

УДК 681.51.01

DOI: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-08>

АВТОМАТИЗАЦІЯ ЗАХИСТУ ВОДОГОНУ ВІД ПРОМЕРЗАННЯ З РЕГУЛЮВАННЯМ ЗА ЗБУРЕННЯМ

Іносов С. В., к.т.н., доц., Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-8305-5514>, Inosov.sv@knuba.edu.ua

Ілларіонов В. М., к.т.н., доц., Київський електромеханічний фаховий коледж, Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-6952-9290>, infcentr@i.ua

Сабалаєва Н. О., к.т.н., доц., Київський електромеханічний фаховий коледж, Київ, Україна. <http://orcid.org/0000-0002-7015-1811>, natsab152@gmail.com

Анотація. Сучасна технологія дає змогу боротися із замерзанням водогонів у помірних і північних широтах за допомогою електричного гріючого кабелю, прокладеного на поверхні труби. Зазвичай використовується принцип регулювання за відхиленням, із контуром негативного зворотного зв'язку, із використанням датчиків температури, установлених у глибині ґрунту. Це вимагає додаткових витрат і зменшує надійність системи, виникає проблема точності вимірювання за існування локальних неоднорідностей температурного поля в ґрунті. У роботі пропонується для автоматизації захисту водогону від промерзання використовувати регулювання за збуренням, із вимірюванням температури повітря і розрахунком температури на глибині, із використанням динамічної моделі розповсюдження теплової хвилі в глибину ґрунту. Запропонована схема дає такі переваги: не треба встановлювати спеціальні датчики температури в глибині, що зменшує витрати і збільшує надійність системи, можна обійтися плинними даними Гідрометцентру; впливи можливих локальних неоднорідностей теплового поля ґрунту виключаються; можлива централізована реалізація системи, локальним підсистемам залишаться тільки функції включення (виключення) нагріву окремих водогонів по командах з єдиного центру. На жаль, точна теоретична модель розповсюдження теплової хвилі вглиб ґрунту непридатна для безпосередньої реалізації на мікроконтролері програмно в реальному часі, бо вона є іраціональною передаточною функцією. У роботі поставлено і вирішено оптимізаційне завдання раціоналізації передаточної функції теплової інерційності ґрунту у вигляді наближеної дробово-раціональної передаточної функції третього порядку із запізненням. У результаті отримано універсальну практичну модель динаміки розповсюдження теплової хвилі вглиб ґрунту, придатну для будь-яких ґрунтів і будь-яких глибин, яка зручно реалізується програмно в реальному часі кроковими методами і забезпечує достатню для практики точність.

Ключові слова: водогін, захист, промерзання, регулювання, збурення, динамічна модель, теплова хвиля.

AUTOMATION OF WATER PIPES PROTECTION FROM FREEZING WITH REGULATION BY DISTURBANCE

Serhiy Inosov, Ph.D., Ass. Prof., Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0001-8305-5514>, Inosov.sv@knuba.edu.ua

Valerii Illarionov, Ph.D., Ass. Prof., Kyiv Electromechanical Vocational College, Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-6952-9290>, infcentr@i.ua

Nataliya Sabalaeva, Ph.D., Ass. Prof., Kyiv Electromechanical Vocational College, Kyiv, Ukraine. <http://orcid.org/0000-0002-7015-1811>, natsab152@gmail.com

