

Л.Б. ЖОРНЯК, О.І. АФАНАСЬЄВ, Є.В. ВАСИЛЬЄВА, О.П. ЛЕВЧЕНКО

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПОЧАТКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ КОНТАКТНО-ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕМІКАЮЧИХ ПРИСТРОЇВ РПН

У статті пропонуються технічні засоби та методичні матеріали для визначення початкових даних для оцінки основних показників експлуатаційної надійності тиристорного модулю, що комутує великі струми в умовах високих потенціалів і є одним з головних елементів пристрою перемикання під навантаженням силових трансформаторів. Крім того, такі електроапаратні конструкції можуть працювати у структурі різноманітних гібридних вимикачів та в якості силових блоків перетворювальної техніки у структурі систем електроспоживання енергоємних виробництв, тощо. Викладені технічні та методичні засоби дають можливість визначити часові та ймовірнісні показники реальної конструкції тиристорного модулю будь-якого структурного та схемного виконання з урахуванням міри та типу резервування напівпровідникових пристроїв, що його складають. На основі запропонованої методики створюється можливість визначити такі початкові характеристики, як параметри електричного навантаження згідно прикладеної напруги та струму, їх змінення внаслідок перерозподілу навантаження внаслідок змінення рівню резервування з урахуванням конструктивних особливостей як електричного апарату, так і режиму роботи тиристорного модулю. Запропонована методика у сукупності з пристроєм для експериментальних досліджень структури можливих відмов дозволяє здійснити оцінку головних початкових параметрів, що потрібні для визначення впливу конструктивних чинників (кількість напівпровідних приладів, принципу та глибини резервування, економічної складової, тощо) на головні показники експлуатаційної надійності тиристорних модулів різного призначення. Як приклад реалізації запропонованої методики розглянуто один із варіантів реальної конструкції тиристорного модуля в структурі перемикача під навантаженням, що експлуатується протягом тривалого періоду часу в складних умовах в мережі електроспоживання металургійного комплексу (зі збільшеною частотою комутацій, значними перепадами напруги та потужності тощо). Більш точне визначення ефективності запропонованої методики встановлення вихідних даних (тип та параметри теоретичного закону розподілу тощо) для визначення показників експлуатаційної надійності пристрою РПН враховуючи режим навантаження та особливості системи резервування, можна отримати шляхом проведення додаткових досліджень та експериментальних випробувань з використанням запропонованого пристрою для конкретної конструкції тиристорного модуля.

Ключові слова: силовий трансформатор, перемикаючий пристрій, відмова, резервування, тиристорний модуль, випробувальний пристрій, ймовірність безвідмовної праці, інтенсивність відмов, теоретичний закон розподілу випадкової величини.

L.B. ZHORNIK, A.I. AFANASIEV, I.V. VASYLIEVA, O.P. LEVCHENKO

FEATURES OF FORMATION OF INITIAL PARAMETERS FOR DETERMINING RELIABILITY INDICATORS OF ON-LOAD SWITCHING CONTACT-THYRISTOR DEVICES OF POWER TRANSFORMERS

The article proposes technical means and methodological materials for determining initial data when assessing the main indicators of operational reliability of a thyristor module, which switches large currents under high voltage conditions and is one of the main elements of the switching device under load of power transformers. In addition, such designs of electrical equipment can work in the structure of various hybrid switches, as well as power units of converting equipment in the structure of energy consumption systems of energy-intensive industries. The given technical and methodological means allow determining the time and probabilistic indicators of a real thyristor module design of any structural and circuit solution, taking into account the degree and type of redundancy of its semiconductor device components. Based on the proposed methodology, it is possible to determine such initial characteristics as the parameters of the electrical load in accordance with the applied voltage and current, their changes due to load redistribution due to a change in the level of redundancy, taking into account the design features of the electrical equipment, and the operating mode of the thyristor module. The proposed methodology, together with a device for experimental study of the structure of possible failures, allows us to evaluate the main initial parameters that are necessary to determine the influence of design factors (number of semiconductor devices, principle and depth of redundancy, economic component, etc.) on the main indicators of operational reliability of thyristor modules for various purposes. As an example of the implementation of the proposed methodology, one of the options for the real design of a thyristor module in the structure of the on-load tap-changer switching device, which is operated for a long period of time in difficult conditions in the electricity consumption network of the metallurgical complex (with increased switching frequency, significant voltage and power drops, etc.), is considered. A more accurate determination of the effectiveness of the proposed methodology for establishing initial data (type and parameters of the theoretical distribution law, etc.) for determining the operational reliability indicators of the on-load tap-changer device, taking into account the load mode and features of the backup system, can be obtained by conducting additional research and experimental tests using the proposed device for a specific design of the thyristor module.

