

ТКАЧУК АНДРІЙ

Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0009-0002-4168-9353>
e-mail: aftvin@gmail.com

МОШНОРИЗ МИКОЛА

Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0001-7626-8327>
e-mail: moshnoriz@vntu.edu.ua

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Розподілені системи водопостачання є високотехнологічними комплексами, що включають в себе множини електротехнічних компонентів і систем управління. Забезпечення їх надійного та безперервного функціонування вимагає постійного моніторингу та діагностики технічного стану.

В статті запропоновано математичну модель для оцінки надійності електротехнічних комплексів у розподілених системах водопостачання з метою їх діагностики. Модель базується на аналізі ймовірностей виникнення відмов різних компонентів та підсистем комплексу. Дослідження покликане допомогти у виявленні проблемних зон у системі забезпечення водою та у попередженні можливих аварійних ситуацій. Результати досліджень можуть бути використані для підвищення безпеки та ефективності водопостачальних систем, а також для оптимізації ресурсного управління. Використання математичної моделі у поєднанні з сучасними технологіями діагностики може значно покращити управління інфраструктурою водопостачання та забезпечити надійну роботу електротехнічних комплексів.

Ключові слова: електротехнічні комплекси, розподілені системи водопостачання, діагностування.

TKACHUK ANDRII, MOSHNORIZ MYKOLA
Vinnytsia National Technical University

MATHEMATICAL MODEL OF RELIABILITY ASSESSMENT FOR DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES IN DISTRIBUTED WATER SUPPLY SYSTEMS

Distributed water supply systems are high-tech complexes that include a variety of electrical components and control systems. Ensuring their reliable and uninterrupted operation requires continuous monitoring and diagnostics of their technical condition.

The diagnosis of distributed water supply systems depends on many factors, which can be both deterministic and random. At present, this is a complex task due to the diversity of processes affecting the parameters of the water supply network's operational state. The non-stationarity of data, caused by cyclic changes in flow rate and pressure over time, also makes their diagnosis challenging. For precise diagnosis of the state of distributed water supply systems, it is necessary to consider not only typical emergency situations but also anomalous water consumption conditions and peculiarities of pressure management system operation.

The article proposes a mathematical model for assessing the reliability of electrical engineering complexes in distributed water supply systems for the purpose of their diagnostics. The model is based on the analysis of failure probabilities of various components and subsystems of the complex. The research aims to help identify problematic areas in the water supply system and prevent potential emergency situations. The research results can be used to improve the safety and efficiency of water supply systems, as well as to optimize resource management. The use of the mathematical model in conjunction with modern diagnostic technologies can significantly improve the management of water supply infrastructure and ensure the reliable operation of electrical complexes.

A convenient indicator for assessing the diagnosis of the technical condition of electrical engineering complexes in distributed water supply systems is the probability of failure downtime, which reflects both the frequency of failure occurrence and the duration of downtime. For assessing the reliability of the consumer water supply system, it is expedient to use such an indicator: the probability of safe downtime, which takes into account both the frequency of failures and the permissible duration of downtime under safety conditions.

Keywords: electrical engineering complexes, distributed water supply systems, diagnostics.

Постановка проблеми

Діагностика розподілених систем водопостачання залежить від багатьох факторів, які можуть бути як детермінованими, так і випадковими [1]. На даний час це є складним завданням через різноманітність процесів, що впливають на параметри робочого стану водопровідної мережі. Нестационарність даних, яка обумовлена циклічністю змін витрати і тиску з часом, також робить їх діагностику складною. Для точної діагностики стану розподілених систем водопостачання необхідно враховувати не лише типові аварійні ситуації, але й аномальні умови споживання води (наприклад, святкові дні, перерви у роботі тощо) та особливості роботи систем управління тиском. Це призвело до того, що розробка комплексу методів і математичних моделей для ефективною діагностики технічного стану електротехнічних комплексів розподілених систем водопостачання є актуальним завданням [2].

З огляду на це, для повного розуміння умов експлуатації водопровідних систем необхідно поєднувати технічний та експлуатаційний підходи. Оцінка стану електротехнічних комплексів включає аналіз ризиків для зменшення загрози нормальному функціонуванню системи водопостачання, а отже усунення економічних, технічних або екологічних небезпек. Робочий стан системи або пристрою визначається результатами вимірювань фізичних величин, що описують їх експлуатаційні характеристики [3].

