**МЕТОД РИЗИК-АНАЛІЗУ ПОРУШЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ
РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЇВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ****С. В. Доморошин, О. А. Сахно**

Національний університет «Запорізька політехніка»

вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна.

E-mail: domoroshchin77@gmail.com, a.asakhno@yahoo.com

Дана публікація розглядає наукову проблему оцінки надійності функціонування розподільчих пристроїв високої напруги в умовах зростання спрацьованого ресурсу електрообладнання електроенергетичної системи України, що є невід'ємною часткою по впровадженню заходів щодо підвищення енергетичної безпеки країни. В роботі визначено основні діагностичні параметри, що впливають на технічний стан основного електрообладнання розподільчих пристроїв. Розроблено узагальнену математичну модель кількісної оцінки технічного стану, що дозволить комплексно проінтегрувати основні діагностичні параметри незалежно від фізики їхньої природи. Визначено підхід прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання комірок, що дозволить врахувати вплив поточного технічного стану на ймовірність відмови комірки на інтервалі часу. Розроблений підхід покладений в основу методу, що визначає ризики порушення функціонування розподільчого пристрою високої напруги. Метод ґрунтується на прогнозі ймовірності відмови електрообладнання, топологічному зв'язку комірок електроустановки та аналізу ймовірних наслідків порушення роботи розподільчого пристрою. Розроблений метод може бути застосований в прогнозі надійності функціонування електричних мереж об'єднаної енергетичної системи України.

Ключові слова: розподільчий пристрій, діагностичні параметри, технічний стан, ймовірність відмови, комірка.

**МЕТОД РИСК-АНАЛИЗА НАРУШЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ****С. В. Доморошин, А. А. Сахно**

Национальный университет «Запорожская политехника»

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина.

E-mail: domoroshchin77@gmail.com, a.asakhno@yahoo.com

Данная публикация рассматривает научную проблему оценки надежности функционирования распределительных устройств высокого напряжения в условиях повышения выработанного ресурса электрооборудования электроэнергетической системы Украины, что есть неотъемлемой частью по внедрению мероприятий относительно повышения энергетической безопасности страны. В работе определены основные диагностические параметры, которые влияют на техническое состояние основного электрооборудования распределительных устройств. Разработана обобщенная математическая модель количественной оценки технического состояния, которая позволит комплексно проинтегрировать основные диагностические параметры независимо от физики их природы. Определен подход прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования ячеек, который позволит учесть влияние текущего технического состояния на вероятность отказа ячейки на интервале времени. Разработанный подход положен в основу метода, который определяет риски нарушения функционирования распределительного устройства высокого напряжения. Метод базируется на прогнозировании вероятности отказа электрооборудования, топологической связи ячеек электроустановки и анализе вероятных последствий нарушения работы распределительного устройства. Разработанный метод может применяться в прогнозировании надежности функционирования электрических сетей объединенной энергетической системы Украины.

Ключевые слова: распределительное устройство, диагностические параметры, техническое состояние, вероятность отказа, ячейка.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Об'єднана енергетична система України є сукупністю електростанцій, електричних і теплових мереж, інших об'єктів електроенергетики, що об'єднані спільним режимом виробництва, передачі та розподілу електричної та теплової енергії при централізованому управлінні цим режимом. Основою електроенергетики України є об'єднана електроенергетична система (ОЕС) України, яка здійснює енергопостачання споживачів, міжсистемну взаємодію при регулюванні енергетичного балансу в країні. ОЕС України поєднує енергогенеруючі

потужності, розподільчі мережі пов'язані між собою системо утворюючими лініями електропередачі напругою 220–750 кВ. Станом на кінець 2019 року більша частина генеруючих активів та магістральних і міждержавних мереж має дуже велику ступінь зносу: 83 % енергоблоків ТЕС і ТЕЦ є фізично зношеними і потребують модернізації, 70 % енергоблоків АЕС потребують продовження строку експлуатації, баланс потужності ОЕС України має дефіцит маневрених потужностей ГЕС і ГАЕС, 90 % ліній електропередачі та 55 % основного устаткування підстанцій відпрацювало

розрахунковий технічний ресурс [1]. В деякій мірі вирішення цієї проблеми планується за рахунок збільшення потужностей електростанцій, які працюють на альтернативних джерелах енергії [2]. Нерівномірний розподіл енергогенеруючих потужностей по енергосистемах призводить до ускладнення режимів роботи ОЕС України – в одних енергосистемах є профіцитний баланс електроенергії, в інших спостерігається дефіцит електроенергії. В даних умовах зношеності та розбалансованості ОЕС України важливу роль в її функціонуванні відіграють розподільчі пристрої, що відносяться до класу високої напруги. Розподільчі пристрої високої напруги (РПВН) входять до складу всіх електроенергетичних об'єктів ОЕС. Вони виконують функцію приймання, передавання та розподілення електричної енергії одного класу напруги. Від технічного стану (ТС) обладнання яке входить до складу РПВН залежить надійність видачі генерованої потужності, здійснення міжсистемних перетоків потужності та безперебійного енергопостачання споживачів електричної енергії.

Роботи присвячені дослідженню поточного ТС та прогнозуванню ресурсу електрообладнання в основному розглядають обладнання одного типу (найбільш відповідальне або таке, що працює в найбільш складних умовах), а в прогнозі ресурсу використовуються складні розрахунки з статистичним аналізом попередньої історії функціонування даного типу обладнання, які потребують достовірної бази даних всього періоду експлуатації. Але не всі ці методи враховують при прогнозуванні ресурсу ТС електрообладнання на момент дослідження. Так в [3] пропонується аналізувати ймовірність відмови високовольтного вимикача методом схованими в часі Діріхле розподіленнями (TLDA). Мета роботи є моделювання послідовності відмов як суміші декількох схем відмов, кожна з яких характеризується нескінченною сумішшю відмов з визначеними ймовірностями. Даний метод ґрунтується на лінгвістичному аналізі статистичної інформації штучним інтелектом кластеризує її за типовими подіями, групами, словами й т.і. для встановлення закономірності причин та прогнозування ресурсу обладнання на майбутнє. Цей метод є досить складним і потребує наявності достовірної статистичної інформації та кваліфікованого ведення обліку відмов обладнання впродовж всієї експлуатації. В роботах [4, 5] досліджується ТС високовольтних вимикачів як одного з основних компонентів ОЕС. В роботі [4] досліджуються параметри і методи їх обробки в системі on-line моніторингу високовольтних вимикачів. В [5] пропонується метод оцінки ймовірності відмови та залишкового ресурсу елегазових вимикачів тільки за статистичними даними, отриманими з аналізу історії функціонування електричної мережі (East China Grid). В роботах [6, 7] пропонується оцінювати стан ізоляції електрообладнання, зокрема елегазової, контролем