Keywords: power transformer, switching device, failure, redundancy, thyristor module, test device, probability of failure-free operation, failure intensity, theoretical law of distribution of random variables.

Вступ. У сучасних високовольтних системах електропостачання як загального, так і спеціального призначення найбільш широко використовуються засоби регулювання напруги живлення електричних споживачів за допомогою пристроїв перемикання відгалужень під навантаженням (РПН) [1, 2, 3, 4]. За допомогою такого пристрою перемикаються відгалуження високовольтної обмотки силового трансформатора для забезпечення необхідного рівня напруги живлення віддалених електричних споживачів. Загальний вигляд та конструктивні особливості силового трансформатора з пристроєм РПН показано на рис. 1 [5]. У таких умовах пристрої перемикання відгалужень під навантаженням

суттєво впливають на вимоги до рівня технічної експлуатації як мережі живлення споживачів електроенергії, так і енергосистеми загалом. У цьому випадку питання експлуатаційної надійності засобів регулювання напруги навантаження стає дуже актуальним, а підготовка вихідних даних для попередньої оцінки показників експлуатаційної надійності в умовах максимального рівня достовірності результатів стає важливою складовою питання підвищення рівня експлуатаційної надійності пристроїв РПН.

© Л.Б. Жорняк, О.І. Афанасьєв, Є.В. Васильєва, О.П. Левченко, 2025

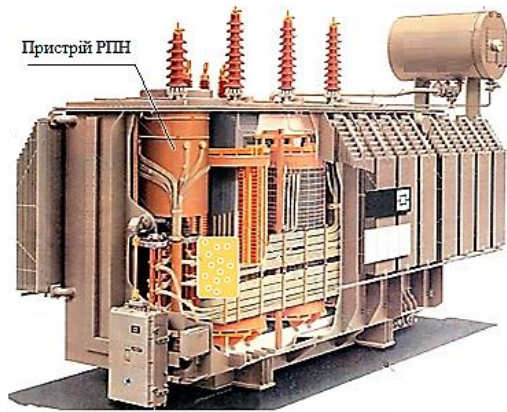
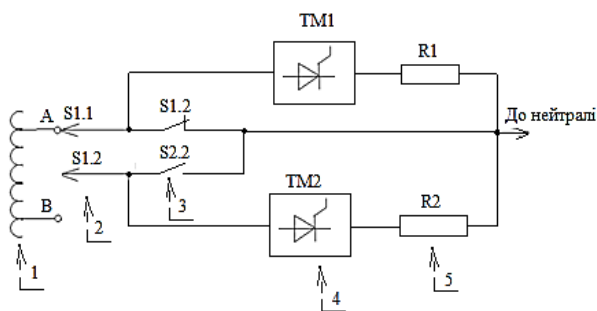


Рис. 1. Вид загальний силового трансформатора з пристроєм РПН [5]

Далі ми розглянемо це питання на прикладі пристрою перемикачів відгалужень обмоток трансформатора під навантаженням РПН типу РНТА-35/125 [6], основні конструктивні елементи якого показано на рис. 2. Конструктивно для регулювання напруги торцевої частина високовольтної обмотки трансформатора має кілька потенційних виводів. Для забезпечення безперервного протікання струму навантаження під час перемикачів з одного відгалуження обмотки до іншого конструктивно пристрій РПН має два паралельних кола.



1 – обмотка з відгалуженнями; 2 – обирач;
3 – головні контакти; 4 – тиристорні модулі;
5 – резистори струмообмеження
Рис. 2. Спрощена схема електрична принципова пристрою РПН з тиристорними модулями [7]

Обирач (2) перемикає коло навантаження в режимі паузи без струму. Головні контакти контактора (3) здійснюють комутацію під навантаженням та забезпечують можливість роботи протягом обмеженого періоду часу без використання тиристорних модулів (ТМ1 та ТМ2) (4), які забезпечують бездугову комутацію електричного кола та виконують функцію дугогасних контактів. Струмообмежувальні елементи (резистори) (5) обмежують струм короткого замикання окремої секції обмотки, який виникає на короткий час під час процесу комутації.

Згідно з даними, наведеними у [1, 8, 9] найбільш навантаженим елементом конструкції пристрою перемикачів напруги під навантаженням є власне контактор, а саме – силовий блок ТМ, принципова електрична схема якого показана на рис. 3.