Аналіз останніх джерел

У електротехнічних комплексах існує безліч умов експлуатації, які охоплюють окремі пристрої та об'єкти, цьому що знаходяться у різних точках системи. Наприклад, у водопровідних мережах проводяться вимірювання витрати та тиску в різних контрольних точках, а також споживання води та показників якості води. Параметри стану електротехнічних комплексів водопровідної мережі визначаються в більшій мірі результатами цих вимірювань.

Сучасні дослідження зосереджуються на діагностиці умов експлуатації водопровідних мереж, зокрема, на частоті відмов та потенційних вибоках води [3]. Випадковий характер споживання води та гідравлічні параметри мережі ускладнюють оцінку того, чи можна вважати робочий стан мережі відносно нормальним. Для того щоб мати можливість однозначно говорити про стан експлуатації водопровідної мережі, це питання повинно бути розглянуте в комплексі. Завдяки постійній зміні параметрів у електротехнічному комплексі системи водопостачання (рівень напруги, коефіцієнти шорсткості труб, рівень води в резервуарах та вимоги до води) оцінка їх робочих умов є складною задачею з багатьма критеріями. Потреба у вирішенні описаних вище проблем, що стосуються оцінки умов експлуатації водопровідної інфраструктури, сприяла розвитку ряду діагностичних методів.

Метою роботи є: аналіз математичної моделі системи діагностування технічного стану електротехнічного комплексу розподіленої системи водопостачання.

Виклад основного матеріалу

У цій роботі наводиться літературний огляд та опис математичної моделі системи діагностування технічного стану такого електротехнічного комплексу, як розподілена система водопостачання. Для мінімізації витрат і скорочення часу, необхідного для діагностування технічного стану систем водопостачання, існує необхідність в розробці експрес-методів, до яких відноситься метод динамічного контролю [3]. Даний метод дозволяє контролювати динамічні параметри, в тому числі амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) конструкції, протягом усього періоду експлуатації, аналіз яких дозволяє оцінити технічний стан систем водопостачання.

Встановлено, що найчастіше використовують акустичні та балансові методи, а також методи, що засновані на аналізі параметрів тиску. Як правило, ці методи діляться на апаратні та програмні, а також на методи вимірювання та методи, засновані на моделях.

В акустичних методах звукові сигнали зазвичай відбираються за допомогою вікна Хеннінга, а потім за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT) обчислюються періодограми у вигляді спектру потужності сигналу в залежності від частоти. Проблемними питаннями є недоліки конкретних методів визначення умов роботи водопровідних мереж, які не завжди можуть бути ефективно реалізовані в кожній системі водопостачання.

Хоча методи, засновані на гідравлічному моделюванні, є одними з найдешевших, вони передбачають точне калібрування для отримання надійних результатів. Це вимагає використання щільно розгорнутої мережі моніторингу з використанням сенсорів, що є гарантією високої якості моделі. Жоден з методів, що використовуються в даний час для виявлення несправностей водопровідних мереж, не є універсальним. Це пов'язано зі специфічними характеристиками систем водопостачання [2].

При водопостачанні застосовуються послідовні і паралельні з'єднання елементів електротехнічних комплексів, діагностування технічного стану яких можливо описати за допомогою регулярних Марківських процесів з кінцевими станами і безперервним часом. Визначимо Марківський процес наступним чином. Нехай система в момент часу t може перебувати тільки в одному з кінцевого безлічі станів [4]:

$$A(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (1)$$

Нехай $P_{ii}(\Delta t)$ ймовірність того, що система за малий проміжок часу Δt залишається в стані a_i , а $P_{ij}(\Delta t)$ ймовірність того, що за час Δt вона перейде зі стану a_i в стан a_j . Тоді ймовірність, що за час Δt не відбудеться жодного переходу з a_i ,

$$P_{ii}(\Delta t) = P\{a_i \xrightarrow{\Delta t} a_i\} = 1 - b_{ii}\Delta t + o(\Delta t) \quad (2)$$

а ймовірність переходу системи в стан a_j :

$$P_{ij}(\Delta t) = P\{a_i \xrightarrow{\Delta t} a_j\} = 1 - b_{ij}\Delta t + o(\Delta t) \quad (3)$$

де $(1 - b_{ii}\Delta t)$ - ймовірність того, що за час Δt не відбудеться переходу, $b_{ij}\Delta t$ - ймовірність того, що за час Δt перехід відбудеться;

Процес буде регулярним однорідним Марківським у випадку, якщо він відображає поведінку розглянутої розподіленої системи водопостачання, тобто коли система переходить з одного дискретного стану в інший при відмові або відновленні. З формул (2) та (3) випливає, що ймовірності переходів елементу або системи водопостачання із справного стану в стан відмови і навпаки залежить від тривалості переходу, і не залежить від моментів часу, між якими відбувається перехід.

