

УДК 631.2:631.171:65.011.56

# ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРООБІГРІВНИМИ ПІДЛОГАМИ

**М. А. Романченко**

Кандидат технічних наук, професор  
Кафедра «Інтегровані електротехнології  
та процеси»

Харківський національний технічний університет  
сільського господарства ім. Петра Василенка  
вул. Енгельса 19, м. Харків, Україна, 61012

**А. П. Слесаренко**

Доктор фізико-математичних наук, професор, ведучий  
науковий співробітник,  
Лауреат Державної премії України  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України  
вул. Дм. Пожарського, 2/10, м. Харків, Україна, 61046

*Представлено результати дослідження системи автоматизованого контролю і керування режимом роботи спеціальних електронагрівників трубчастого типу, які входять до складу силових теплогенеруючих модулів електрообігрівної підлоги. Запропоновано конструктивне рішення системи автоматизованого контролю і керування та досліджено перехідні процеси в структурі багаторівневої електротеплоакуюючої підлоги системи мікроклімату виробничих тваринницьких споруд, яка працює за схемою «знизу-вверх»*

*Ключові слова: енергоефективність, екологічність, мікроклімат, електротеплоакуювання, автоматизація, економічність*

*Представлены результаты исследования системы автоматизированного контроля и управления режимом работы специальных электронагревателей трубчатого типа, которые входят в состав силовых теплогенерирующих модулей электрообогреваемого пола. Предложено конструктивное решение системы автоматизированного контроля и управления а также исследованы переходные процессы в структуре многоуровневого электротеплоакующего пола системы микроклимата производственных животноводческих помещений, которая работает по схеме «снизу-вверх»*

*Ключевые слова: энергоэффективность, экологичность, микроклимат, электротеплоаккумуляция, автоматизация, экономичность*

## 1. Вступ

Виробництво сільськогосподарської продукції в цілому і продукції тваринництва зокрема пов'язано з необхідністю створення і підтримання протягом виробничого циклу в тваринницьких спорудах специфічних умов оточуючого середовища, які входять в поняття мікроклімат.

Враховуючи природно-кліматичні умови України саме енерговитрати на формування заданих параметрів мікроклімату в виробничих тваринницьких спорудах (ВТС) значно впливають на збільшення собівартості одиниці продукції тваринництва та створюють серйозні проблеми на шляху подальшого розвитку цієї галузі.

## 2. Постановка проблеми

Перспективним напрямом рішення проблеми щодо зростання виробництва конкурентоспроможної екологічно чистої продукції тваринництва, наряду з іншим є створення енергоефективних автоматизова-

них електротехнічних комплексів для чіткого і надійного децентралізованого забезпечення стандартів теплового режиму мікроклімату в ВТС на основі технологій і систем електротеплоакуюючої опалення електрообігрівними підлогами [1 – 3]. До того ж електроопалення, як альтернатива поетапного зменшення кількості систем генерації тепла на органічному паливі, входить в першу десятку пріоритетних заходів реалізації цілей і завдань Енергетичної стратегії України на період до 2030 року.

Таким чином, створення автоматизованих систем теплоакуюючої електроопалення для ВТС АПК, які працюють за схемою «споживач-регулятор» на позапіковій електроенергії і не потребують введення нових енергогенеруючих потужностей, сприяє не тільки підвищенню ефективності використання енергоносіїв та діючого електрообладнання, але й позитивно впливає на процес регулювання потужності і частоти в енергосистемах протягом року, надаючи товаровиробникам сільськогосподарської продукції реальну можливість користуватись пільговими послугами сучасного енергоринку [4 – 6].

### 3. Літературний огляд

Аналіз наукової та науково-дослідницької літератури присвяченої тематиці розробки і дослідження автоматизованих систем опалення, як вітчизняних так і зарубіжних авторів [6 – 11], дозволив порівняти технічні характеристики і технологічні можливості відомих систем забезпечення мікроклімату в сільськогосподарських приміщеннях, розташованих в різних природно-кліматичних зонах і виявити сучасні тенденції і пріоритети в створенні і розвитку таких систем.

Отримані результати дають можливість узагальнити оцінку фахівців щодо переваг, які вони надають існуючим автоматизованим системам забезпечення мікроклімату до складу яких входять електрообігрівні підлоги.

Такі системи вважають більш ефективними з точки зору використання енергоносіїв і більш технологічними та уніфікованими з точки зору дотримання заданих параметрів мікроклімату в ВТС різного функціонально призначення. Розробка і дослідження автоматизованих систем забезпечення мікроклімату до складу яких входять електрообігрівні підлоги з метою забезпечення умов зростаючого розвитку виробництва сільськогосподарської продукції, а також більш раціонального використання енергетичних, інвестиційних і трудових ресурсів являє собою надто складну проблему, вирішення якої буде мати велике народногосподарське значення для економіки України [1, 2, 4].