Abstract. Modern technology allows you to fight the freezing of water pipes in temperate and northern latitudes with the help of an electric heating cable laid on the surface of the pipe. Usually, the principle of deviation control is used, with a negative feedback loop, using temperature sensors installed in the depth of the soil. This requires additional costs and reduces the reliability of the system, there is a problem of measurement accuracy in the presence of local inhomogeneities of the temperature field in the soil. In the work, it is proposed to use disturbance control, with air temperature measurement and depth temperature calculation, using a dynamic model of heat wave propagation in the depth of the soil, to automate the protection of the water line against freezing. The proposed scheme provides the following advantages. There is no need to install special temperature sensors in the depth, which reduces costs and increases the reliability of the system, you can get by with the

current data of the hydrometeorological center. The effects of possible local inhomogeneities of the thermal field of the soil are excluded. Centralized implementation of the system is possible, local subsystems will only have the function of turning on (off) the heating of individual water pipes by commands from a single center. Unfortunately, the exact theoretical model of heat wave propagation deep into the soil is not suitable for direct implementation on a microcontroller in real-time software, because it is an irrational transfer function. In the work, the optimization problem of rationalization of the transfer function of thermal inertia of the soil in the form of an approximate fractional-rational transfer function of the third order with a delay is set and solved. As the result, a universal practical model of the dynamics of heat wave propagation deep into the soil was obtained, suitable for any soil and any depth, which can be conveniently implemented by software in real time by step methods and provides sufficient accuracy for practice.

Key words: water pipe, protection, freezing, regulation, disturbance, dynamic model, heat wave.

Вступ

Водогони в помірних і північних широтах можуть виходити з ладу в результаті промерзання. Сучасна технологія дає змогу боротися із замерзанням водогонів за допомогою випуску води або електричного гріючого кабелю, прокладеного на поверхні труби [6]. Нагрівання або випуск води регулюється спеціальною автоматикою. Автоматика дає змогу мінімізувати витрати електроенергії за рахунок оптимального регулювання теплового режиму. Такі автоматичні системи збільшують капітальні та експлуатаційні витрати, але їх застосування виправдується, тому що у разі замерзання трубу необхідно відкопувати й замінити, із чим пов'язані великі витрати і перерви у водопостачанні. Зазвичай використовується принцип регулювання за відхиленням, із контуром негативного зворотного зв'язку, із використанням датчиків температури, установлених у глибині ґрунту. Це вимагає додаткових витрат і зменшує надійність системи, виникає проблема точності вимірювання за існування локальних неоднорідностей температурного поля в ґрунті.

Для автоматизації захисту водогону від промерзання пропонується використовувати регулювання за збуренням, із вимірюванням температури повітря і розрахунком температури на глибині, із використанням динамічної моделі розповсюдження теплової хвилі в глибину ґрунту. Це дає такі переваги: не треба встановлювати спеціальні датчики температури в глибині, що зменшує витрати і збільшує надійність системи, можна обійтися плинними даними Гідрометцентру; впливи можливих локальних неоднорідностей теплового поля ґрунту виключаються; можлива централізована реалізація системи, локальним підсистемам залишаться тільки функції включення (виключення) нагріву окремих водогонів по командах з єдиного центру. На жаль, відома теоретична модель розповсюдження теплової хвилі вглиб ґрунту [7] непридатна для безпосередньої реалізації на мікроконтролері програмно в реальному часі, бо вона є ірраціональною передаточною функцією.

Мета роботи – отримати універсальну практичну модель динаміки розповсюдження теплової хвилі вглиб ґрунту, придатну для будь-яких ґрунтів і будь-яких глибин, яка зручно реалізується програмно в реальному часі кроковими методами і забезпечує достатню для практики точність для автоматизації захисту водогонів від промерзання з регулюванням за збуренням.

Виконання досліджень

Як приклад об'єкта регулювання розглянемо водогін із гріючим кабелем, хоча для системи з випуском води можна застосувати аналогічну схему. Функціональну схему регулювання за збуренням, що пропонується, наведено на рис. 1. Основним збуренням, що вимірюється, є зміна температури повітря (похолодання). Регулюється потужність нагріву залежно від розрахункової температури на глибині закладення трубопроводу за розімкнутою схемою (без зворотного зв'язку).