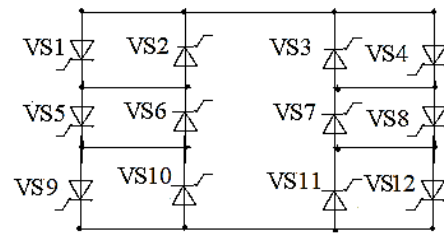


Рис. 3. Схема електрична принципова силового блоку ТМ пристрою РПН [7]

У [7] розроблено методологію та математичний апарат для визначення основних показників експлуатаційної надійності пристрою РПН та його ТМ. Однак для практичної реалізації цієї методики потрібна необхідна кількість вихідних даних, що враховують конкретні параметри навантаження та умови експлуатації перемикачів відводів та його функціональних блоків.

Отже, **головною метою** роботи є розробка технічних умов та математичного забезпечення для визначення вихідних даних, необхідних для розрахунку основних показників експлуатаційної надійності ТМ з максимальним наближенням до реальних умов експлуатації.

В умовах аналітичного визначення показників експлуатаційної надійності важливою складовою є проведення комплексу досліджень для визначення параметрів теоретичного закону розподілу відмов силових тиристорів, що входять у комплектацію ТМ. Максимальний рівень достовірності цих даних може бути досягнутий шляхом проведення визначальних випробувань в умовах, максимально наближених до реальних умов експлуатації пристрою РПН.

Необхідність проведення таких випробувань зумовлена тим, що в режимі циклічного навантаження (чергування імпульсів навантаження та пауз), що характерно для тиристорних РПН, використання вихідних даних, що використовуються для оцінки надійності силових тиристорів перетворювальних блоків, що працюють у відносно статичному навантаженні, може спричинити зниження достовірності отриманих результатів [7]. Це твердження пояснюється тим, що процеси старіння напівпровідної структури тиристорів для цих режимів суттєво відрізняються. За таких умов питання отримання вихідних даних для оцінки надійності тиристорів, що працюють у структурі ТМ, зручно проводити у два етапи.

На першому етапі варто розробити установку, що дозволяє створити умови максимально наближені до тих, у яких пристрій перебуватиме в процесі експлуатації. Таким чином, з високим рівнем достовірності можливо визначити ряд параметрів, необхідних для якісної оцінки основних показників експлуатаційної надійності.

Як основні вимоги при проектуванні випробувального пристрою можна визначити наступне. По-перше, такий пристрій для випробування силових тиристорів ТМ повинен створювати режим навантаження, який максимально відповідає реальним умовам експлуатації перемикачів відгалужень під навантаженням [12]. Одним з основних факторів, що впливають на його

циклостійкість, є зворотна напруга (U_p), яка прикладається до кожного тиристора в закритому стані. Адже U_p є своєрідним випробувальним параметром впливу через те, що він є причиною відмови силових тиристорів, параметри яких з тих чи інших причин перестають відповідати технічним умовам експлуатації. У реальних умовах U_p прикладається до тиристора одразу після його закриття, що відповідає максимальному нагріванню його напівпровідникової структури. Тому важливою умовою є відсутність появи тимчасової паузи між припиненням протікання струму навантаження та початком прикладення високої напруги.

Параметри струмового навантаження ТМ можуть досягати сотень ампер при напрузі кілька тисяч вольт. За таких умов зручно використовувати синтетичну випробувальну схему, в якій джерело струму матиме знижену напругу, що дорівнює 24 В. Номінальна напруга ступеню регулювання подається на силові тиристори від окремого джерела напруги два рази за цикл перемикавання одразу після проходження кожного імпульсу струму. Послідовність імпульсів струму впродовж реального циклу навантаження ТМ за один цикл перемикавання пристрою РПН показана на рис. 4 а.

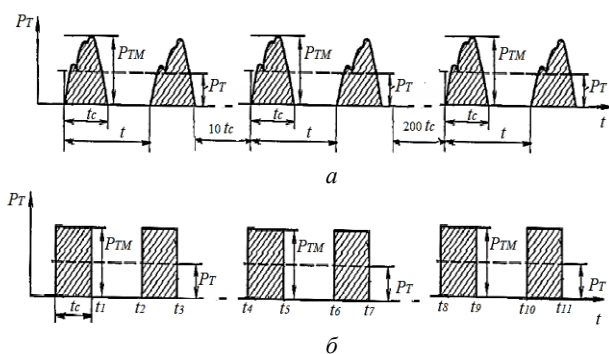


Рис. 4. Послідовність імпульсів струму під час реального (а) та розрахункового (б) циклів навантаження ТМ для одного циклу перемикавання пристрою РПН

Для спрощення подальших розрахунків та обробки отриманої статистичної інформації зручно застосувати метод еквівалентності реальних синусоїдальних або складніших імпульсів до прямокутних, які мають таку ж амплітуду, але зменшену тривалість за умови однакової площі [11-13]. Послідовність еквівалентних імпульсів струму розрахункового циклу навантаження ТМ для одного циклу перемикавання пристрою РПН показана на рис. 4 б.