часткових розрядів. Цей метод досить складно реалізувати в умовах діючого обладнання, що обумовлено впливом електромагнітних полів на пристрої контролю. В роботі [8] розглядаються питання методів діагностування комплектних РПВН з елегазовою ізоляцією, яких в ОЕС України впроваджено ще в досить невеликій кількості. В [9] залишковий ресурс обладнання визначається за ступенем полімеризації твердої ізоляції, яка в свою чергу визначається непрямим методом зі з'єднань фурану та корелюється математичними рівняннями для кожної окремої одиниці обладнання. Цей метод стосується лише обладнання з паперово-масляною ізоляцією. В роботах [10, 11] пропонується оцінювати ресурс електрообладнання методом штучної нейронної мережі. Перевага цього методу полягає в можливості поєднання декількох показників які характеризують поточний стан досліджуваного об'єкту. Аналізуючи роботи [3–11] можливо зробити висновок про відсутність узагальненого підходу до визначення надійності роботи розподільчих пристроїв.

Метою роботи є розроблення методу аналізу ризиків порушення роботи РПВН оснований на поєднанні ймовірнісного та топологічного методів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

1. *Розроблення узагальненої математичної моделі розрахунку поточного ТС основного відповідального обладнання РПВН*

Виділимо номенклатуру обладнання контроль ТС якого може забезпечити прогнозованість функціонування РПВН, визначення можливих ризиків порушення роботи електроустановки, планування технічного обслуговування та розподілення матеріальних та фінансових активів підприємств ОЕС України.

Виходячи з визначення розподільчого пристрою до цієї номенклатури відносяться:

- комутаційні апарати (високовольтні вимикачі, роз'єднувачі);
- вимірювальні апарати (трансформатори струму, трансформатори напруги);
- апарати захисту від перенапруг (розрядники вентильні, обмежувачі перенапруг нелінійні);
- опорна ізоляція.

Фактичну якість експлуатації обладнання РПВН можна формалізувати у вигляді вектора динамічних показників експлуатаційної роботи [12]:

$$Y(t) = \begin{bmatrix} D_j(t), K_{відм.j}(t), \dots \\ \dots, T_{відм.j}(t), S_{неод.j}(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де $D_j(t)$ – діагностичні оцінки ТС j видів обладнання РПВН;

$K_{відм.j}(t)$ – загальна кількість відмов j виду обладнання РПВН;

$T_{відм.j}(t)$ – тривалість відмов j виду обладнання РПВН;

$S_{неод.j}(t)$ – кількість недовідпуску електричної енергії j видом обладнання РПВН.

Основною задачею контролю ТС

електрообладнання є визначення параметрів, контроль яких буде достатньо інформативно відображати поточний стан контролюваного об'єкта. З метою визначення цих параметрів побудуємо причинно-наслідкову діаграму Ісікави. Сформулюємо проблему як «Ймовірність порушення роботи РПВН». Основними чинниками впливу на роботу РПВН є:

- людський (кваліфікація, психологічний стан тощо);
- погодний (опаді, вітер, блискавка);
- експлуатаційний (деградація ізоляції, зміна структури та хімічного складу електротехнічних матеріалів, знос вузлів апаратів, зміна теплового стану, концентрація середовища).

Перші два чинники мають непередбачуваний, неконтрольований характер впливу яких можливо запобігти опосередковано, тому в системі «on-line» діагностики контролюються параметри які впливають на експлуатаційний чинник. Також

контроль цих параметрів повинен мати можливість технічної реалізації на об'єкті та економічне обґрунтування впровадження системи моніторингу. Контроль стану опорної ізоляції виконується в роботі зовнішнім оглядом та засобами інфрачервоної техніки, тому безперервний контроль стану даного типу обладнання не є доцільним.

Аналізуючи нормативну документацію щодо контролю ТС електрообладнання та вимоги заводських інструкцій можна визначити основні параметри:

- ізоляція електрообладнання (струм витоку, ємність ізоляції, діелектричні втрати);
- тепловий стан апаратів та контактних з'єднань;
- тиск газозовмісного середовища;
- кількість спрацювань (механічних або комутаційних).

Причино-наслідкова діаграма Ісікави зображена на рис. 1.

Рисунок 1 – Причино-наслідкова діаграма Ісікави

ТС узагальненої одиниці обладнання можна описати наступною функцією:

$$TS = f(I_{sol}, T_{st}, P_{gas}, N_{op}), \quad (2)$$

де TS – технічний стан узагальненої одиниці обладнання;

I_{sol} – стан ізоляції електрообладнання;

T_{st} – тепловий стан електрообладнання та контактних з'єднань;

P_{gas} – тиск газозовмісного середовища;

N_{op} – кількість спрацювань.

Можна побачити з (2), що параметри які впливають на ТС електрообладнання мають різну

природу походження. Використання стандартних фізико-математичних моделей є задача досить складна. За даних обставин є доцільне використання апарату нечіткої логіки, яка базується на понятті нечіткої множини з функцією належності до неї, що приймає будь які значення в інтервалі $[0; 1]$.