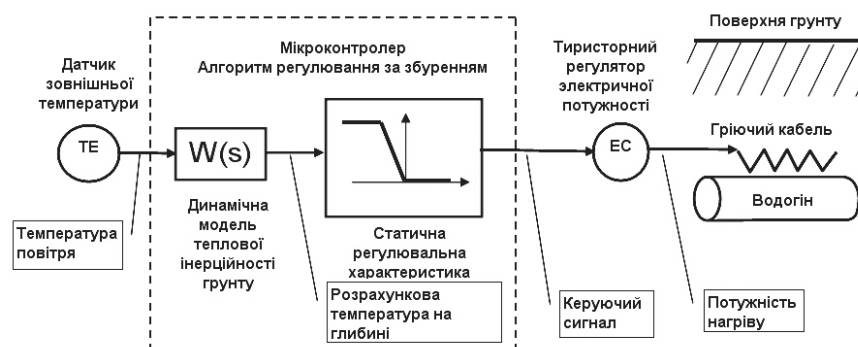


Рис. 1. Функціональна схема регулювання за збуренням

Між зовнішньою температурою та температурою в глибині є значні розбіжності через теплову інерційність ґрунту (рис. 2).

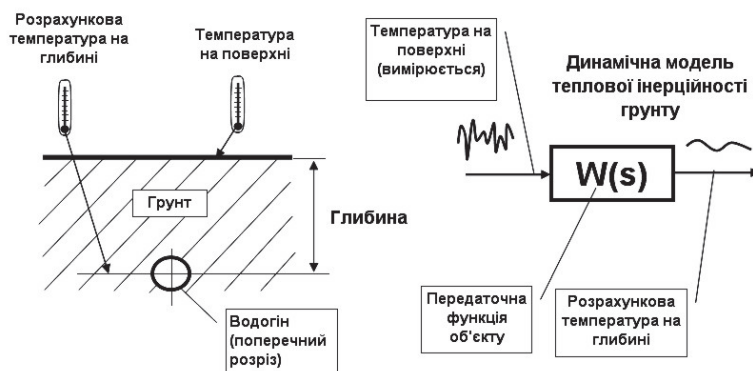


Рис. 2. Динамічна модель теплової інерційності ґрунту

Саме тому регулювання потужності нагрівання потрібно здійснювати за розрахунковою глибинною температурою, а не за температурою на поверхні. Потужність нагрівання рекомендується регулювати пропорційно (можливий варіант – релейне двопозиційне регулювання в режимі «включено/виключено») розрахунковій негативній температурі на глибині в межах від нуля до номінальної потужності. Така схема дає декілька переваг:

1. Не треба встановлювати спеціальні датчики температури в глибині, що зменшує витрати і збільшує надійність системи, можна обійтися плинними даними Гідрометцентру.
2. Теплова інерційність ґрунту враховується інтегрально, а не локально, тому впливи можливих локальних неоднорідностей теплового поля на датчики виключаються.
3. Можлива централізована реалізація системи для обслуговування всіх водогонів у певному регіоні. Локальним підсистемам залишаться тільки функції включення (виключення) нагріву по командах з єдиного центру.

Під час програмної реалізації запропонованої схеми (рис. 1, 2) у реальному часі виникає така проблема. Лінійні стаціонарні об'єкти з розподіленими в просторі параметрами описуються в математиці диференціальними рівняннями в частинних похідних, хвильовими процесами у фізиці, ірраціональними передаточними функціями в операційному численні. Із теорії термодинаміки відомо, що передаточна функція $W(s)$ для випадку поширення теплової хвилі в однорідному напівсередовищі для прийнятої схеми (рис. 2) є ірраціональною і має вигляд [1, 7]:

$$W1(s) = e^{-\sqrt{s} \cdot \theta}, \quad (1)$$

де e – число Ейлера, s – комплексний аргумент, θ – характеристичний час (параметр, що визначає часовий масштаб процесів), який залежить від глибини H пропорційно її квадрату:

$$\theta = H^2 \cdot C \quad (2)$$

C – константа, яка залежить від питомих теплопровідності й теплоємності ґрунту. Для типового ґрунту значення C становить орієнтовно 200 діб/м². Так, для глибини $H = 0.71$ м (варіант для прикладу), $\theta = 100$ діб.