Побудова енергозберігаючих автоматизованих електротехнологічних комплексів пов'язана з проблемою визначення раціональних теплоаккумуляційних властивостей, геометричних параметрів, структури та енергоефективних режимів роботи теплогенеруючих силових модулів, а також алгоритмів і програм функціонування їх систем автоматизованого контролю і керування енергопотоків живлення спеціальних нагрівальних елементів (НЕ) які б забезпечували термостабілізацію заданих рівнів впливу температури на біооб'єкти, протягом виробничого циклу, з урахуванням дії внутрішніх факторів і зовнішніх метеорологічних умов [12]. Мова йде про застосування автоматизованих, багаторівневих електротеплоаккумуляційних систем опалення (БЕТСО) ВТС гріючими підлогами зі структурно-функціональним керуванням рівнями енергопотоків традиційних і нетрадиційних відновлювальних джерел (НВДЕ), які живлять спеціальні електронагрівачі трубчастого типу (СЕТ), сформовані в т-ярусні блоки обігрівних секцій (ОС) та розміщені в теплоаккумуляційному наповнювачі траншей, виконаних у ґрунті підлог технологічно активних зон (ЗТА).

Разом з тим, відсутність системних, теоретичних і прикладних досліджень взаємозалежності геометричних параметрів, режимів роботи силових теплогенеруючих модулів та алгоритмів і обчислювальних програм систем автоматизованого вимірювання і контролю, робить проблематичною постановку питання про створення нових енергозберігаючих багатфункціональних електротехнологічних комплексів забезпечення теплового режиму мікроклімату в ВТС.

### 4. Мета статті

Розробка і дослідження систем автоматичного контролю і керування тепловим режимом на поверхні електрообігрівних підлог.

### 5. Основні матеріали дослідження спеціалізованої системи автоматичного контролю і екрування електрообігрівними підлогами

Розробка і дослідження автоматизованих систем контролю і керування роботою нагрівальних модулів БЕТСО передбачає дослідження її динамічних властивостей і визначення її передаточної функції. Це дозволить з'ясувати особливості перехідного процесу в силових теплогенеруючих модулях електрообігрівної підлоги, розробити рекомендації щодо структури динамічної настройки регулятора. Складність структури БЕТСО, як об'єкта регулювання, зумовлює певні труднощі отримання аналітичних рішень вище означених задач. Спочатку проведемо аналіз системи автоматичного регулювання (САР) на основі спрощеної моделі БЕТСО та залучення експериментальних даних, для оцінки її динамічних характеристик з метою забезпечення стійкого режиму роботи такої системи та обґрунтування пропозицій проектування її складових. Електрообігрівна підлога як об'єкт автоматичного керування характеризується відносно великими значеннями часу запізнювання ( $\tau$ ) і постійної часу нагріву ( $T_{\Pi}$ ), обумовлених низькою теплопровідністю матеріалів підлоги і їх значною масою.

Враховуючи сказане, передаточна функція електротеплоаккумуляційної підлоги може бути записана у вигляді послідовно сполучених аперіодичної ланки і ланки із запізнюванням (1)

$$W_4(p) = \frac{x_{(вих)}(p)}{x_{(вх)}(p)} = \frac{k_{\Pi}}{T_{\Pi}p + 1} e^{-\tau p}, \quad (1)$$

де  $\tau$  – час запізнювання, год.;  $T_{\Pi}$  – постійна часу нагріву підлоги, год.;

$k_{\Pi}$  – коефіцієнт передачі підлоги, °С/Дж.

В [1] було проведено системний аналіз конструктивних і експлуатаційних характеристик електрообігрівних підлог в виробничих спорудах АПК різного функціонального призначення та обґрунтовано, що для автоматизації управління СЕТ електрообігрівної підлоги доцільно використовувати тиристорний регулятор напруги, передаточна функція якого має вигляд (2)

$$W_2(p) = \frac{x_{(вих)}(p)}{x_{(вх)}(p)} = k_{\Pi}, \quad (2)$$

де  $k_{\Pi}$  – коефіцієнт передачі регулятора, А/°С.

СЕТ підлоги, що нагріваються, можуть бути описані безінерційною ланкою (3)

$$W_3(p) = \frac{x_{(вих)}(p)}{x_{(вх)}(p)} = k_{не}, \quad (3)$$

де  $k_{не}$  – коефіцієнт передачі нагрівальних елементів підлоги, Дж/А.

Для керування тиристорним регулятором напруги застосовується фазозсувний пристрій вертикального управління. Його передаточна функція визначається у вигляді (4)

$$W_1(p) = \frac{x_{(вих)}(p)}{x_{(вх)}(p)} = k_{\phi c}, \tag{4}$$

де  $k_{\phi c}$  – коефіцієнт передачі фазозсувного пристрою, °С/В.

При безпосередньому під'єднанні СЕТ до електромережі їх пусковий струм перевищує у декілька разів струм в номінальному режимі навантаження. Це викликає додаткові навантаження на силову мережу і трансформаторну підстанцію, збільшуючи експлуатаційні та капітальні витрати.

Для запобігання цього в САР БЕТСО необхідно встановити систему обмеження пускових струмів СЕТ. Запропонована схема представлена на рис. 1. Маючи це за мету, проведемо аналіз динамічних властивостей БЕТСО.