Регулярні однорідні Марківські процеси з кінцевим набором станів описуються матрицею коефіцієнтів b_{ij} ; $i, j = 0, 1, 2, \dots, n$, які задовольняють умовам:

$$b_{ij} \geq 0 \text{ при } i \neq j \quad (4)$$

$$\{-\infty < \sum_{j=0}^n b_{ij} \leq 0 \text{ при } i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Для регулярного однорідного Марківського процесу випадкові величини ϑ_i ; $i = 0, 1, \dots, n$, мають показову функцію розподілу:

$$F(t) = P(\vartheta_i < t) = -1 - \exp(-b_{ii} t) \tag{6}$$

а ймовірності переходів P_{ij} зі стану a_i в a_j визначаються як:

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{b_{ij}}{b_{ii}} & ; j \neq i \\ 0, & j = 1 \end{cases} \tag{7}$$

і задовільняє умовам:

$$\sum_{j=0}^n P_{ij} = 1, i = 0, 1, 2, \dots, n, P_{ij} \geq 0, 0 \leq i, j \leq n \tag{8}$$

Стационарні ймовірності можна описати системою алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^n b_{ij} \pi_j = 0, i = 0, 1, 2, 3, \dots, n \\ \sum_{j=0}^n \pi_j = 1 \end{cases} \tag{9}$$

Розглянемо опис функціонування системи водопостачання, що має різні з'єднання елементів. Розглянемо одиночний елемент і перехід його зі справного стану в стан відмови і навпаки. Згідно експоненціального закону розподілу часу безвідмовної роботи і часу відновлення функціонування елемента електротехнічного комплексу характеризується параметром потоку відмов λ і параметром потоку відновлень μ . Розмічений граф станів показаний на рис. 1.

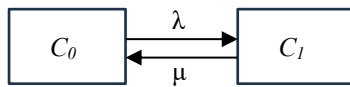


Рис. 1. Розмічений граф станів одиночного елементу електротехнічного комплексу системи водопостачання

Під впливом потоку відмов інтенсивністю λ , елемент переходить з справного стану C_0 в стан відмови C_1 , а під дією потоку відновлень μ повертається із стану з 1 в стан з 0. Система диференціальних рівнянь для ймовірностей станів системи водопостачання має вигляд:

$$\frac{dP(E)}{dt} = -\lambda P(E) + \mu \bar{P}(E) \tag{10}$$

$$\frac{d\bar{P}(E)}{dt} = \lambda P(E) + \mu \bar{P}(E) \tag{11}$$

де $P(E)$ - ймовірність справного стану системи водопостачання;

$\bar{P}(E)$ - ймовірність вимушеного простою системи водопостачання.

Рішення системи рівнянь для часу $t = 0$ при початкових умовах $P(E)=1$ та $\bar{P}(E) = 0$:

$$P(E) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} \exp(-(\lambda + \mu)t) \right) \tag{12}$$

$$\bar{P}(E) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 + \exp(-(\lambda + \mu)t)) \tag{13}$$

де t - розглянутий проміжок часу.

При тривалій експлуатації системи водопостачання $t \rightarrow \infty$ має місце стаціонарний режим роботи елемента з ймовірностями станів

$$P(E) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \bar{P}(E) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \tag{14}$$

Для стаціонарного режиму:

$$\lambda = \frac{1}{T_{\text{сеп}}} = \text{const}, \quad \mu = \frac{1}{T_B} = \text{const}$$

При тривалості простою споживача $t_{\text{сеп}} = T_B$ з (11) отримуємо:

$$\bar{P}(E) = \frac{t_{\text{сеп}}}{T_{\text{сеп}} + t_{\text{сеп}}} = \lambda_{\text{сеп}} t_{\text{сеп}} \tag{15}$$