На жаль, точна ірраціональна модель теплової інерційності ґрунту з розподіленими параметрами (1) непридатна для реалізації на мікроконтролері програмно в реальному часі, тому пропонується замінити її наближеною дробно-раціональною передаточною функцією третього порядку (модель із зосередженими параметрами) із запізненням. Точність такого наближення достатня для нашої задачі. Відповідна передаточна функція має вигляд:

$$W2(s) = e^{-s\tau} \cdot \left\{ \left(\frac{C1}{T1 \cdot s + 1} \right) + \left(\frac{C2}{T2 \cdot s + 1} \right) + \left(\frac{C3}{T3 \cdot s + 1} \right) \right\} \quad (3)$$

Вона складається з трьох паралельних динамічних ланок першого порядку зі сталими часу $T1$, $T2$, $T3$ і коефіцієнтами впливу $C1$, $C2$, $C3$, а також ланки запізнення зі сталою часу τ . Указані параметри повинні бути підібрані так, щоб наближена модель (3) якнайкраще відповідала точній (1) для конкретного θ .

Поставлена задача раціоналізації ірраціональної передаточної функції $W1(s)$ у вигляді $W2(s)$ є типовою оптимізаційною задачею. Як критерій оптимальності було прийнято мінімум середньоквадратичного розгудження між точною ваговою функцією (реакцією на одиничний імпульс у часовій об-

ласті t) $G1(t)$ та її наближеним варіантом $G2(t)$. Варіювалися параметри наближеної моделі: τ , $T1$, $T2$, $T3$, $C1$, $C2$, $C3$. Як обмеження прийнята умова $C1 + C2 + C3 = 1$ (тобто статичний коефіцієнт передачі повинен дорівнювати одиниці).

Перехід від передаточних функцій $W1(s)$, $W2(s)$ операційного зчислення до відповідних вагових функцій у часовій області $G1(t)$, $G2(t)$ здійснювався частотними методами в чисельній формі в програмному середовищі MathCad за такою процедурою. Підстановкою $j \cdot \omega$ (j – уявна одиниця, ω – кругова частота) замість s , передаточні функції перетворені у відповідні амплітудо-фазочастотні характеристики (АФЧХ) $W1(j \cdot \omega)$, $W2(j \cdot \omega)$. АФЧХ підстановкою періодичної послідовності значень ω переведені в чисельну (табличну) форму у вигляді відповідних масивів 2^{16} комплексних чисел. За допомогою чисельного алгоритму зворотного перетворення Фур'є IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) були розраховані відповідні вагові функції в часовій області в табличній формі $G1_k$, $G2_k$ у вигляді відповідних масивів 2^{16} дійсних чисел (k – номер числа в масиві). Мінімізація середньоквадратичного розгудження між $G1_k$ і $G2_k$ здійснювалася з використанням алгоритму чисельної автоматичної оптимізації. Отримані вагові функції відображено в графічній формі на рис. 3.

У результаті вирішення поставленої оптимізаційної задачі були знайдені шукані чисельні значення параметрів наближеної дробово-раціональної передаточної функції $W2(s)$: $T1 = 6,61 \cdot \vartheta$, $T2 = 0,48 \cdot \vartheta$, $T3 = 0,043 \cdot \vartheta$, $\tau = 0,046 \cdot \vartheta$, $C1 = 0,507$, $C2 = 0,545$, $C3 = -0,052$.