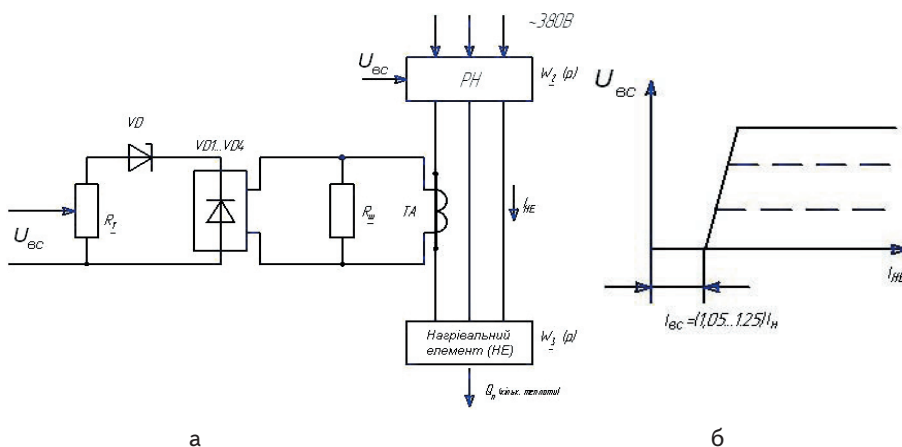


Рис. 1. Електрична схема системи обмеження пускових струмів спеціальних трубчастих електронагрівників і графік напруги відсічки струму, що подається на вхід фазозсувного пристрою тиристорного регулятора напруги: а – електрична схема системи обмеження пускових струмів спеціальних трубчастих електронагрівників, б – графік напруги відсічки струму, що подається на вхід фазозсувного пристрою тиристорного регулятора напруги

Значення напруги відсічки  $U_{bc}$  встановлюється резистором  $R_y$ . Чітке спрацьовування при заданому струмі відсічки забезпечується установкою в коло випрямленої напруги стабілітрона VD. Напруга  $U_{bc}$  подається в систему керування РН забезпечуючи необхідну зміну струму нагрівальних елементів (НЕ) СЕТ. САР БЕТСО для отримання високої точності стабілізації температури має бути виконана по замкнутій схемі керування з від'ємним зворотним зв'язком. У коло зворотного зв'язку включається датчик температури. Його передаточна функція може бути прийнята, як підсилююча регульовальна ланка у вигляді (5)

$$W_5(p) = \frac{x_{(вих)}(p)}{x_{(вх)}(p)} = k_{зз}. \tag{5}$$

Для врахування дії впливу температури усередині приміщення ( $\Theta_v$ ) на температуру підлоги ( $\Theta_{п}$ ) в структурну схему САР включений елемент, що враховує дане збурення. При включенні цього елемента на вихід САР його передаточна функція матиме вигляд (6)

$$W_7(p) = \frac{x_{(вих)}(p)}{x_{(вх)}(p)} = \frac{k_c \cdot e^{tp}}{T_{п}p + 1}, \tag{6}$$

де  $k_c$  – коефіцієнт передачі елемента для врахування зовнішнього збурення.

Враховуючи сказане, розроблена структурна схема САР БЕТСО, яка представлена на рис. 2.

Нижче наведені значення параметрів БЕТСО, коефіцієнтів передачі і постійних часу елементів САР, які потрібні для аналізу динамічних властивостей системи:

- 1)  $\Theta_{оп} = 30^\circ\text{C}$  – задана температура нагріву поверхні підлоги;
- 2)  $Q_{п} = 11760$  Дж – кількість тепла, що виділяється всіма НЕ СЕТ за 1 с;
- 3)  $I_{\phi} = 17,8$  А – номінальний струм фази;
- 4)  $P_{\phi} = 3920$  Вт – активна потужність НЕ;
- 5)  $U_{\phi} = 220$  В – номінальна фазна напруга живлення НЕ СЕТ;
- 6)  $x_{вх} = U_{вх} = 40$  В – напруга керування САР БЕТСО;
- 7)  $k_{\phi 3} = \frac{\Phi_U}{U_{\phi 3}} = 1,46^\circ\text{C}/\text{В}$  – коефіцієнт передачі фазозсувного пристрою і системи керування тиристорного регулятора напруги;
- 8)  $k_{рн} = \frac{I_{не}}{\Phi_U} = 0,3$  А/°С – коефіцієнт передачі силової частини тиристорного регулятора напруги;
- 9)  $k_{не} = \frac{Q_{п}}{I_{не}} = 661$  Дж/А – коефіцієнт передачі НЕ СЕТ;
- 10)  $k_{п} = \frac{\Theta_{оп}}{Q_{п}} = 2,6 \cdot 10^{-3}$  °С/Дж – коефіцієнт передачі БЕТСО;

11)  $k_c = \frac{\Delta\Theta_c}{\Theta_{п}} = 0,05$  – коефіцієнт чутливості САР до дії збурення;

12)  $\Delta\Theta_c = 0,5^\circ\text{C}$  – допустиме значення статичної помилки САР БЕТСО у сталому режимі роботи;

13)  $\Theta_{в} = \Theta_{нс} = 10^\circ\text{C}$  – температура усередині приміщення з БЕТСО;

14)  $\tau = 4,5$  год. – час запізнювання нагріву поверхні підлоги;

15)  $T_{п} = 5,1$  год. – постійна нагріву підлоги;

16)  $\Delta\Theta_{п} = \Theta_{оп} - \Theta_{нс} = 20^\circ\text{C}$  – температура перегріву підлоги щодо навколишнього середовища.