Нечітка модель має наступну структуру [13]:

$$S = F(\varphi(P), R, M, D, A), \quad (3)$$

де $\varphi(P)$ – функції приналежності (ФП) вхідних і вихідних змінних;

R – база нечітких правил «ЯКЩО – ТО»;

M – механізм нечіткого виводу Мамдані, який

реалізує логічні операції правил «ЯКЩО – ТО» для відображення вхідних нечітких змінних у вихідну;

D – метод дефазифікації;

A – вхідна лінгвістична змінна;

S – кількісне значення ТС досліджуваного об'єкта.

Узагальнена нечітка модель для визначення ТС електрообладнання РПВН зображена на рис. 2.

Рисунок 2 – Узагальнена нечітка модель для визначення ТС електрообладнання РПВН

Визначимо ТС кожної одиниці обладнання, що входять до складу РПВН за параметрами які визначені причино-наслідковою діаграмою Ісікави. ТС високовольтного вимикача оцінюється в основному за комутаційним та механічним ресурсами. Така система як Нікта-1 діагностує стан механічної та головної контактної системи, але на виведеному обладнанні. Система Ресурс-1 призначена для безперервного автоматичного моніторингу та реєстрування лише комутаційних параметрів. Існують також інші системи, які контролюють стан вимикача за такими локальними ознаками як струм двигуна приводу, швидкісними характеристиками елементів механічної системи і т.і. По узагальненій моделі ТС високовольтного вимикача оцінюється за наступними параметрами, що обумовлені заводською та нормативною документацією:

– кількість механічних циклів операцій включення-відключення;

– кількість комутаційних операцій обумовлених струмом відключення для даного типу вимикача, що визначається за формулою:

$$n_x = \sum_{i=1}^n (m_i k_i), \quad (4)$$

де – m_i – кількість виконаних відключень при струмі відключення $I_{відкл.} \leq I_{доп.}$;

k_i – розрахунковий коефіцієнт, який визначається згідно діаграми для даного типу вимикача;

– надлишкова температурна різниця вузлів вимикача;

– тиск елегазу в газонаповненому середовищі вимикача.

ТС трансформатора струму в різних системах діагностики оцінюються за наступними показниками: за струмом небалансу трифазної системи, струмом комплексної провідності або вимірюванням зміни ємності та діелектричних втрат

ізоляції за цим струмом, контролем часткових розрядів. По узагальненій моделі пропонується контролювати ТС трансформатора струму за наступними параметрами:

– вимірюванням струму небалансу з відхиленням вектору небалансу в бік проблемної фази;

– зміна діелектричних втрат ізоляції;

– зміна ємності ізоляції;

– зміна теплового стану ізоляції за допомогою термографічного контролю.

ТС апарату захисту від перенапруг оцінюється в більшості систем моніторингу за кількістю спрацювань апарату та контролем активної складової струму провідності. Так система «SAFE-T» підприємства ТОВ «Енергоавтоматизація» (м. Запоріжжя) контролює стан ОПН за загальною кількістю комутацій, повним струмом провідності (у сталому режимі мережі), співвідношенням гармонік повного струму (на основі припущення про зв'язок активної складової з 3-ю гармонікою повного струму провідності). Такі ж показники контролюють пристрої деяких закордонних виробників. По узагальненій моделі оцінюється ТС апарату захисту від перенапруг контролем наступних параметрів:

– кількість спрацювань апарату (тільки для розрядників);

– зміна активної складової струму провідності (з врахуванням нормування відносно робочої напруги мережі);

– тепловий стан апарату.

ТС роз'єднувачів в умовах експлуатації оцінюється при виведенні обладнання в ремонт або візуально та засобами інфрачервоної техніки. При виведенні в ремонт безпосередньо оцінюється стан опорних ізоляторів методами ультразвукової імпульсної дефекто- і структурометрії, стан контактної системи та механічного приводу. По узагальненій моделі оцінюється ТС роз'єднувача контролем наступних параметрів:

– кількості виконаних механічних операцій «включення-відключення», граничне значення яких обумовлено ДСТУ та вимогами заводу виробника;

– контролем теплового стану контактних з'єднань головної контактної системи.

2. Вибір методу прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання РПВН

Для прогнозу залишкового ресурсу електрообладнання доцільно враховувати як поточний ТС досліджуваного обладнання, так і ретроспективну інформацію щодо функціонування даного типу обладнання. Евристичні (експертні) моделі описують ймовірність поточного ТС об'єкта набором загальних правил на основі знань та реалізуються в формі експертних систем, причинно-наслідкових зв'язків і т.і. Статистичні моделі, що ґрунтуються на зборі інформації про генеральну сукупність подій ансамблю однотипних об'єктів, дозволяють врахувати в прогнозі ресурсу ймовірність

впливу зовнішніх збурень. Тому в підході прогнозу залишкового ресурсу електрообладнання потрібне поєднання евристичної та статистичної моделі прогнозу в загальний ймовірнісний метод визначення ризиків порушення роботи РПВН.

Такий метод описаний в [14], в якому для врахування в ретроспективній інформації індивідуальних характеристик електрообладнання, застосовано метод Байєса:

$$p(H_1 / B) = \frac{p(H_1) \cdot p(B / H_1)}{p(H_1) \cdot p(B / H_1) + p(H_2) \cdot p(B / H_2)}, \quad (5)$$

де $p(H_1)$ – апіорна ймовірність події H_1 до виявлення події B ,

$p(H_2)$ – апіорна ймовірність події H_2 до виявлення події B ;

$p(B/H_1)$ – умовна ймовірність події B при настанні події H_1 ;

$p(B/H_2)$ – умовна ймовірність події B при настанні події H_2 ;

B – подія, що полягає в визначенні у об'єкта ТС S ;

H_1 – подія, що означає відмову об'єкта;

H_2 – подія, що означає безвідмовну роботу об'єкта.

Події $p(H_1)$ та $p(H_2)$ визначаються із статистичної інформації згідно (6, 7):

$$p(H_1) = \frac{F(t_1) - F(t_2)}{1 - F(t_1)}; \quad (6)$$

$$p(H_2) = 1 - p(H_1), \quad (7)$$

де $F(t_1)$ та $F(t_2)$ – значення функції розподілу ймовірності відмови досліджуваного типу обладнання на період прогнозу Δt .