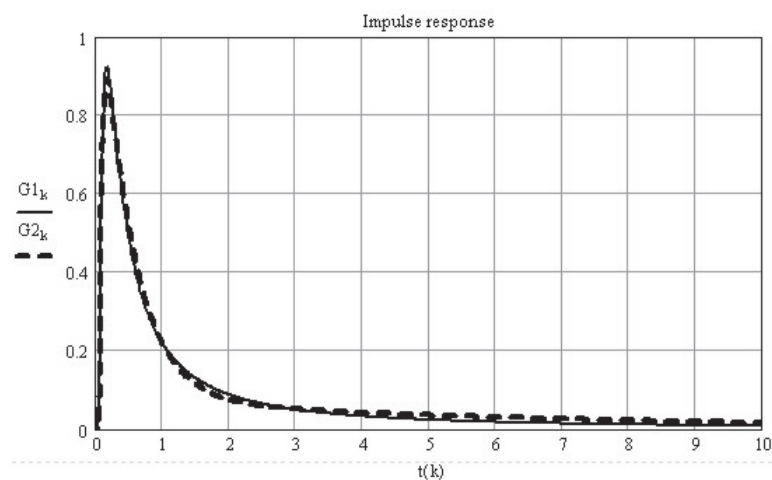


Рис. 3. Вагова функція (реакція на одиничний імпульс) теплової інерційності ґрунту (точна $G1_k$ і наближена $G2_k$) для випадку $\vartheta=1$

Характеристичний час ϑ визначає масштаб часу для τ , $T1$, $T2$, $T3$. Наприклад, $\vartheta = 100$ діб для глибини 0,71 м, тому $\tau = 4.6$ діб, $T1 = 661$ діб, $T2 = 48$ діб, $T3 = 4.3$ діб. Коефіцієнти $C1$, $C2$, $C3$ безрозмірні і не мають масштабу.

У результаті ми отримали практичну модель (3) динаміки розповсюдження теплової хвилі в глибину ґрунту, придатну для будь-яких ґрунтів і будь-яких глибин, яка зручно реалізується програмно в реальному часі.

Адекватність отриманої моделі перевірялася в режимі імітації реального часу в програмному середовищі Visual Simulation кроковим чисельним методом Рунге – Кутта. На рис. 4 наведено результати статистичного моделювання поширення теплової хвилі в глибину ґрунту. Температурні осцилограми відповідають глибинам 0 м; 0,5 м; 1 м. Потік середньодобових значень температури зовнішнього повітря (збурення) імпортувався з файлу середньодобових температур у м. Київ за 100 років (за даними Гідрометцентру) [2]. Відповідний графік позначено 1 на рис. 4. Періодичний тренд відповідає сезонним коливанням, випадковий складник – погодним варіаціям. Теплова інерційність ґрунту на глибинах 0,5 м (графік 2) і 1 м (графік 3) моделювалася передаточною функцією $W2(s)$ з відповідними чисельними значеннями коефіцієнтів τ , $T1$, $T2$, $T3$, $C1$, $C2$, $C3$. Із рисунку видно, що погодні варіації температури згладжуються з глибиною, коливання наближаються до синусоїдальних, амплітуда коливань температури зменшується, а зсув за фазою збільшується зі зростанням глибини.

Між зовнішньою температурою та температурою в глибині є значна розбіжність. Наприклад, літня спека на поверхні відповідає мінімуму температури на достатній (близько 2 м) глибині. Саме тому регулювання потужності нагрівання потрібно здійснювати за розрахунковою глибинною температурою, а не за температурою на поверхні. Синтезована спрощена модель динаміки розповсюдження теплової хвилі вглиб ґрунту (3) зручно реалізується програмно в реальному часі і придатна для будь-яких ґрунтів і будь-яких глибин. Різними будуть лише чисельні значення коефіцієнтів τ , $T1$, $T2$, $T3$, $C1$, $C2$, $C3$.