Використовуючи структурну схему (рис. 2) визначимо передаточну функцію замкнutoї САР по дії керування.

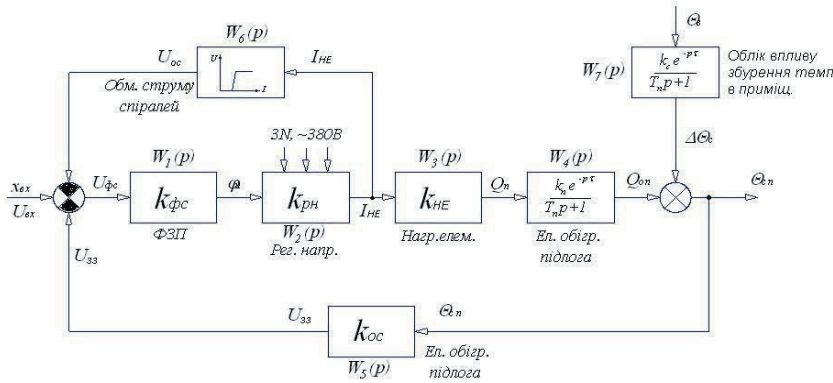


Рис. 2. Структурна схема системи автоматичного регулювання електрообігріву підлоги

Результати вирішення рівняння (10) для випадку регулювання (1) приведено в табл. 2, а графік показано на рис. 3 (крива 1).

$$\Delta\Theta_{\max 2} = \frac{3,4 \cdot 100}{30} = 11,3\% ;$$

$$\Delta\Theta_{\max 3} = \frac{2,7 \cdot 100}{30} = 9,0\% .$$

$$t_{p1} = 12 \text{ год.}; t_{пп1} = 12 + 4,1 = 16,1 \text{ год.};$$

$$t_{п2} = 18 \text{ год.}; t_{пп2} = 18 + 4,1 = 22,1 \text{ год.}$$

$$W_{зс}(p) = \frac{x_{вих}(p)}{x_{вх}(p)} = \frac{\Theta_{ст}(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p) \cdot W_5(p)} = \frac{k_{pc} e^{-p\tau}}{(T_{п1}p + 1) + k_{pc} k_{oc} e^{-p\tau}}$$

$$t_{п3} = 14,7 \text{ год.}; t_{пп3} = 14,7 + 4,1 = 18,8 \text{ год.};$$

$$t_{п4} = 20 \text{ год.}; t_{пп4} = 20 + 4,1 = 24,1 \text{ год.}$$

Таблиця 1

Види регулювання БЕТСО

№	Вид апроксимації експоненти	Характер регулювання
1	$e^{-p\tau} = 1$	Пропорційний
2	$e^{-p\tau} = \frac{1}{\tau p + 1}$	Пропорційний
3	$e^{-p\tau} = \frac{-\tau p + 1}{(\tau p + 1)}$	Пропорційний
4	$e^{-p\tau} = \frac{-\tau p + 1}{\tau p + 1}$	Пропорційно-диференціальний

де  $k_{pc} = k_{фз} \cdot k_{рн} \cdot k_{не} \cdot k_{п} = 1,46 \cdot 0,3 \cdot 661 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} = 0,753$  – коефіцієнт передачі розімкненої САР;  $k_{зз}$  – коефіцієнт від'ємного зворотного зв'язку.

Для спрощення дослідження та аналізу кривих перехідного процесу САР покладемо, що  $\tau = 0$ . Тоді передаточна функція замкнутої САР (7) матиме вигляд (8)

$$W_{зс}(p) = \frac{k_{pc} e^{-p\tau}}{T_{п1}p + (1 + k_{pc} k_{зз})} = \frac{b_0}{a_1 p + a_0}$$

Таблиця 2

Динаміка нагріву ЕТСО (1)

t, год.	0	1	4	8	12
$\Theta_c, ^\circ\text{C}$	10	15,2	24,1	28,4	29,54

де  $b_0 = k_{pc} = 0,753$ ,  $a_1 = T_{п1} = 5,1$  год.;

$a_0 = 1 + k_{pc} k_{зз} = 1 + 0,753 \cdot 0,8 = 1,6$  – коефіцієнт передачі замкнутої САР.

$$a_1 p + a_0 = 0, \tag{9}$$

Знаходимо корінь рівняння (9):

$$p_1 = -\frac{a_0}{a_1} = -\frac{1,6}{5,1} = -0,31.$$

Початкові умови при  $t=0$  приймаємо такі:  $\Theta_{поч} = 10^\circ\text{C}$ ;  $\Theta_y = 30^\circ\text{C}$ .