Узагальнена структурно-функціональна схема випробувального пристрою, що відповідає вищезазначеним умовам, показана на рис. 5, а електрична принципова схема цього пристрою – на рис. 6. Принцип роботи схеми такий. З блоку керування та захисту (БКЗ) за допомогою стабілізатора напруги (СН), програмного реле часу (ПРЧ) та блоку керування (БК) формується робоча програма струмового навантаження ТМ.

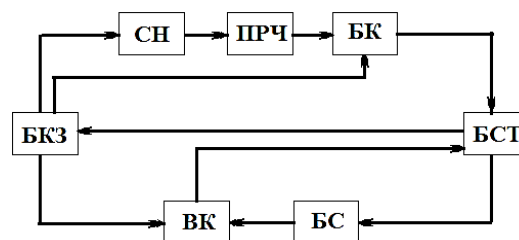


Рис. 5. Структурно-функціональна схема випробувального пристрою

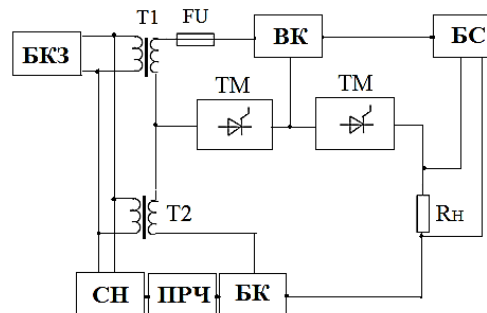


Рис. 6. Схема електрична принципова випробувального пристрою для силового блоку ТМ

Одночасно, за допомогою високовольтного блоку, що містить блок синхронізації (БС) та високовольтний ключ (ВК), формуються високовольтні імпульси та подаються на ТМ. Вони подаються на закриті тиристори одразу після проходження кожних двох напівперіодів струму навантаження. Під час проведення випробувань БС усуває затримку подачі високої напруги на вже закриті тиристори. ВК забезпечує подачу одного напівперіоду високої напруги одразу після закриття силових тиристорів.

Другим етапом формування вихідних даних на основі результатів випробувань є визначення методики випробувань та способу обробки їх результатів. Після отримання статистичної інформації про відмови тиристорів за результатами випробувань необхідно перевірити відповідність реального закону розподілу напружованих годин до відмови в тому чи іншому теоретичному закону розподілу. Наскільки добре отримані моделі законів розподілу відповідають емпіричним розподілам, побудованим за відповідними вибірками, зазвичай перевіряють з використанням критеріїв згоди. Це статистичні методи перевірки гіпотез, які не залежать від параметрів ймовірнісного розподілу даних, а базуються на використанні частот або рангів (порядкових номерів). Вони дозволяють оцінити відповідність спостережуваних даних певній гіпотезі про розподіл, наприклад, перевірити, чи відповідає вибірка заданому закону розподілу. Для цього застосовуються такі непараметричні критерії згоди як: Колмогорова, Крамера-Мізеса-Смирнова, Адерсона-Дарлінга, Купера, Ватсона, Жанга [14] та критерії типу χ^2 , [15] який використовується для перевірки згоди емпіричних частот з очікуваними частотами у різних категоріях. Але використання критерія χ^2 для цієї мети вимагає значної кількості експериментальних даних у кількості не менше ніж у діапазоні від 50 до 60, а тому, щоб скоротити час під час випробувань, необхідно замінити тиристори,

що вийшли з ладу, на нові. Такі випробування проводяться за планом випробувань з відновленням, що характеризуються символом B , при стандартному типі випробувань $[N, B, r]$, де N – кількість тиристорів, що встановлено на випробування, причому кожен тиристор замінюється новим за умови його відмови під час випробувань; r – кількість відмов, при яких випробування завершується [13].

Оскільки гарантована виробником довговічність тиристорів дуже висока, варто використовувати прискорені випробування для подальшого скорочення часу випробувань. Види прискорених випробувань, залежно від тяжкості режиму навантаження, поділяються на дві категорії. Перша – це випробування в номінальному режимі, результати яких прогнозують подальший розвиток випадкового процесу відмов тиристорів за обмежений проміжок часу. Друга категорія – це випробування в режимі вимушеного навантаження, що дозволяє значно скоротити тривалість їх проведення за рахунок прискорення швидкості процесів старіння та зносу [13].

