}{\lambda_i} [-a_{i+1,q} sh(\mu_q h_{i+1}) + b_{i+1,q} ch(\mu_q h_{i+1})], \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \end{aligned} \quad (16)$$

Ця система формується при виконанні умов сполучення на міжшарових границях з урахуванням термічних контактних опорів r_i^* (5) і ГУ на граничних поверхнях $x = 0$, $x = x_N$.

Числові значення $2N$ коефіцієнтів $c_{i,q}, d_{i,q}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) визначаються для кожного значення індексу q з рішення системи лінійних неоднорідних рів-

нянь порядку $2N$ аналогічного виду, де замість спектральних коефіцієнтів $W_{i,q}/\mu_q^2$ у рівняння входять спектральні коефіцієнти зовнішніх температур $t_0, t_c, T_{zp,i}$.

Визначені в такий спосіб набори функцій $\tilde{v}_i(x, \mu_q)$ і $\tilde{v}_{00,i}(x, \mu_q)$ дозволяють за допомогою перетворень (10), (11) одержати рішення поставленої задачі.

Аналіз температурних режимів підлоги в ЗТА та їхньої оптимізації шляхом диференційованого енергопідводу до нагрівальних елементів СЕТ розроблена методологія комп'ютерного моделювання процесів теплопередачі в N - шаровій структурі та відповідна комп'ютерна модель. В комп'ютерній моделі спочатку реалізовано знаходження аналітичного рішення зворотної задачі теплопровідності для необмеженої по ширині смуги [4], які дозволяють визначити питомі потужності нагрівання. Значення цих потужностей використовуються для визначення енергокомпонент, що підводяться до окремих нагрівальних елементів СЕТ в обмеженій по ширині смугі з урахуванням теплообміну через бічні стінки траншеї. При цьому, у комп'ютерній моделі передбачено проведення оптимізації розподілу енергокомпонент по окремим нагрівальним елементам СЕТ з метою забезпечення заданого температурного режиму. Виконання цієї умови можливе при обмеженій кількості точок. Розподіл температури смуги по ширині підлоги, що обігривається, істотно залежить від кількості трубчастих електронагрівачів [5, 6].

Крім того, отримано функціональну залежність температури поверхні підлоги $t_n = u(x_N, y)$ від температури повітряного середовища над ЗТА, глибинного ґрунту й ґрунту за бічною стінкою траншеї, а також потужності кожного окремого нагрівального елемента. Встановлено зв'язок між нормативами на нагрівання поверхні підлоги й потужністю енергопотоків у БЕТСО, що і дозволяє реалізувати структурно-функціональне керування енергопотоків СЕТ. Проведений обчислювальний експеримент підтвердив реальну можливість забезпечення рівномірності температури нагріву на поверхні підлоги з відхиленням, що не перевищує 0.5°C .

Як приклад на рис. 1 наведено розподіли температури на поверхні підлоги ЗТА при нормативному нагріванні $t_n = 18^\circ\text{C}$, а також представлено відповідні енергограми для одного із режимів нагрівання.

Таким чином, на основі отриманих даних при проведенні машинного експерименту, в відповідності з запропонованою методологією, було вдосконалено ряд технологічних і конструктивних рішень електротеплоакумулятивних модулів для формування теплових параметрів мікроклімату в тваринницьких спорудах АПК. Зокрема, надано перевагу інженерно-технічним розробкам, що базуються на принципово нових автоматизованих електротеплоакумулятивних силових теплогенеруючих блоках, які в дистанційно керованому режимі можуть забезпечити чітке дотримання заданих нормативів температурного режиму поверхні підлоги і повітря на обумовленій висоті тех-

нологічно активної зони, з урахуванням метеологічних умов і функціонального призначення тваринницької споруди.

Система працює за схемою "знизу-вверх" з використанням енергії традиційних і нетрадиційних відновлювальних джерел енергії. Теоретико-експериментальний комплекс складається з низки складових, що відпрацьовують обчислювально-логічні алгоритми і програми для визначення структурно-функціональної суперпозиції отриманих імперичних формул, які модулюють функціональні зв'язки між нормативними значеннями температурних режимів поверхні визначених ділянок обігрівної підлоги та енергокомпонентами, що забезпечують мінімально припустимі (0,5 %) відхилення їх від заданих рівнів.