Для системи водопостачання, що складається з n послідовно з'єднаних елементів, необхідно розглянути $(n + 1)$ станів: стан ϑ настає, коли всі елементи справні і забезпечується нормальне водопостачання та електропостачання, і стан i , $i = 1, 2, \dots, n$, коли i -ий елемент пошкоджений і, отже, настала відмова в системі. Кожен елемент характеризується потоком відмов λ_i і потоком відновлень μ_i . Ймовірність безвідмовної роботи системи за час Δt визначається як добуток ймовірностей безвідмовної роботи n елементів, оскільки справні стани елементів є події не залежні (на основі теореми множення ймовірностей незалежних подій). Цю умову можна записати у вигляді [5]:

$$(1 - \lambda_1 \Delta t)(1 - \lambda_2 \Delta t) \dots (1 - \lambda_n \Delta t) \approx 1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta t \tag{16}$$

Для складання системи диференціальних рівнянь, що описують ймовірності станів, припустимо, що система водопостачання протягом часу t знаходиться в справному стані, тоді:

$$P_0(t + \Delta t) = (1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta t) P_0(t) + \sum_{i=1}^n [0] P_i(t) \tag{17}$$

$$P_i(t + \Delta t) = (\lambda_i \Delta t) P_0(t) + [1] P_i(t), i = 1, 2, 3, \dots, n \tag{18}$$

Перетворення Лапласа для випадку $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ і початкових умов $t = 0$ дає рішення системи рівнянь (18) у вигляді:

$$P_0 = P(t) = \exp(-\lambda t) \quad (19)$$

$$P_i(t) = Q_i(t) = \frac{\lambda_i}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t)) \quad (20)$$

З формул (19) та (20) випливає два важливі висновки:

1) ймовірність безвідмовної роботи електротехнічних комплексів розподілених систем водопостачання, складеної з n елементів, підпорядковується експоненціальному закону розподілу;

2) ймовірність відмови будь-якого складового елемента визначається відношенням його інтенсивності відмов до інтенсивності відмов розглянутої системи водопостачання. Рівняння (20) дозволяє із заданою ймовірністю відмови знайти необхідну інтенсивність відмов вхідного в систему елемента, якщо задана загальна інтенсивність відмов системи. Тепер, використовуючи апарат Марківських процесів, розглянемо ймовірність відновлення електротехнічних комплексів системи водопостачання.

Позначимо через $v(\tau)$ - ймовірність відновлення; $\bar{v}(\tau)$ - ймовірність того, що відмову системи не буде ліквідовано, тобто елемент або система не будуть відновлені протягом часу τ .

Для знаходження ймовірності того, що відмовив елемент електротехнічного комплексу розподіленої системи водопостачання не буде відновлено протягом часу τ , необхідно вписати систему диференціальних рівнянь, що зв'язують ймовірності станів, а саме - ймовірність відновлення і ймовірність невідновлення за час τ . Застосовуючи вже відомі міркування, отримаємо, ввівши приріст часу відновлення $\Delta\tau$, систему рівнянь:

$$v_0(\tau + \Delta\tau) = [1]v_0(\tau) + \sum_{i=1}^n (\mu_i \Delta\tau) v_i(\tau) \quad (21)$$

$$\bar{v}_i(\tau + \Delta\tau) = [0]\bar{v}_i(\tau) + (1 + \mu_i \Delta\tau) \bar{v}_i(\tau) \quad (22)$$

Ймовірність того, що система знаходиться в стані i (відмови), під час $t = 0$ буде $Q(0) = \frac{\lambda_i}{\lambda}$, а ймовірність безвідмовної роботи (стан \emptyset) дорівнює нулю, оскільки було прийнято, що один з елементів відмовив, тобто система знаходиться в стані відмови, не забезпечуючи водопостачання.