У випадку втомних процесів, які є наслідком термopужних напружень у напівпровідниковій структурі тиристорів через виникаючі перепади температур, таке прискорення процесу зносу відбуватиметься зі збільшенням струмового навантаження. Його збільшення тягне за собою збільшення перепаду температур і, відповідно, інтенсивності термopужних напружень. Щоб не порушувати реальні фізичні процеси, що спричиняють старіння напівпровідникової структури тиристорів, слід вводити граничні умови. У цьому випадку граничною умовою є те, щоб максимальна температура нагрівання напівпровідникової структури тиристора не перевищувала допустимого значення з урахуванням тривалості протікання збільшеного струму навантаження відносно номінального [13].

Якщо за оцінку результатів випробувань прийняти ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$, то згідно з основним законом теорії надійності, який стверджує, що надійність тиристорів за умов (ϵ) залежить від значення ресурсу, що використовувався в минулому, і не залежить від того, як цей ресурс був вироблений, можна записати таку умову:

$$P(t_e \cdot \epsilon_e) = P(t_\phi \cdot \epsilon_\phi), \quad (1)$$

де ϵ_e , ϵ_ϕ – відповідно експлуатаційний та форсований (випробування) режими роботи;

t_e , t_ϕ – відповідно тривалість випробувань в експлуатаційному та форсованому режимах.

На основі умови (1) розроблено метод форсованих випробувань, який називається методом рівних ймовірностей. У цьому випадку група тиристорів випробується в форсованому режимі ϵ_ϕ протягом часу $t_e > t_\phi$, а потім на основі формули (1) оцінюється значення t_e .

Перед проведенням випробувань необхідно визначити режим форсованого випробування, виходячи з умови, що збільшення жорсткості режиму не спричинить порушення природного перебігу фізико-хімічних процесів у структурі тиристорів та закономірностей, що їх описують. Попереднім аналізом джерел [1, 10]

встановлено, що відмови тиристорів в умовах комутації великих струмів виникають через втомне руйнування припою. При цьому їх інтенсивність тим вища, чим більша різниця температур структури тиристора під час протікання струму та в безструмовій паузі. За таких умов доцільно забезпечити збільшення струму навантаження тиристорів до значення $I_{кр}$, що створюватиме можливість отримати максимально допустиму температуру нагрівання структури тиристорів $\theta_{доп}$, тобто умову:

$$\theta_\phi = \theta_{доп} \quad (2)$$

Значення $I_{кр}$ можна визначити, виходячи з умови [1]:

$$P = U_0 \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I + I^2 R_d, \quad (3)$$

де P – втрати потужності в напівпровідниковій структурі тиристора;

U_0 – порогова напруга тиристора;

I – ефективне значення струму тиристора;

R_d – динамічний опір тиристора.

Значення P можна оцінити за рівнянням:

$$P = \frac{\Delta\theta_\phi}{r},$$

де r – перехідний тепловий опір в інтервалі, що відповідає максимально допустимому перегріву структури тиристора;

$\Delta\theta_\phi$ – максимально допустимий перегрів структури у форсованому режимі, який визначається умовою:

$$\Delta\theta_\phi = \theta_\phi - \theta_{о.с.}$$

де $\theta_{о.с.}$ – температура корпусу тиристора (середовища).

Наступним важливим етапом визначення інтенсивності відмов тиристорів є перерахунок даних випробувань у форсованому режимі на номінальний режим роботи. Запропонований метод базується на умові подібності вимушеного та робочого режимів роботи тиристорів. Згідно з ним, на основі даних про відмови, отриманих на основі вимушених випробувань, середній час роботи до відмови визначається умовою:

$$t_{с.ф} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i,$$

де t_i – час безвідмовної роботи i -го тиристора;

n – кількість відмов, отриманих в результаті випробувань.

Умова рівності ймовірностей (1) у випадку використання розподілу Вейбулла як теоретичного закону [7, 8, 9] матиме такий вигляд:

$$\exp \left[- \left(\frac{t_e}{c_e} \right)^{\beta_e} \right] = \exp \left[- \left(\frac{t_\phi}{c_\phi} \right)^{\beta_\phi} \right], \quad (4)$$

де c_e , β_e – параметри розподілу Вейбулла в робочому режимі;

c_ϕ , β_ϕ – параметри розподілу Вейбулла у форсованому режимі випробувань.