ТС об'єкту, тобто ознака, визначається множиною вхідних змінних на інтервалах Харрінгтона [15] $X = \{x_1 \dots x_5\}$. Ймовірність відмови, тобто альтернативу, визначають на множині вихідних змінних $Y = \{y_1 \dots y_5\}$ на інтервалах Харрінгтона. Взаємозв'язок між ознаками та альтернативами встановлюється причинно-наслідковими співвідношеннями. Сукупність яких складає матрицю причинно-наслідкових співвідношень R розмірністю (5×5) на основі експертних оцінок [16]. Входи S та виходи P розглядаються як нечіткі множини на універсальних множинах X та Y та пов'язані між собою матрицею R :

$$P = R \circ S, \quad (8)$$

де « $\circ$ » – означає максмінну композицію, тобто $p_i = \max \min(s_j, r_{ij})$.

Рішення визначається методом центру ваги альтернатив y_i з відповідними ступенями приналежності p_i :

$$y_{0P(Q)} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{P(Q)i} y_i}{\sum_{i=1}^n P_{P(Q)i}}. \quad (9)$$

$$p(B / H_1) = y_{0P}; \quad (10)$$

$$p(B / H_2) = y_{0Q}. \quad (11)$$

Електрообладнання розподільчих електроустановок поділено на комірки, для зручності виводу в ремонт, які відокремлені роз'єднувачами. Відмова будь-якого апарату комірки призведе до відмови комірки в цілому. Тому ризик відмови електрообладнання РПВН треба розглядати комплексно для комірки в цілому. Ймовірність сумісних подій визначається в загальному вигляді [17]:

$$\begin{aligned} p\left(\sum_{i=1}^n (H_1 / B)_i\right) &= \sum_i p(H_1 / B)_i - \dots \\ &\dots - \sum_{i,j} p((H_1 / B)_i \cdot (H_1 / B)_j) + \dots \\ &\dots + \sum_{i,j,k} p((H_1 / B)_i \cdot (H_1 / B)_j \cdot (H_1 / B)_k) + \dots \\ &\dots + (-1)^{n-1} \sum_n p((H_1 / B)_1 \cdot (H_1 / B)_2 \cdot (H_1 / B)_n), \end{aligned} \quad (12)$$

де n – кількість обладнання, що входить до складу комірки (роз'єднувачі, трансформатор струму, вимикач і т.і.).

3. Розроблення методу визначення ризиків порушення функціонування РПВН

Оцінювання надійності розподільчих пристроїв внаслідок їхньої складної структури та великої кількості складових елементів достатньо трудомістка. Більшість існуючих методів розрахунку надійності розподільчих мереж присвячено частковим випадкам і не підходять до розподільчих пристроїв. При розрахунку надійності РПВН важливе моделювання всіх процесів, які можуть відбутися в електроустановці.

При оцінці розподільчих пристроїв прийнято подання електроустановки у вигляді матриці [18]. На рис. 3 зображено перехід від структури мережі до матриці. Це дозволяє моделювати мережі будь-якої конфігурації, від простих до складних замкнених систем. Дана матриця характеризує топологію досліджуваної електричної мережі.

Рисунок 3 – Перехід від структури мережі до матриці

Елементи матриці мають наступне пояснення: 2 – означає, що елемент знаходиться в працездатному стані; 1 – означає електричний зв'язок між сусідніми елементами електричної установки; 0 – непрацездатний стан елемента електричної установки.

Застосуємо топологічний метод розрахунку ризиків порушення роботи ВРП-750 кВ. В роботі [19], за даними протоколів періодичних випробувань та обстежень, визначено ТС розрядника типу РВМК-750 кВ, в якого було виявлене відхилення від нормативних значень засобами інфрачервоної техніки. Нечітку модель, за якою визначався ТС в [19], модифіковано під систему безперервного контролю ТС обладнання «SAFE-T». В модифікованій нечіткій моделі (рис. 4) використані діагностичні параметри, які можливо контролювати без вивода обладнання з роботи. За цими параметрами сформовані наступні вхідні

лінгвістичні змінні:

- кількість спрацювань;
- струм витоку;
- надлишкова температура.

За модифікованою нечіткою моделлю по виміряним діагностичним параметрам (табл. 1), що впливають на ТС розрядника, розраховано кількісне значення загального спрацьованого ресурсу розрядника. ТС розрядника, що описується вихідною лінгвістичною змінною «Загальний спрацьований ресурс», має чисельне значення 0,901 в.о. (рис. 4).

Таблиця 1 – Загальний спрацьований ресурс розрядника за даними спостереження

Тип обладнання	Кількість комутацій граничних імпульсних струмів N_k , од.		Струм провідності I_{np} , мкА		Надлишкова температурна різниця Δt , °C		Загальний спрацьований ресурс, в.о.
	На момент спостереження	Нормоване*	На момент спостереження	Нормоване*	На момент спостереження	Нормоване*	Розраховано MATLAB Fuzzy Logic
Розрядник РВМК-750	12	≤ 20	326	250-330	12,6	$\leq 2,0$	0,901

* – норми приведені згідно СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007, ГKD 34.35.512-2002, СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007.