Вирішуючи для початкових умов (21) і (22), отримаємо ймовірності станів:

$$\bar{v}_i(\tau) = \frac{\lambda_i}{\lambda} \exp(-\mu_i \tau) \quad (23)$$

$$\bar{v}_0(\tau) = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\lambda} [1 - \exp(-\mu_i \tau)] \quad (24)$$

а ймовірність того, що система не буде відновлена, тобто залишиться в стані відмови за час τ , дорівнює сумі ймовірностей $\bar{v}_i(\tau)$ по всім i , тобто:

$$\bar{v}(\tau) = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\lambda} \exp(-\mu_i \tau) \quad (25)$$

З формули (25) випливає важливий висновок про те, що час відновлення відмовила системи, складеної з елементів, що мають показове розподіл часу відновлення, має підсумований експоненціальний розподіл. Ймовірність аварійного простою системи, складеної з n послідовно з'єднаних елементів, визначаємо по теоремі множення незалежних подій-ймовірностей справного стану:

$$\bar{P}_0(E) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(E) \quad (26)$$

або з достатньою для практичних розрахунків точністю при малих значеннях $\bar{P}_i(E)$:

$$\bar{P}_0(E) \approx \sum_{i=1}^n \bar{P}_i(E) \quad (27)$$

Формула (27) прийнятна при визначенні загальної ймовірності аварійного простою споживачів, приєднаних до ліній електропередач з одностороннім живленням, і може бути використана або при аналізі схем водопостачання за абсолютною величиною показника надійності, або для визначення величини математичного очікування збитку. Паралельне з'єднання елементів при водопостачанні споживачів застосовується для наступних цілей.

1. Полегшений резерв.
2. Ненавантажений резерв (резервний елемент відключений).
3. Резервування m елементами n , що знаходяться в роботі.
4. Забезпечення необхідних за технічними умовам параметрів мережі.

При полегшеному резервуванні введення резервного елемента при відмові системи водопостачання здійснюється в наступній послідовності: відключається відмовив елемент, включається резервний. Підмножині A (працездатний стан системи) відповідають наступні положення системи водопостачання:

1. a_0 - обидва елементи справні, один включений в роботу, інший знаходиться в резерві;
2. a_1 - один елемент відмовив при роботі, другий включений в роботу з резерву;

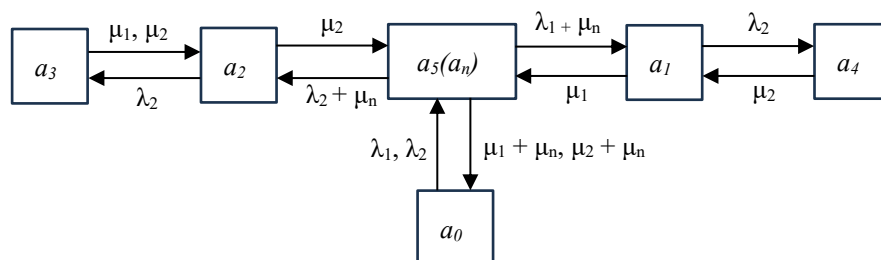


Рис. 2. Приклад полегшеного резервування. Граф переходів системи з одним робочим і одним резервним елементами

3. a_2 - відмовив резервний елемент, а інший справний і включений в роботу;
 4. a_3 - обидва елементи відновлюються, причому один відмовив, будучи включеним в роботу, а другий-перебуваючи в резерві;
 5. a_4 - обидва елементи відновлюються після відмов у роботі;
 6. a_5 - проводиться перехід з робочого елемента на резервний елемент, і навпаки.
- Отже, стани a_0, a_1, a_2 відповідають робочому стану системи, а a_3, a_4, a_5 станом відмови.

Висновки

Для оцінки діагностики технічного стану електротехнічних комплексів розподілених систем водопостачання зручним показником є ймовірність аварійного простою, що відображає як частоту настання відмови, так і тривалість простою. Для оцінки надійності системи водопостачання споживачів доцільним є використання такого показника: ймовірність безпечного простою, який враховує як частоту настання відмов, так і допустиму за умовами безпеки тривалість простою.

Наведена вище модель дозволяє визначити загальну ймовірність вимушеного простою або інший показник надійності практично для будь-якої схеми водопостачання і на цій основі оцінити її надійність або за абсолютною величиною показника, або за допомогою економічного вираження надійності у вигляді, наприклад, математичного очікування збитку.