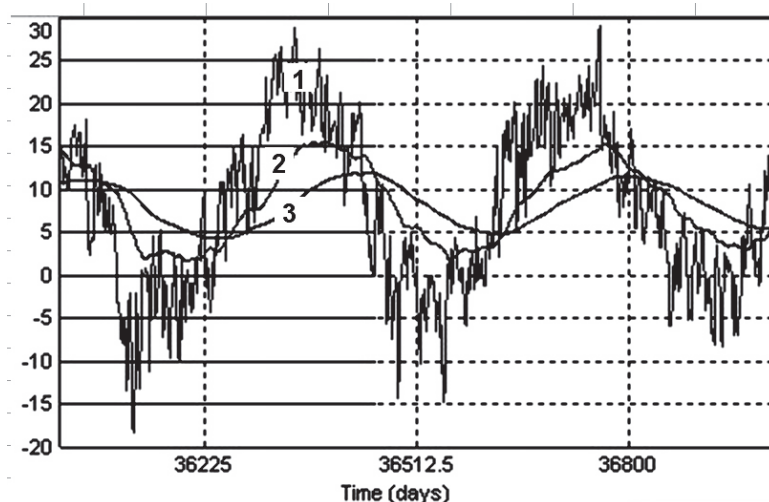


Рис. 4. Температурні осцилограми теплової хвилі на глибинах 0 м, 0,5 м, 1 м

На рис. 5. представлено залежність мінімальної температури від глибини за результатами імітаційного моделювання. На глибинах більше 1 м температура в Києві за 100 років не опускалася нижче нуля. На глибині 0,5 м за той же період температура стояла нижче нуля 5% часу і доходила до -5 градусів. На поверхні ґрунту температура стояла нижче нуля 25% часу і доходила до -29 градусів.

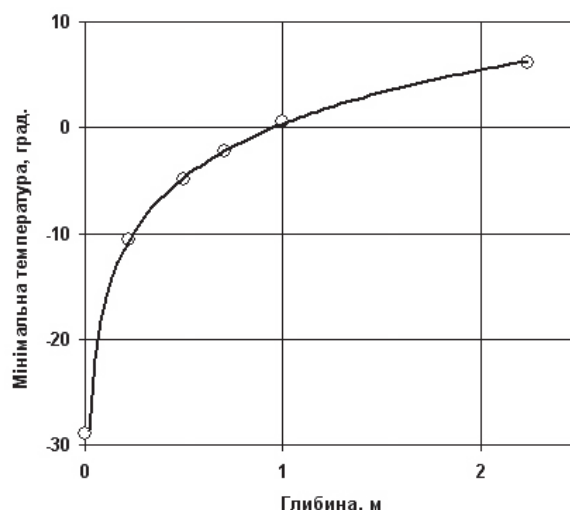


Рис. 5. Залежність мінімальної температури за 100 років від глибини

Висновки

Для автоматизації захисту водогону від промерзання пропонується використовувати регулювання за збуренням, із вимірюванням температури повітря і розрахунком температури на глибині, із використанням динамічної моделі розповсюдження теплової хвилі в глибину ґрунту.

Запропонована схема дає такі переваги: не треба встановлювати спеціальні датчики температури у глибині, що зменшує витрати і збільшує надійність системи, можна обійтися плинними даними Гідрометцентру; впливи можливих локальних неоднорідностей теплового поля ґрунту виключаються; можлива централізована реалізація системи, локальним підсистемам залишається тільки функції включення (виключення) нагріву окремих водогонів по командах з єдиного центру.

На жаль, точна теоретична модель розповсюдження теплової хвилі вглиб ґрунту непридатна для безпосередньої реалізації на мікроконтролері програмно в реальному часі, бо вона є ірраціональною передаточною функцією.

У роботі поставлена і вирішена оптимізаційна задача раціоналізації передаточної функції теплової інерційності ґрунту у вигляді наближеної дробово-раціональної передаточної функції третього порядку із запізненням. У результаті отримано універсальну практичну модель динаміки розповсю-

дження теплової хвилі вглиб ґрунту, придатну для будь-яких ґрунтів і будь-яких глибин, яка зручно реалізується програмно в реальному часі кроковими методами і забезпечує достатню для практики точність.