З урахуванням наведених умов рівняння перехідного процесу має наступний вигляд:

$$\Theta_c(t) = \Theta_y(1 - e^{p_1 t}) + \Theta_{поч} e^{p_1 t} = 30(1 - e^{-0,31t}) + 10e^{-0,31t}, \tag{10}$$

Реалізація того або іншого виду регулювання буде визначатись видом апроксимації часової експоненти  $e^{-p\tau}$  (табл. 1).

Проведемо аналіз для випадку апроксимації (2) з табл. 1.

Зазначимо, що така заміна досить часто використовується при аналізі САР з ланкою запізнювання. При цьому передаточна функція (7) буде представлена у вигляді виразу (11)

$$W_{зс}(p) = \frac{k_{pc} \frac{1}{(\tau p + 1)}}{(T_{п1}p + 1) + k_{pc} k_{oc} \frac{1}{(\tau p + 1)}} = \tag{11}$$

$$= \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$

$$\text{де } b_0 = k_{pc} = 0,753 ; \tag{12}$$

$$a_0 = 1 + k_{pc} k_{зз} = 1 + 0,753 \cdot 0,8 = 1,6 ;$$

$$a_1 = T_n + \tau = 5,1 + 4,5 = 9,6;$$

$$a_2 = T_n \tau = 5,1 \cdot 4,5 = 22,95.$$

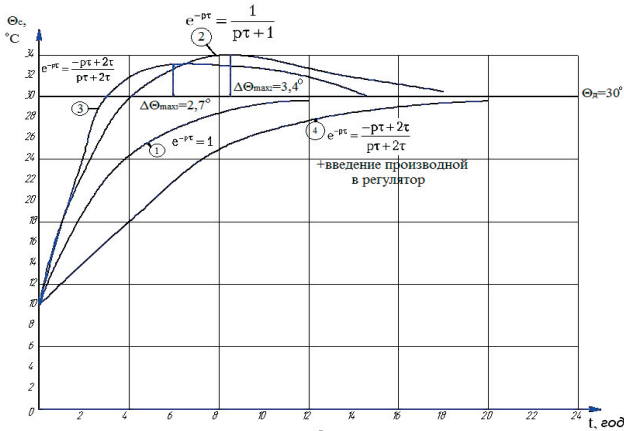


Рис. 3. Графіки перехідних процесів в САР при пуску БЕТСО: 1, 2, 3, 4 – криві перехідних процесів в структурі БЕТСО

Для вище визначених числових значень змінних характеристичне рівняння САР має наступний вигляд (13)

$$22,95p^2 + 9,6p + 1,6 = 0,$$

або розділивши на  $a_2 = 22,95$ , отримуємо:

$$p^2 + 0,42p + 0,07 = 0, \tag{13}$$

Знаходимо корені характеристичного рівняння (14)

$$P_{1,2} = -\frac{0,42}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{0,42}{2}\right)^2 - 0,07} = -0,21 \pm j0,16, \tag{14}$$

$$\alpha = -0,21; \quad \omega = 0,16 \text{ c}^{-1};$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega}{\alpha} = \arctg \frac{0,16}{-0,21} = \arctg(-0,761) = -37 \text{ град.}$$

$$\varphi_n = 360 - (\varphi) = 360 - 37 = 323 \text{ град.};$$

$$\sin \varphi_n = \sin 323 \text{ град.} = -0,6.$$

Знаходимо постійну інтегрування:

$$A = \frac{\Theta_{\text{поч}} - \Theta_y}{\sin \varphi_n} = \frac{10 - 30}{-0,6} = 33,3.$$

Рівняння перехідного процесу САР при пуску БЕТСО має вигляд (15)

$$\begin{aligned} \Theta_c(t) &= \Theta_y + Ae^{\alpha t} \sin(57,3\omega t + \varphi_n) = \\ &= 30 + 33,3e^{-0,21t} \sin(57,3 \cdot 0,16 + 323^\circ) = \\ &= 30 + 33,3e^{-0,21t} \sin(9,2t + 323^\circ). \end{aligned} \tag{15}$$

Підставляючи в рівняння (15) значення часу  $t$ , знайдемо значення температури  $\Theta_c(t)$ . Результати розрахунку приведені в табл. 3 і в графічному вигляді на рис. 3 (крива 2).