Література

1. Бур'ян, С.О. Підвищення енергоефективності електромеханічної системи автоматичного керування послідовно з'єднаними насосами водопостачання / С.О. Бур'ян // Наукові праці ДНТУ. Серія 134 «Електротехніка і енергетика». – Донецьк : ДНТУ, 2013. - №1(14)'2013. – С. 47-52.
2. Motiee, H.; Ghasemnejad, S. Prediction of Pipe Failure Rate in Tehran Water Distribution Networks by Applying Regression Models. *Water Supply* 2019, 19, 695–702.
3. Tariq, S.; Hu, Z.; Zayed, T. Micro-Electromechanical Systems-Based Technologies for Leak Detection and Localization in Water Supply Networks: A Bibliometric and Systematic Review. *J. Clean. Prod.* 2020, 289, 125751.
4. Доморошин С. В. Нечітке моделювання ймовірності відмови апаратів захисту від перенапруг / С. В. Доморошин, О. А. Сахно // Електротехніка та електроенергетика. - 2018. -№ 3. - С. 39-51.
5. Жердев М.К., Селюков О.В. Діагностування радіоелектронної техніки на основі енергодинамічного методу: методика та інформаційне забезпечення. Системи озброєння і військова техніка. Вид.-во ХНУПС імені Івана Кожедуба. Харків, 2018. Вип. № 2(54). С. 23 – 30.
6. Закладний О.М. Вплив якості напруги живлення на електромеханічні системи із синхронними двигунами / О.М. Закладний, О.О. Закладний, 153 Т.Ю. Оборонов // IV Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина». Зб. тез доповідей. – К.: НТУУ «КПІ». – 2012. – С 72-79.
7. Глухов С.І., Сакович Л.М. Розробка та техніко-економічне обґрунтування автоматизованої системи технічної діагностики радіоелектронної техніки на основі фізичного діагностування. Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. Х.: НАНГУ, 2020. № 1(35). С. 30 - 40.
8. Доморошин С. В. Метод ризик-аналізу порушення функціонування розподільчих пристроїв високої напруги / С. В. Доморошин // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. - 2020. - № 3 (51).-С. 41-52.

References

1. Burian, S.O. Pidvyshennia enerhoefektyvnosti elektromekhanichnoi systemy avtomatichnoho keruvannia poslidovno ziednanyu nasosamy vodopostachannia / S.O. Burian // Naukovi pratsi DNTU. Seria 134 «Elektrotetehnika i enerhetyka». – Donetsk : DNTU, 2013. - №1(14)2013. – S. 47-52.
2. Motiee, H.; Ghasemnejad, S. Prediction of Pipe Failure Rate in Tehran Water Distribution Networks by Applying Regression Models. *Water Supply* 2019, 19, 695–702.
3. Tariq, S.; Hu, Z.; Zayed, T. Micro-Electromechanical Systems-Based Technologies for Leak Detection and Localization in Water Supply Networks: A Bibliometric and Systematic Review. *J. Clean. Prod.* 2020, 289, 125751.
4. Domoroshchyn S. V. Nechitke modeliuвання ymovirnosti vidmovy aparativ zakhystu vid perenapruh / S. V. Domoroshchyn, O. A. Sakhno // Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka. - 2018. -№ 3. - S. 39-51.
5. Zherdiev M.K., Seliukov O.V. Diahnostuvannia radioelektronnoi tekhniki na osnovi enerhodynamichnoho metodu: metodyka ta informatsiine zabezpechennia. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. Vyd.-vo KhNUPS imeni Ivana Kozheduba. Kharkiv, 2018. Vyp. № 2(54). S. 23 – 30.
6. Zakladnyi O.M. Vplyv yakosti napruhy zhyvlennia na elektromekhanichni systemy iz synkronnymy dvyhunamy / O.M. Zakladnyi, O.O. Zakladnyi, 153 T.Iu. Oboronov // IV Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna». Zb. tez dopovidei. – K.: NTUU «KPI». – 2012. – S 72-79.
7. Hlukhov S.I., Sakovych L.M. Rozrobka ta tekhniko-ekonomichne obgruntuвання avtomatyzovanoi systemy tekhnichnoi diahnostyky radioelektronnoi tekhniki na osnovi fizychnoho diahnostuvannia. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Natsionalnoi hvardii Ukrainy. Kh.: NANHU, 2020. № 1(35). S. 30 - 40.
8. Domoroshchyn S. V. Metod ryzyk-analizu porushennia funksionuvannia rozpodilchkykh prystroiv vysokoi napruhy / S. V. Domoroshchyn, O. A. Sakhno // Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy. - 2020. - № Z (51).-S. 41-52.