Подібність форсованого та робочого режимів забезпечує відповідність форми законів розподілу відмов у цих режимах. Це означає, що функції законів розподілу в робочому та форсованому режимах повинні мати однакову форму (коефіцієнти форми $c_e = c_\phi$) та відрізнятися лише масштабом.

Зміна масштабу закону розподілу може бути забезпечена зміною струму навантаження відносно номінального значення на основі умови (2). Її реалізація забезпечує допустиму температуру нагріву та втомний характер відмов, що відповідає нормальному робочому режиму. Тоді, враховуючи вищесказане та після відповідних перетворень (4), значення коефіцієнта прискорення K , що характеризує відношення часу випробувань у робочому режимі до часу випробувань у форсованому режимі, буде визначатися умовою:

$$K = \frac{t_e}{t_\phi} = \sqrt{\frac{c_\phi \frac{1}{\beta_\phi}}{c_e \frac{1}{\beta_e}}}, \quad (5)$$

Значення коефіцієнта K можна отримати аналітично, якщо кількість циклів роботи ТМ у робочих режимах N_e визначити за умови:

$$K = \frac{t_e}{t_\phi} = \frac{N_e}{N_\phi}.$$

Визначення параметрів N_e та N_ϕ (кількість тиристорів відповідно в експлуатаційному режимі та форсованому режимі випробувань) можна виконати за умови:

$$N = \Phi \cdot \Delta \theta_j^{-m}, \quad (6)$$

або з урахуванням середньої температури довкілля:

$$N = 5,422 \cdot 10^{13} \cdot \Delta \theta_j^{-2,986} \cdot \theta_{o.c}^{-2,542},$$

де Φ, m – постійні коефіцієнти, які залежать від типу тиристорів та температури нагрівання в циклічному режимі [12].

Тоді, підставляючи (6) у рівняння (5), можна отримати:

$$K = \frac{N_e}{N_\phi} = \frac{\Phi \cdot \Delta \theta_e^{-m}}{\Phi \cdot \Delta \theta_\phi^{-m}} = \frac{\Delta \theta_e^{-m}}{\Delta \theta_\phi^{-m}}.$$

Значення параметрів теоретичного закону розподілу c_ϕ та β_ϕ можна оцінити графічним методом з використанням ймовірнісного паперу, графоаналітичними або аналітичними методами [10] на основі результатів випробувань.

Як приклад реалізації цієї методики, на рис. 6 показано розподіл відмов, що було отримано в процесі проведення випробувань у форсованому режимі тиристорів Т-160 впродовж прикладення $3 \cdot 10^4$ циклів навантаження, як показано на рис. 4. Розподіл відмов на координатній сітці закону розподілу Вейбулла показано на рис. 7, а на координатній сітці логарифмічно-нормального закону розподілу показано на рис. 8. Величини емпіричної функції розподілу напрацювання до відмови F визначаються відповідно до експериментальних даних за наступною умовою

$$F(t_i) = r_i / N,$$

де r_i – кількість тиристорів N встановлених на випробування з тих, що відмовили протягом інтервалу від 0 часу до t_i .

Як видно з рис. 7 та рис. 8, теоретичний розподіл Вейбулла (пряма лінія) значною мірою збігається з експериментальним розподілом часу роботи (напрацювання) до відмови силових тиристорів блоку ТМ, що було отримано на основі випробувань. Більш точно міру відповідності експериментальних даних теоретичному закону розподілу можна оцінити із

застосуванням того чи іншого критерію подібності.

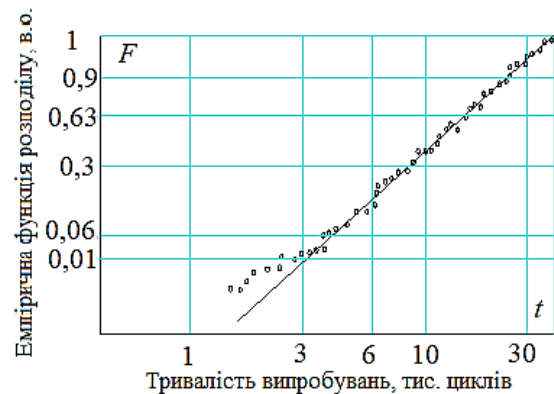


Рис. 7. Розподіл відмов тиристорів Т-160 на координатній сітці для закону розподілу Вейбулла