Таблиця 3

Динаміка нагрівання підлоги (2)						
t, год.	0	2	4,1	9	14,1	18
$\Theta_c, ^\circ\text{C}$	10	22,8	30	34,2	31,7	30,5
Примітка/тлумачення: перерегулювання						
$\Delta\Theta_{\text{макс 2}} = \frac{3,4 \cdot 100}{30} = 11,3\%$						

Розв'язок рівняння (15) показує, що перехідний процес в САР має коливальний характер з перерегулюванням. З'ясуємо, як добитися виконання умови для отримання аперіодичного режиму перехідного процесу. Як відомо, для цього необхідно, щоб корені характеристичного рівняння були дійсними. Для цього необхідно, щоб детермінант квадратичного рівняння був більше нуля:  $a_1^2 - 4a_2a_0 > 0$ . Для нашого випадку це означає:  $(T_n + \tau)^2 - 4T_n\tau \cdot k_{зс} > 0$ . Звідси знаходимо величину коефіцієнта передачі замкнутої САР БЕТСО (16)

$$k_{зс} < \frac{(T_n + \tau)^2}{4T_n\tau}, \tag{16}$$

Підставляючи значення  $T_n = 5,1$  год. і  $\tau = 4,5$  год. в (16), знайдемо  $k_{зс} < \frac{(5,1 + 4,5)^2}{4 \cdot 5,1 \cdot 4,5} = 1$ , що для замкнутої САР БЕТСО виконати неможливо.

Таким чином, для САР БЕТСО для прийнятого наближення великих значень постійної нагріву  $T_n$  і запізнювання  $\tau$ , (причому вони мало відрізняються одна від одної) характерним буде коливальний перехідний процес.

Перейти до аперіодичного процесу можна лише шляхом розімкнення системи керування, що недоцільно, оскільки така система не забезпечить необхідної точності роботи у сталому режимі.

Замінімо функцію  $e^{-pt}$  на перший член її розкладання в ряд Паде  $e^{-pt} = \frac{-\tau p + 2}{\tau p + 2}$ . Тоді передаточна функція замкнутої САР (7) буде представлена виразом (17)

$$\begin{aligned} W_{зс}(p) &= \frac{k_{pc} e^{-pt}}{(T_n p + 1) + k_{pc} k_{зс} e^{-pt}} = \\ &= \frac{k_{pc} \frac{-\tau p + 2}{\tau p + 2}}{(T_n p + 1) + k_{pc} k_{зс} \frac{-\tau p + 2}{\tau p + 2}} = \frac{v_1 p + v_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \end{aligned} \tag{17}$$

$$\text{де } v_1 = 2k_{pc}\tau = -0,753; \quad v_0 = 2k_{pc} = 2 \cdot 0,753 = 1,51;$$

$$a_0 = 2k_{зс} = 2 \cdot 1,6 = 3,2; \quad a_2 = T_n \tau = 5,1 \cdot 4,5 = 22,95;$$

$$a_1 = 2T_n + \tau - k_{pc} k_{зс} \tau = 2 \cdot 5,1 + 4,5 - 0,753 \cdot 0,8 \cdot 4,5 = 12.$$

Для вищенаведеного випадку характеристичне рівняння САР приймає вигляд квадратичного рівняння (18)

$$a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (18)$$

або в числовому вигляді:  $22.95p^2 + 12p + 3.2 = 0$ , або (19)

$$p^2 + 0,52p + 0,14 = 0. \quad (19)$$

Знаходимо корені характеристичного рівняння:

$$P_{1,2} = -\frac{0,52}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{0,52}{2}\right)^2 - 0,14} = -0,26 \pm j27$$

$$\alpha = -0,26; \quad \omega = 0,27 \text{ c}^{-1};$$

$$\phi = \arctg \frac{x}{\alpha} = \arctg \frac{0,27}{-0,26} = -46^\circ;$$

$$\varphi_n = 360 - (\phi) = 360 - 46 = 314^\circ.$$

Розв'язання рівняння (19) дає таку динаміку температури БЕТСО (20)

$$\begin{aligned} \Theta_c(t) &= \Theta_y + Ae^{\alpha t} \sin(57.3\omega t + \varphi_n) = \\ &= 30 + 27.8e^{-0,26t} \sin(57.3 \cdot 0,27t + 314^\circ) = \\ &= 30 + 27.8e^{-0,216t} \sin(15.5t + 314^\circ), \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{де } A = \frac{\Theta_{\text{поч}} - \Theta_y}{\sin 314^\circ} = \frac{10 - 30}{-719} = 27.8^\circ. \quad (21)$$

Результати числового розрахунку (20) приведені в табл. 4, а графік передаточної функції – на рис. 3 (крива 3).

Таблиця 4

Динаміка нагрівання підлоги (криві 2, 3)

t, год.	0	2	3	4	9	14,7	Примітка [тлумачення]: перерегулювання $\Delta\Theta_{\text{макс}2} = \frac{2.7 \cdot 100\%}{30} = 9\%$
$\Theta_c, ^\circ\text{C}$	10	23	30	31,8	32,7	30	

Аналіз кривих перехідного процесу  $\Theta_c=f(t)$  показує, що в САР має місце перерегулювання температури (криві 2, 3), що небажано.

Отже бажано змінити закон регулювання, щоб підвищити точність роботи САР в динамічному режимі.

Для цієї мети приймемо не пропорційний закон регулювання («П»), а пропорційно-диференціальний (ПД).

Передаточна функція регулятора в цьому випадку має бути наступною (22)

$$W_2(p) = k_{\text{пр}}(1 + T_d p), \quad (22)$$

де  $T_d$  – постійна часу диференціювання.