Рисунок 4 – Загальний спрацьований ресурс розрядника

Згідно (5)–(12), розрахуємо ймовірність відмови розрядника типу РВМК-750 кВ на інтервалі прогнозу в 1 рік, за наявності відхилень діагностичних параметрів від нормативних значень. Розрядник знаходиться в експлуатації 23 роки. За статистичними даними функціонування даного типу обладнання визначимо $F(t_1)$ та $F(t_2)$ на інтервалі $\Delta t=1$ рік:

$$F(t_1)_{PBMK} = 0,61;$$

$$F(t_2)_{PBMK} = 0,78;$$

$$p(H_1)_{PBMK} = \frac{0,78 - 0,61}{1 - 0,61} = 0,436;$$

$$p(H_2)_{PBMK} = 1 - p(H_1)_{PBMK} = 1 - 0,436 = 0,564.$$

Умовні ймовірності $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$ визначаються на інтервалах шкали Харрінгтона з використанням композиційного правила Заде (8):

$$P_P = R_P \circ S_{PBMK} = \begin{bmatrix} 0,91 & 0,541 & 0,123 & 0,094 & 0,105 \\ 0,326 & 0,897 & 0,652 & 0,036 & 0,018 \\ 0,024 & 0,115 & 0,886 & 0,031 & 0,044 \\ 0,022 & 0,036 & 0,151 & 0,821 & 0,109 \\ 0,06 & 0,04 & 0,012 & 0,08 & 0,835 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 1,0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,91 \\ 0,326 \\ 0,024 \\ 0,022 \\ 0,06 \end{bmatrix};$$

$$p(B/H_1)_{PBMK} = \frac{\sum_{i=1}^5 P_{Pi} \cdot y_{Pi}}{\sum_{i=1}^5 P_{Pi}} = \frac{0,06 \cdot 0,1 + 0,022 \cdot 0,28 + 0,024 \cdot 0,5 + 0,326 \cdot 0,72 + 0,91 \cdot 0,9}{0,06 + 0,022 + 0,024 + 0,326 + 0,91} = 0,803;$$

$$P_Q = R_Q \circ S_{PBMK} = \begin{bmatrix} 0,07 & 0,046 & 0,014 & 0,106 & 0,867 \\ 0,026 & 0,039 & 0,123 & 0,813 & 0,113 \\ 0,038 & 0,098 & 0,837 & 0,044 & 0,047 \\ 0,296 & 0,864 & 0,396 & 0,024 & 0,022 \\ 0,892 & 0,396 & 0,114 & 0,075 & 0,095 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 1,0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,07 \\ 0,026 \\ 0,038 \\ 0,296 \\ 0,892 \end{bmatrix};$$

$$p(B/H_2)_{PBMK} = \frac{\sum_{i=1}^5 P_{Qi} \cdot y_{Qi}}{\sum_{i=1}^5 P_{Qi}} = \frac{0,892 \cdot 0,1 + 0,296 \cdot 0,28 + 0,038 \cdot 0,5 + 0,026 \cdot 0,72 + 0,07 \cdot 0,9}{0,892 + 0,296 + 0,038 + 0,026 + 0,07} = 0,206;$$

$$p(H_1/B)_{PBMK} = \frac{0,436 \cdot 0,803}{0,436 \cdot 0,803 + 0,564 \cdot 0,206} = 0,751.$$

Ймовірність відмови розрядника типу РВМК-750 кВ на інтервалі часу 1 рік складає 0,751 в.о. або 75,1 %. В роботі [19] розрахована поточна ймовірність відмови, яка дорівнює 0,518 в.о. При прогнозуванні ймовірності відмови на інтервалі часу 1 рік, можливо побачити суттєве збільшення ризику відмови.

Згідно [20], використовуючи ймовірнісний метод, визначено за (12) ризики відмов комірок вимикачів В-1, В-2, В-3, В-4 на інтервалі часу 1 рік. Дані розрахунків занесені в табл. 2.

Однолінійна схема з досліджуванням обладнанням ВРП-750 кВ однієї з понижувальної підстанції 750 кВ ОЕС України зображена на рис. 6. Оцінку надійності РПВН виконаємо топологічним методом [21]. Даним методом можливо визначити ймовірність відмови елементів схеми, які мають топологічну залежність та тривалість відновлення обладнання. Також за топологією місця відключення можливо зробити висновок про втрату РПВН транзитної функції або функції живлення системи нижчої напруги. Схема містить в собі наступні елементи: енергосистеми вищої та

зниженої напруги, комірку автотрансформатора зв'язку між енергосистемами, секції шин, комірки вимикачів, до складу яких входять вимірювальні трансформатори та роз'єднувачі.

За даною схемою (рис. 5) будується вихідна матриця (13), що характеризує топологію розподільчої установки. На основі топологічної матриці, для схеми з 9 елементами, проводиться розрахунок ризиків порушення роботи розподільчої установки.

$$C = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Таблиця 2 – Дані розрахунків ймовірності відмови обладнання ВРП – 750 кВ

Найменування електрообладнання ВРП	Ймовірність відмови на інтервалі часу 1 рік $p(H_1/B)$ в.о.
Комірка автотрансформатора АТ-1 розрядник РВАТ-1	0,751
Комірка елегазового вимикача В-1	0,093
Комірка елегазового вимикача В-2	0,101
Комірка елегазового вимикача В-3	0,064
Комірка елегазового вимикача В-4	0,086

Рисунок 5 – Однолінійна схема ВРП – 750 кВ:

1 – енергосистема вищої напруги;
2 – енергосистема нижчої напруги; 3 – комірка автотрансформатора; 4, 5 – системи шин РПВН;
6, 7, 8, 9 – комірки високовольтних вимикачів

В складно-замкнених мережах працездатний стан елемента залежить від ресурсу елементів більш високого рівня. Ризик порушення функціонування електроустановки потребує окремого аналізу для конкретної схеми. Аналізуючи схему ВРП – 750 кВ

(рис. 5) можна зробити наступні висновки:

- відмова енергосистеми вищої напруги призведе до відмови всієї розподільчої електроустановки;
- відмова в комірці автотрансформатора призведе до зупинення перетоку потужності через відповідні комірки вимикачів та систему збірних шин в енергосистему нижчої напруги;
- аварійна відмова комірки вимикача призведе до відмови системи збірних шин, яку вона живить;
- відмова системи збірних шин призведе до зупинення перетоку потужності через комірки вимикачів, які до неї приєднані.

Для розрахунку ризиків порушення роботи електроустановки по критерію $(n-1)$, за методом [21], складаємо топологічну матрицю (табл. 3). Дана матриця характеризує робочий стан «1» або стан відмови «0» елементів, в результаті відмови одного елемента, враховуючи топологічні зв'язки між елементами. Замість визначення «Стан відмови», застосуємо визначення стану елемента «Ймовірність відмови».