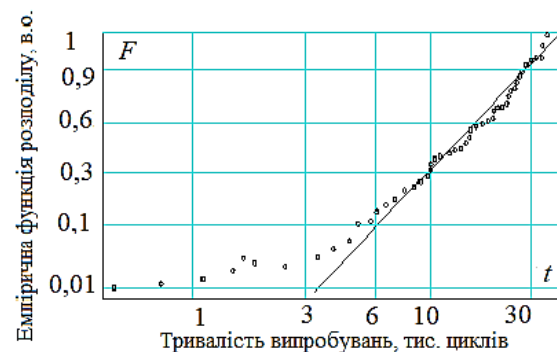


Рис. 8. Розподіл відмов тиристорів Т-160 на координатній сітці для логарифмічно-нормального закону розподілу

Висновки. Впровадження запропонованої методології при проектуванні високовольтної комутаційно-перетворювальної апаратури, а також підвищення її експлуатаційної надійності в структурі споживання електроенергії металургійними комплексами, дозволяє з максимальним рівнем надійності оцінити вплив конструктивного рішення напівпровідникового приладу з урахуванням умов навантаження, впливу зовнішніх та експлуатаційних факторів. Також ця методика дозволяє оцінити ряд вихідних даних, необхідних для визначення основних показників експлуатаційної надійності тиристорних модулів гібридних комутаційних пристроїв перемикача під навантаженням РПН та аналогічного високовольтного електрообладнання.

Запропонований випробувальний пристрій дозволяє проводити форсовані випробування ТМ у режимі, що найбільш точно відповідає реальним умовам експлуатації. Крім того, такий пристрій дозволяє забезпечити так зване «тренування» силових тиристорів з метою виявлення виробів з прихованими виробничими дефектами, що сприяє підвищенню експлуатаційної надійності пристроїв РПН.

Запропонований спосіб аналітичного визначення параметрів режиму форсованих випробувань, за умови максимальної відповідності процесів старіння тиристорів реальним умовам експлуатації, дозволяє значно зменшити обсяг попередніх досліджень при отриманні максимального скорочення часу випробувань, що

підвищує ефективність та надійність формування вихідних даних при оцінці основних показників експлуатаційної надійності як гібридних пристроїв РПН, так і аналогічного високовольтного електрообладнання.

Список літератури

1. Афанасьєв, О. І. Електричні апарати високої напруги / О. І. Афанасьєв, Л. Б. Жорняк, В. М. Щусь. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 356 с.
2. Афанасьєв, О. І. Електроапаратне обладнання систем електропостачання енергоємних виробництв / О. І. Афанасьєв, Л. Б. Жорняк, О. В. Немикіна, В. М. Щусь; за заг. ред. П. Д. Андрієнко. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 432 с.
3. КО «Запорізький завод високовольтної апаратури» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.zva.zp.ua>.
4. ТОВ «Запорізький трансформаторний завод ЕЛІЗ» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.eliz.zp.ua/>.
5. <https://leg.co.ua/transformatory/teoriya/transformatormoe-oborudovanie-dlya-preobrazovatelnyh-ustanovok-14.html>
6. ТОВ «Укрелектроапарат» <https://uea.com.ua/product-category/transformers-dstu>
7. Жорняк, Л. Б. Оцінка надійності тиристорного модулю високовольтних гібридних комутаційних апаратів в умовах резервування / Л. Жорняк, О. Афанасьєв, В. Щусь, О. Левченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – № 2 (12). 2024. – С. 11–17.
8. Коваленко, В. П. Електрична частина станцій та підстанцій [Електронний ресурс]: Навч.-метод. посібник для студ. Усіх форм навчання напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології». – Запоріжжя: ЗДІА, 2014. – 150 с.
9. Орлович, А. Ю. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, О. А. Козловський, О. В. Співак, А. І. Котиш, Т. В. Величко. – Кропивницький: Видавець Лисенко В. Ф., 2019. – 272 с.
10. Жорняк, Л. Б. Особливості обрання теоретичного закону розподілу при оцінці надійності зовнішньої ізоляції газонаповнених вимірювальних трансформаторів [Текст] / Л. Б. Жорняк, О. І. Афанасьєв, В. О. Поляков та ін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ «ХПІ», 2020. – №1(1256). – С. 10–14.
11. Трифонов, В. В. Надійність пристроїв промислової електроніки: Навч. Посібник [Текст] / В. В. Трифонов. – К: Либідь, 1993. – 64 с.
12. Дмитренко, О. І. Використання тиристорів у перемикаючих пристроях трансформаторів загального призначення [Текст] / О. І. Дмитренко та ін. // Апарати високої напруги, трансформатори, силові конденсатори, вип. 9(14), 1974. – С. 15–17.
13. ДСТУ 3021-95 Випробування і контроль якості продукції Терміни та визначення. Поправка (ІПС № 10-1995). ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). – 01.10.1995.
14. Руденко В. М. Математична статистика: навч. посібник. Київ: Центр учбової літератури, 2012. – 304 с.
15. Моцний Ф. В. Статистичні розподіли хі-квадрат, Стюдента, Фішера – Снедекора та їх застосування // Статистика України. 2018. – № 31 (80). – С. 16–23.