Для цього можна використати операційний підсилювач, охоплений глибоким зворотним зв'язком, як показано на рис. 4.

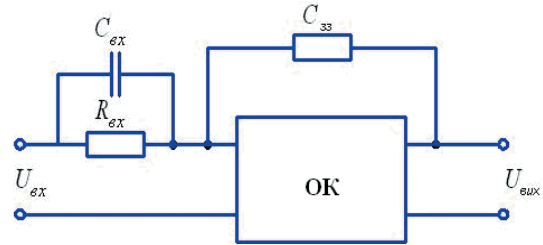


Рис. 4. Функціональна схема ПД-регулятора

Для даного регулятора коефіцієнт передачі визначається у вигляді  $k_{\text{рн}} = \frac{R_{\text{зз}}}{R_{\text{вх}}}$ , а постійна часу диференціювання  $T_d = R_{\text{вх}} \cdot C_{\text{вх}}$ .

Встановивши ПД-регулятор в САР і прийнявши замість  $e^{-pt}$  функцію  $e^{-pt} = \frac{-\tau p + 2}{\tau p + 2}$ , використовуючи спрощену структурну схему, приведену на рис. 5, знайдемо передаточну функцію замкнутої САР. В результаті, прийнявши  $T_d=2$  год., отримаємо передаточну функцію замкнутої САР по дії керування (23)

$$\begin{aligned} W_{\text{зс}}(p) &= \frac{x_{\text{вих}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \\ &= \frac{k_{\text{фз}} k_{\text{рн}} (1 + T_d p) k_{\text{не}} k_{\text{п}} (-\tau p + 2)}{(T_n p + 1)(\tau p + 2)} =, \quad (23) \\ &= \frac{k_{\text{фз}} k_{\text{рн}} (1 + T_d p) k_{\text{не}} k_{\text{п}} (-\tau p + 2) k_{\text{зз}}}{1 + \frac{k_{\text{фз}} k_{\text{рн}} (1 + T_d p) k_{\text{не}} k_{\text{п}} (-\tau p + 2) k_{\text{зз}}}{(T_n p + 1)(\tau p + 2)}} \\ &= \frac{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \end{aligned}$$

$$\text{де } b_0 = 2k_{\text{рн}} = 2 \cdot 0,753 = 1.51;$$

$$b_1 = k_{\text{рн}}(2T_d - \tau) = 0,753(2 \cdot 2 - 4,1) = 0,08;$$

$$b_2 = -k_{\text{рн}} T_d \tau = -2 \cdot 4,1 \cdot 0,753 = -6,2;$$

$$a_0 = 2(1 + k_{\text{рн}} k_{\text{зз}}) = 2(1 + 0,753 \cdot 0,8) = 3,2;$$

$$\begin{aligned} a_1 &= 2(T_n + \tau) - k_{\text{рн}} k_{\text{зз}} (2T_n - \tau) = \\ &= 2(5,4 + 4,1) + 0,753 \cdot 0,8(2,2 - 4,1) = 19; \end{aligned}$$

$$a_2 = T_n \tau - k_{\text{рн}} T_d \tau = 5,4 \cdot 4,1 - 0,753 \cdot 2 \cdot 4,1 = 15,9.$$

Характеристичне рівняння САР приймає вид (24)

$$15,9p^2 + 19p + 3.2 = 0, \text{ або}$$

$$p^2 + 1,2p + 0,2 = 0. \quad (24)$$

Знаходимо корені рівняння (24):

$$P_{1,2} = -\frac{1,2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{1,2}{2}\right)^2 - 0,2} = -0,6 \pm 0,4, \quad P_1 = -0,2; \quad P_2 = -1.$$

Постійні інтегрування перехідного процесу:

$$A_1 = -\frac{P_2(\Theta_{\text{поч}} - \Theta_y)}{P_1 - P_2} = \frac{(-1)(10 - 30)}{-0,2 + 1} = -25;$$

$$A_2 = \frac{P_1(\Theta_{нач} - \Theta_y)}{P_1 - P_2} = \frac{(-0,2)(10 - 30)}{-0,2 + 1} = 5.$$

Рівняння перехідного процесу САР приймає вид (25)

$$\Theta_c(t) = \Theta_y - A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} = 30 - 25e^{-0,2t} + 5e^{-t}. \quad (25)$$

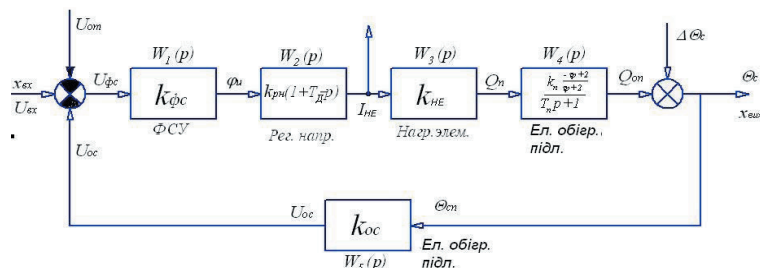


Рис. 5. Спрощена функціональна схема САР з ПД-регулятором

Результати обчислення рівняння (25) приведені в табл. 5 і на рис. 3 (крива 4).