Таблиця 3 – Топологічна матриця станів елементів

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	1	1	1	1	1	1	1
4	1	0	0	1	0	0	1	0	1
5	1	1	1	0	1	1	0	1	0
6	1	0	0	1	0	0	1	0	1
7	1	1	1	1	0	0	1	1	1
8	1	1	1	0	1	1	0	1	1
9	1	1	1	1	0	1	1	0	1
10	1	1	1	0	1	1	1	1	0

Дані про ймовірність відмови обладнання отримуються за визначеним підходом в п.2 та за довідниковими даними [22]. За довідниковими та розрахунковими даними (табл. 2), складемо матрицю значень ризиків відмов елементів схеми (табл. 4).

Таблиця 4 – Матриця значень ризиків відмов елементів схеми

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	$1.00 \cdot 10^{-12}$	$1.00 \cdot 10^{-12}$	$1.00 \cdot 10^{-12}$	$1.00 \cdot 10^{-12}$	$1.00 \cdot 10^{-12}$	$1.00 \cdot 10^{-12}$	$1.00 \cdot 10^{-12}$	$1.00 \cdot 10^{-12}$	$1.00 \cdot 10^{-12}$
3	0	$1.00 \cdot 10^{-12}$	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0,751	0,7510	0	0,751	0,751	0	0,751	0
5	0	0	0	0,01	0	0	0,01	0	0,01
6	0	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0
7	0	0	0	0	0,01	0,01	0	0	0
8	0	0	0	0,093	0	0	0,093	0	0
9	0	0	0	0	0,086	0	0	0,086	0
10	0	0	0	0,064	0	0	0	0	0,064

Завершальним кроком – є формування матриці відновлення обладнання (табл. 5), час відновлення обладнання приймається за довідковою літературою.

В чисельнику та знаменнику, відповідно,

(табл. 5) указано найменший та найбільший час відновлення комірок ВРП-750 кВ в залежності від наслідків відмови. Графіки, які характеризують надійність роботи ВРП-750 кВ зображені на рис. 7, 8.

Таблиця 5 – Матриця значень часу відновлення для різних станів схеми

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
3	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0
4	0	32/490	32/490	0	32/490	32/490	0	32/490	0
5	0	0	0	6	0	0	6	0	6
6	0	6	6	0	6	6	0	6	0
7	0	0	0	0	6	4/125	0	0	0
8	0	0	0	6	0	0	4/125	0	0
9	0	0	0	0	6	0	0	4/125	0
10	0	0	0	6	0	0	0	0	4/125

Рисунок 7 – Графік значень ризиків відмов елементів схеми

Рисунок 8 – Графіки залежності часу відновлення комірок

Аналізуючи графіки (рис. 7, 8) можна зробити висновок що найбільша ймовірність пошкодження у розрядника (ймовірність 0,751 в.о.). Час відновлення електрообладнання комірки буде залежати від наслідків аварії, (було супутнє пошкодження автотрансформатора чи ні) і буде варіюватися від 32 до 490 годин. Ця відмова може призвести до втрати зв'язку з енергосистемою нижчої напруги, аварійного простою комірок системи збірних шин та комірок високовольтних вимикачів В2, В4, час відновлення яких є значно меншим. ВРП-750 кВ на час відновлення буде працювати в транзитному режимі.

ВИСНОВКИ. 1. Розроблена узагальнена математична модель визначення ТС основного обладнання розподільчих пристроїв, яка основана на апараті нечіткої логіки. Визначені основні параметри, контролем яких можливо описати ТС основного електрообладнання РПВН. Розроблена математична модель, на відміну від відомих, дозволила проінтегрувати діагностичні параметри, які мають різне природне походження (механічні, теплові, електричні). Адекватність моделі перевірено на практичному прикладі при визначенні ТС розрядника ВРП-750 кВ.

2. Обґрунтоване застосування методу прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання розподільчих пристроїв, що базується на поєднанні евристичного та ймовірностатистичного методів прогнозу функціонування обладнання, що дозволило врахувати поточний ТС апарату та вплив зовнішніх збурень на ймовірність його відмови. За обраним методом розраховано ймовірність відмови розрядника розподільчого пристрою на інтервалі часу, діагностичні параметри якого мали відхилення від нормативних. В наведеному практичному прикладі при спрацьованому ресурсі (ТС) 0,901 в.о. ймовірність відмови на інтервалі часу 1 рік склала 0,751 в.о. Якщо порівнювати з [19], де розрахована поточна ймовірність відмови, яка дорівнює 0,518 в.о., прогнозована ймовірність відмови розрядника на інтервалі часу 1 рік має тенденцію до суттєвого збільшення.

3. Підтверджено ефективність застосування розробленого топологічного методу оцінки ризиків порушення роботи розподільчої електроустановки на прикладі ВРП ПС-750 кВ ОЕС України, при наявності аварійного обладнання. Виконано апробацію даного методу та аналіз найбільш ймовірного сценарію розвитку подій. Даний метод дозволив наглядно оцінити якість роботи розподільчої електроустановки та оцінити ризики порушення показників експлуатаційної роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сінчук О. М., Сінчук І. О., Берідзе Т. М. Приватний коментар до проблеми енергетичної безпеки України. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2018. № 1 (41). С. 53–60.

DOI: 10.30929/2072-2052.2018.1.41.53–60.

2. Дерев'янюк Д. Г., Ярмолук О. С., Беспалий О. А. Особливості режимів функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2018. № 2 (42). С. 61–67. DOI: 10.30929/2072-2052.2018.2.42.61–67.

3. Gaoyang Li, Xiaohua Wang, Aijun Yang, Mingzhe Rong. Failure prognosis of high voltage circuit breakers with temporal latent dirichlet allocation. *In Proceedings of the International Conference on Prognostics and Health Management (PHM-Harbin 2017)*, Harbin, China. 2017. P. 9–12. DOI: 10.3390/en10111913.