Література

1. Попович М., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
2. Іносов С., Соболевська Т., Самойленко Н., Сідун К. Дослідження температурних збурень для систем автоматизації опалення будівель. *Управління розвитком складних систем*. 2012. № 6. С. 159–161.
3. Іносов С., Корнієнко В. Оптимізація алгоритму автоматичного регулювання тепловими процесами. *Управління розвитком складних систем*. 2013. № 13. С. 104–108.
4. Іносов С., Бондарчук О. Аналіз можливих причин помилкової ідентифікації динамічних параметрів теплового об'єкта регулювання. *Управління розвитком складних систем*. 2023. № 54. С. 132–137.
5. Іносов С., Ілларіонов В., Сабалаєва Н. Ідентифікація системи стихійного електроопалення в районній електромережі. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг* : тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції. BoScience Publisher. Boston, USA. 2022. С. 171–175. URL: <https://sci-conf.com.ua/iv-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-progressive-research-in-the-modern-world-28-30-12-2022-boston-ssha-arhiv/>
6. Захист водопроводу від замерзання. *ПРАТ «Ensto Україна»*. 2010. URL: http://sem-electro.com.ua/img/2015/04/7_ENSTO_Zahust_vodonapory_vid_zamerzannia.pdf
7. Затула В., Титаренко Л. Режим температури ґрунту на глибинах. Черкаси, 2009. URL: <https://studfile.net/preview/7455426/page:27/>

References

1. Popovich M., Kovalchuk V. Teoriia avtomatichnoho keruvannia. [Theory of automatic control]: Tutorial. Kyiv. Lybid,. 2007. P. 656.
2. Inosov S., Sobolevska T., Samoylenko M., Sidun K. Doslidzhennia temperaturnykh zburen dla system avtomatyzatsii opalennia budivel. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. [Study of temperature disturbances in automation systems for heating buildings. Complex systems development management.] Kyiv. 2012. № 6, P. 159–161.
3. Inosov S., Kornienko V. Optymizatsiia alhorytmu avtomatichnoho rehuliuвання teplovymy protsesamy. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. [Optimization of the algorithm for automatic control of thermal processes. Complex systems development management.] Kyiv. 2013. № 13. P. 104–108.
4. Inosov S., Bondarchuk O. Analiz mozhlyvykh prychyn pomytkovoi identyfikatsii dynamichnykh parametriv teplovoho obiekta rehuliuвання. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. [Analysis of possible reasons of erroneous identification of the dynamic parameters of a controlled thermal plant. Management of Development of Complex Systems.] Kyiv. 2023. № 54. P. 132–137.
5. Inosov S., Illarionov V., Sabalaeva N. Identyfikatsiia systemy stykhiinoho elektroopalennia v raionnii elektromerezhi. Mekhatronni systemy: innovatsii ta inzhynirynh: tezy dopovidei VI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. [Research on identification of the spontaneous electrical heating system in the district electrical network. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference.] BoScience Publisher. Boston, USA. 2022. P. 171–175. URL: <https://sci-conf.com.ua/iv-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-progressive-research-in-the-modern-world-28-30-12-2022-boston-ssha-arhiv/>
6. Zakhyst vodoprovodu vid zamerzannia. [Protection of water pipes from freezing.] «Ensto Ukraine», Kyiv. 2010. URL: http://sem-electro.com.ua/img/2015/04/7_ENSTO_Zahust_vodonapory_vid_zamerzannia.pdf
7. Zatula V., Titarenko L. Rezhym temperatury gruntu na hlybynakh. [Soil temperature regime at depths.] Bohdan Khmelnytskyi National University of Cherkasy. Cherkasy. 2009. URL: <https://studfile.net/preview/7455426/page:27/>