Таблиця 5

Динаміка нагрівання поверхні підлоги (4)

t, год.	0	4	8	12	16	20	Примітка: перерегулювання відсутнє
Θ <sub>c</sub> , °C	10	18	25	27,7	29	29,5	

Графік кривої перехідного процесу Θ<sub>c</sub>(t) показує, що введення похідної в закон регулювання дозволив усунути перерегулювання і перейти від коливального режиму до аперіодичного.

## 6. Висновки

Наявність ланки запізнювання в САР, обумовленої інерційністю нагрівання масиву підлоги, і застосування пропорційного регулятора, передаточна функція якого W(p)=k<sub>1</sub>, приводить до того, що перехідний процес при нагріві підлоги носить коливальний характер з наявністю перерегулювання порядку ΔΘ<sub>c</sub>=11,3%.

Таке значення перерегулювання на практиці не допустиме, оскільки воно носить тривалий характер.

1. Для поліпшення якості перехідного процесу з метою підвищення точності роботи САР доцільно змінити закон регулювання і застосувати пропорційно-диференціальний регулятор з передаточною функцією W<sub>2</sub>(p)=k<sub>рн</sub>(1+T<sub>д</sub>p). Такий регулятор легко реалізується за допомогою застосування операційного підсилювача з від'ємним зворотним зв'язком. Підбираючи значення постійної диференціювання T<sub>д</sub>

можна не тільки зменшити ефект перерегулювання, але і перевести перехідний процес в аперіодичний режим.

2. При проектуванні САР запізнювання найзручніше врахувати шляхом введення в коло зворотного зв'язку ланки, яка описується функцією e<sup>-pt</sup> і розкладання її в ряд Паде у вигляді e<sup>-pt</sup> =  $\frac{-\tau p + 2}{\tau p + 2}$ .

Зважаючи на порівняно велику кількість виробничих споруд АПК, які доцільно було б забезпечувати електротеплоакумулюючими системами опалення типу «тепла підлога», запропоновані автоматизовані системи опалення типу БЕТСО можна рекомендувати, як ефективні споживачі-регулятори в періоди провалу графіків добових навантажень електричних мереж.

## Література

1. Круковский, П. Г. Тепловые режимы полов различных конструкций с электрокабельными системами обогрева [Текст] / П. Г. Круковский, Н. П. Тимченко, О. Ю. Судак // Промышл. теплотехн, 2002. – Т. 24, №1. – С. 10-16.
2. Пат. 63667А UA, МКІ А 01 К 1/015. Установка для забезпечення теплового режиму виробничих приміщень і споруд / М. А. Романченко, А. П. Слесаренко, О. С. Сорока, О. О. Румянцев (UA). – №2003054650; Заявл. 22.05.2003; Опубл. 15.01.2004; Бюл. №1. – 2
3. Engineering manual of automatic control for commercial buildings [Текст] / Honeywell Inc. – 1997. – С. 502.
4. Романченко, М. А. Энергозберігаючі електротехнології забезпечення стандартів теплового режиму виробничих споруд АПК з електрообігрівними підлогами [Текст] / М. А. Романченко, Д. І. Мазоренко, А. П. Слесаренко, О. С. Сорока // Електрифік. та автоматиз. сільського господарства. – 2006, №2. – С. 82-92.
5. Табунщиков, Ю. А. Энергоэффективные здания: мировой и отечес-твенный опыт [Текст] / Ю. А. Табунщиков // Энергия. – 2004, №10. – С. 20-28; № 11. – С. 26-29;
6. Popescu, D. A new solution for automatic control of heating systems in buildings based on measuring heat transfer through outer surfaces [Текст] / D. Popescu // ACMOS'08 Proc. of the 10th WSEAS Int. Conf. on Automatic Control, Modelling & Simulation. – 2008. – P. 206-208.
7. Розинський, Д. Й. Електрична кабельна система опалення в тепло-акумуляційному режимі (ЕКСО-ТА) житлових сільськогосподарських будинків [Текст] / Д. Й. Розинський // Будівництво України, 2002, №5. – С. 32-35.
8. Dryden, I. G. C. The Efficient Use of Energy [Текст] / I. G. C. Dryden // 2nd Ed., Butterworth Scientific, Oxford. – 1982.
9. Davies, E. J. Conduction and Induction Heating [Текст] / E. J. Davies // IEE Power Engineering Series II, Peter Peregrinus Ltd., London. – 1990.
10. Saving Energy with Electric Resistance Heating [Текст] / DOE/GO-10097-381, FS 230, October. – 1997.
11. Domestic Heating Compliance Guide [Текст] / Domestic Heating Compliance Guide 2-nd edition. – 2008. – С. 72.
12. Building automation – impact on energy efficiency. Application per EN 15232:2012 eu.bac product certification [Текст] / Siemens Switzerland Ltd. – 2012. – С 132.