4. Панов А. В., Паньків В. І., Сопель М. Ф., Стогній Б. С., Танкевич Є. М. Актуальні питання моніторингу і технічного обслуговування високовольтних вимикачів. *Техн. Електродинаміка*. 2018. № 2. С. 75–85. DOI: <http://doi.org/10.15407/techned2018.02.075>.

5. Xiang Zhang, Ernst Gockenbach, Zhaolin Liu, Haibo Chen, Linghui Yang. Reliability estimation of high voltage SF₆ circuit breakers by statistical analysis on the basis of the field data. *Electric power systems research*. 2013. Vol. 103. P. 105–113. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.04.014>.

6. Ming Ren, Jierui Zhou, Shujing Yang, Tianxin Zhuang, Ning Dong, Ricardo Albarracin. Optical partial discharge diagnosis in SF₆ gas-insulated system with SiPM-based sensor array. *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18. P. 5532–5540. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2836423.

7. Alvarez Gomez F, Albarracin-Sanchez R, Garnacho Vecino F, Granizo Arrabe R. Diagnosis of insulation condition of MV switchgears by application of different partial discharge measuring methods and sensors. *Sensor (Basel)*. 2018. 18 (3):720. DOI: 10.3390/s18030720.

8. Uwe Riechert, Andrija Djurdjic, Matthias Kudoke, Michael Stanek. Monitoring and diagnostics of gas-insulated switchgear – development trends and range of applications. *Conference: FGH-Fachtagung: Assetmanagement in verteilungsnetzen – Methoden, Daten, Praxiserfahrungen*, at Heidelberg. Germany. September 2006.

9. Deepak Kanumuri, Veena Sharma, O.P. Rahi. Analysis using various approaches for residual life estimation of power transformers. *International journal on electrical engineering and informatics*. 2019. Vol. 11. No. 2. P. 389–407. DOI: 10.15676/ijeei.2019.11.2.11.

10. Zhukovskiy Yu. L., Korolev N. A., Babanova I. S., Boikov A. V. The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network. *IOP Conf. Series: Earth and environmental science*. 2017. P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032056.

11. Siyu Wang. Residual life assessment of power transformer based on random fuzzy theory. ISSN: 1662-8985. 2015. Vols. 1070-1072. P. 1127–1132. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1070-1072.1127.

12. Матусевич О. О., Міронов Д. В. Математична модель ризик-аналізу технічного стану силового

обладнання тягових підстанцій. *Гірничі електромеханіка та автоматика*. 2014. № 93. С. 41–47.

13. Bellman R. E., Zadeh L. A. Decision-Making in Fuzzy Environment. *Management Science*. 1970. Vol. 17. P. 141–160.

14. Костерев М. В., Літвінов В. В., Кільова К. А. Оцінка впливу зміни технічного стану обладнання електроенергетичної системи на ймовірність його відмови на інтервалі часу. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2017. № 33. С. 85–93.

15. Ременников В. Б. Управленческие решения. Минск : Юнити, 2005. 144 с.

16. Kosterev M. V., Bardyk E. I., Litvinov V. V. Risk Estimation of Induction Motor Fault in Power System. *WSEAS Transactions on Power Systems*. 2013. Iss. 4. Vol. 8. P. 217–226.

17. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Москва : Наука, 1972. 576 с.

18. Billinton R., Allan N. Reliability evaluation of

engineering systems. Concept and techniques. New York : Plenum Publ. Corp. 1992. 312 p.

19. Доморошин С. В., Сахно О. А. Нечітке моделювання ймовірності відмови апаратів захисту від перенапруг. *Електротехніка та електроенергетика*. 2018. № 3. С. 39–51. DOI: 10.15588/1607-6761-2018-3-5.

20. Доморошин С. В., Літвінов В. В. Оцінювання ймовірності відмови елегазових вимикачів «ГЕС ALSTHOM» на інтервалі часу. *Гідроенергетика України*. 2018. № 1–2. С. 39–44.

21. Шушпанов И. Н., Суслов К. В., Воропай Н. И. Математическая модель и топологический метод расчета надежности распределительной электрической сети. *Вестник ИргТУ*. 2012. № 6 (65). С. 137–141.

22. Гук Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике. Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. 206 с.

DEVELOPMENT OF RISK ANALYSIS METHOD OF HIGH VOLTAGE SWITCHGEAR MALFUNCTION

S. Domoroshchyn, O. Sakhno

National University "Zaporizhzhia Politechnic"

vul. Zhukovskogo, 64, Zaporizhzhia, 69063, Ukraine. E-mail: domoroshchin77@gmail.com, a.sakhno@yahoo.com

Purpose. Development of a method for analysis of the risks of disruption of the high voltage switchgear. Creation of a general mathematical model for determining the technical state of electrical equipment by basic diagnostic parameters. Selection of the approach taking into account the influence of the technical state of electrical equipment on the probability of failure of the switchgear cell. **Methodology.** The mathematical model of determining the technical state of electrical equipment is based on the theory of fuzzy sets and using mathematical modeling based on fuzzy logic. When selecting diagnostic parameters, the Ishikawa causal diagram is applied. The probability of failure of the switchgear cell is predicted by combining the expert and likely statistical method based on the data of the equipment technical condition. The probability of malfunction of the switchgear is determined by the matrix-topological method based on the calculated value of the probability of cell failure. **Results.** According to the developed method, the risk analysis of the probability of disruption of the electric power plant switchgear was performed. For analysis, technical condition of electrical equipment with detected deviation of diagnostic parameters is determined. The probability of failure of the electrical equipment cell has been calculated. The topological effect of the cell on the malfunction of the switchgear was analyzed. **Originality.** For the first time, a method for analyzing the risks of malfunction of the switchgear has been developed. The method is based on predicting the probability of failure of electrical equipment, topological communication of electrical installation cells and analyzing the probable consequences of disruption of the switchgear. **Practical value.** The developed method can be used in predicting the reliability of the operation of electric networks of the combined power system, an important component of which are high-voltage switchgears. Reference 22, tables 2, figures 8.