Ці системи дозволяють енергоефективно в технологічно-надійному і стійкому режимі працювати за схемою "центр-периферія", яка може бути контролювана з єдиного центру за допомогою сучасних засобів зв'язку і телекомунікацій. Електротехнологічний комплекс допускає використання енергії нетрадиційних відновлювальних та вторинних джерел, як альтернативи зниження на 30-40 % споживання енергоносіїв для забезпечення технологічних процесів виробництва продукції тваринництва.

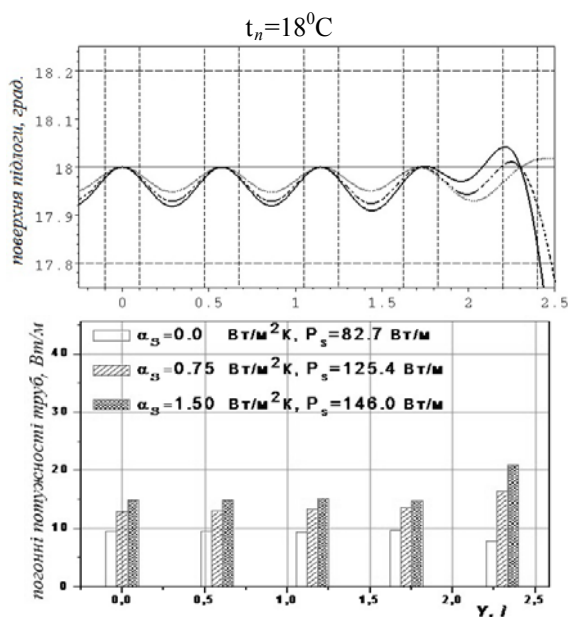


Рисунок 1 – Температура на поверхні підлоги в ЗТА та компоненти потужностей СЕТ

Висновки. З наведеного матеріалу випливає наступне:

1. Розроблено методологію комп'ютерного моделювання енергоефективних процесів формування температурних параметрів мікроклімату в тваринницьких спорудах з багаторівневими обігрівними підлогами.

2. Запропоновано систему структурно функціонального керування енергопотоків живлення СЕТ багаторівневої електрообігрівної підлоги, яка дозволяє в режимі реального часу інформувати оператора про роботу теплогенеруючих модулів.

Список використаних джерел

1. Романченко М. А. Энергозберігаючі електротехнології забезпечення стандартів теплового режиму виробничих споруд АПК з електрообігрівними підлогами / М. А. Романченко, Д. І. Мазоренко, А. П. Слесаренко., О. А. Сорока // Електрифік. та автоматиз. сільськ. господарства. – 2006. – № 2. – С. 82–92.
2. Положий Г. Н. Уравнения математической физики / Г. Н. Положий. – М.: Высшая школа, 1964. – 560 с.
3. Тугунов П. Выбор коэффициентов теплопроводности грунтов при тепловом расчете "горячих" трубопроводов / П. Тугунов // Нефт. хоз-во. – 1969. – № 11. – С. 6–11.
4. Романченко Н. А. Математическая модель стационарного режима многослойного обогреваемого пола / Н. А. Романченко, А. П. Слесаренко, А. С. Сорока // Вісник ХДТУСГ ім. Петра Василенка "Проблеми енергозабезпеч. та енергозбереж. в АПК України". – 2004. – Вип. 27. – Т. 1. – С. 245–250.
5. Романченко М. А. Структурно-функціональне керування вхідними енергопотоків багаторівневої електротеплоакумуляційної системи обігріву підлог і повітря в спорудах АПК / М. А. Романченко // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2006. – № 1. – С. 31–41.
6. Романченко Н. А. Электрообогреваемые полы в животноводческих помещениях / Н. А. Романченко, В. И. Мельник [и др.] // Механиз. и электрифик. сельского хозяйства. – 1993. – № 5–6. – С. 12–14.

Аннотация

МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В МНОГОУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРЕ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАЕМОГО ПОЛА

Романченко Н. А., Бритта Шульцтз Свеннигсен, Кунденко А. Н.

В работе представлен новый подход к идентификации энергопотоків питания электронагревателей обогреваемого пола в производственных сооружениях АПК с позиции энергоэффективных технологий обеспечения заданных тепловых режимов на ее поверхности.

Abstract

METHODOLOGY THE SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN A LAYERED STRUCTURE OF FLOOR

N. Romanchenko, Britta Schultz Svenningsen, A. Kundenko

This paper presents a new approach to the identification of energy flows-power electric heaters heated floor in the agribusiness production facilities from the perspective of energy efficient technologies provide the specified thermal conditions on its surface.