Key words: switchgear, diagnostic parameters, technical state, probability of failure, cell.

REFERENCES

1. Sinchuk, O. M., Sinchuk, I. O., & Beridze, T. M. (2018). Pryvatnyi komentar do problemy energetychnoi bezpeky Ukrainy. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi systemy*, 1 (41), 53–60. DOI: 10.30929/2072-2052.2018.1.41.53–60. [in Ukrainian]
2. Derev'ianko, D. G., Yarmolyuk, O. S., & Bespalyi, O. A. (2018). Osoblyvosti rezhymiv funktsionuvania integrovanyh system energozabespechenia spozhyvachiv. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi systemy*, 2 (42), 61–67. DOI: 10.30929/2072-2052.2018.2.42.61–67. [in Ukrainian]

3. Gaoyang Li, Xiaohua Wang, Aijun Yang, & Mingzhe Rong. (2017). Failure prognosis of high voltage circuit breakers with temporal latent dirichlet allocation. *In Proceedings of the International Conference on Prognostics and Health Management (PHM-Harbin 2017)*, Harbin, China, 9–12. DOI: 10.3390/en10111913.
4. Panov, A. V., Pan'kiv, V. I., & Sopol', V. I. (2018). Aktual'ni putannia monitoryngu i tekhnichnogo obslugovuvania vysokovol'nyh vymyachiv. *Tekhn. Elektrodynamika*, 2, 25–30. DOI: http://doi.org/10.15407/techned2018.02.075.

5. Xiang Zhang, Ernst Gockenbach, Zhaolin Liu, Haibo Chen, & Linghui Yang. (2013). Reliability estimation of high voltage SF₆ circuit breakers by statistical analysis on the basis of the field data. *Electric power systems research*, 103, 105–113. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.04.014>.
6. Ming Ren, Jierui Zhou, Shujing Yang, Tianxin Zhuang, Ning Dong, & Ricardo Albarracin. (2018). Optical partial discharge diagnosis in SF₆ gas-insulated system with SiPM-based sensor array. *IEEE Sensors Journal*, 18, 5532–5540. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2836423.
7. Alvarez Gomez, F., Albarracin-Sanchez, R., Garnacho Vecino, F., & Granizo Arrabe, R. (2018). Diagnosis of insulation condition of MV switchgears by application of different partial discharge measuring methods and sensors. *Sensor (Basel)*, 18(3):720. DOI: 10.3390/s18030720.
8. Uwe Riechert, Andrija Djurdjic, Matthias Kudoke, Michael Stanek. (2006). Monitoring and diagnostics of gas-insulated switchgear – development trends and range of applications. *Conference: FGH-Fachtagung: Assetmanagement in verteilungsnetzen – Methoden, Daten, Praxiserfahrungen*, at Heidelberg. Germany.
9. Deepak, Kanumuri, Veena, Sharma, & Rahi, O.P. (2019). Analysis using various approaches for residual life estimation of power transformers. *International journal on electrical engineering and informatics*, 11 (2), 389–407. DOI: 10.15676/ijeei.2019.11.2.11.
10. Zhukovskiy, Yu. L., Korolev, N. A., Babanova, I. S., & Boikov, A. V. (2018). The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network. *IOP Conf. Series : Earth and environmental science*, 1–6. doi: 10.1088/1755-1315/87/3/032056.
11. Siyu, Wang. (2015). Residual life assessment of power transformer based on random fuzzy theory. ISSN: 1662-8985, (1070-1072), 1127–1132. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1070-1072.1127.
12. Matusevich, O. O., & Mironov, D. V. (2014). Matematychna model ryzyk-analizu tekhnynogo stanu sylovogo obladnania tiagovykh pidstantsii. *Girnycha elektromekhanika ta avtomatyka*, 93, 41–47. [in Ukrainian]
13. Bellman, R. E., & Zadeh, L. A. (1970). Decision-Making in Fuzzy Environment. *Management Science*, 17, 141–160.
14. Kosterev, M. V., Litvinov, V. V., Kilova, K. A. (2017). Otsinka vplyvu zminy tekhnynogo stanu obladnania elektroenergetychnoi systemy na imovirnist' yogo vidmovy na intervali chasu. *Visnyk NTU «KhPI»*, 33, 85–93. [in Ukrainian]
15. Remennikov, V. B. (2015). *Upravlencheskie reshenia [Management decisions]*. Minsk: Yuniti. [in Russian]
16. Kosterev, M. V., Bardyk, E. I., & Litvinov, V. V. (2013). Risk Estimation of Induction Motor Fault in Power System. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 4 (8), 217–226.
17. Ventsel, E. S. (1972). *Teoria veroiatnosti. [Probability theory]*. Moscow : Nauka. [in Russian]
18. Billinton, R., & Allan, N. (1992). Reliability evaluation of engineering systems. Concept and techniques. New York : Plenum Publ. Corp.
19. Domoroshchyn, S. V., & Sakhno, O. A. (2018). Nechitke modelyuvania imovirnosti vidmovy aparativ zakhystu vid perenaprug. *Elektrotehnika ta elektroenergetyka*, 3, 39–51. [in Ukrainian] DOI: 10.15588/1607-6761-2018-3-5.
20. Domoroshchyn, S. V., & Litvinov, V. V. (2018). Otsinyuvania imovirnosti vidmovy elegazovykh vymykhiv «GEC ALSTHOM» na intervali chasu. *Hydroenergetyka Ukrainy*, 1–2, 39–44. [in Ukrainian]
21. Shushpanov, I. N., Suslov, K. V., & Voropay, N. I. (2012). Matematicheskaya model' I topologicheskoy metod rascheta nadezhnosti raspredelitelnoy elektricheskoy seti. *Vesnik IrGTU*, 6 (65), 137–141.
22. Guk, Yu. B. (1990). *Teoriya nadezhnosti [Reliability theory]*. Leningrad : Energoatomizdat. [in Russian]

Стаття надійшла 15.09.2020.