References (transliterated)

1. Afanas'yev, O. I., Zhornyak L. B., Shchus' V. M. Elektrichni aparaty vysokoy napruhy. – Zaporizhzhya: NU «Zaporiz'ka politehnika», 2021. – 356 p.
2. Afanas'yev O. I., Zhornyak L. B., Nemykina O. V., Shchus' V. M. Elektroaparatne obladnannya system elektropostachannya enerhoemnykh vyrobnystv; za zah. red. P. D. Andriyenko. – Zaporizhzhya: NU «Zaporiz'ka politehnika», 2023. – 432 p.
3. KO «Zaporiz'kyi zavod vysokovol'tnoyi aparatury» [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: <http://www.zva.zp.ua>.
4. TOV «Zaporiz'kyi transformatornyy zavod ELIZ» [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: <http://www.eliz.zp.ua/>.
5. <https://leg.co.ua/transformatory/teoriya/transformatormoe-oborudovanie-dlya-preobrazovatelnyh-ustanovok-14.html>
6. TOV «Ukrelektroaparat» <https://uea.com.ua/product-category/transformers-dstu>
7. Zhornyak L. B., Afanas'yev O., Shchus' V., Levchenko O. Otsinka nadiynosti tyristornoho modulyu vysokovol'tnykh hibrydnykh komutatsiynykh aparativ v umovakh rezervuvannya. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Problemy udoskonaluvannya elektrichnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka. – 2 (12). 2024. – Pp. 11–17.
8. Zhornyak L. B., Afanas'ev O. I., Polyakov V. O. ta in Osoblyvosti obrannya teoretychnoho zakonu rozpodilu pry otsintsi nadiynosti zovnishn'oyi izolyatsiyi hazonapovnenykh vymiryuval'nykh transformatoriv [Tekst]. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Seriya: Problemy udoskonalennya elektrichnykh mashyn i aparativ. – Kharkiv: NTU «KHPI», 2020. – 1(1256). – Pp. 10–14.
9. Tryfonyuk, V. V. Nadiynist' prystroyiv promyslovoyi elektroniky: Navch. Posibnyk [Tekst]. – Kyiv: Lybid', 1993. – 64 p.
10. Dmytrenko O. I. ta in. Vykorystannya tyristoriv u peremykayuchykh prystroyakh transformatoriv zahal'noho pryznachennya [Tekst]. Aparaty vysokoy napruhy, transformatory, sylovi kondensatory, vyp. 9(14), 1974. – Pp. 15–17.
11. DSTU 3021-95 Vyprobuvannya i kontrol' yakosti produktsiyi Terminy ta vyznachennya. Popravka (IPS № 10-1995). DP «Ukrayins'kyi naukoivo-doslidnyy i navchal'nyy tsentr problem standartyzatsiyi, sertyfikatsiyi ta yakosti» (DP «UkrNDNTS»). – 01.10.1995.
12. Rudenko V. M. Matematychna statystyka: navch. posibnyk. Kyiv: Tsentr uchbovoyi literatury, 2012. – 304 p.
13. Motsnyy F. V. Statystychni rozpodily khi-kvadrat, St'yudenta, Fishera – Snedekora ta yikh zastosuvannya. Statystyka Ukrayiny. 2018. – 31 (80). – Pp. 16–23.
14. Kovalenko, V. P. Elektrichna chastyna stantsiy ta pidstantsiy [Elektronnyy resurs]: Navch.-metod. posibnyk dlya stud. Usikh form navchannya napryamu pidhotovky 6.050701 «Elektrotehnika ta elektrotekhnolohiyi». – Zaporizhzhya: ZDIA, 2014. – 150 p.
15. Orlovych A. YU., Pleshkov P. H., Kozlovskyy O. A., Spivak O. V., Kotysh A. I., Velychko T. V. Elektrichne obladnannya pidstantsiy system elektropostachannya. – Kropyvnyts'kyi: Vydavets' Lysenko V. F., 2019. – 272 p.

Надійшла (received) 11.10.2025

Відомості про авторів / About the authors

Жорняк Людмила Борисівна (Zhorniak Liudmyla Borisivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1417-4859>; e-mail: zporoton@zntu.edu.ua

Афанасьєв Олексій Іванович (Afanasyev Alexej Ivanovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7597-4761>; e-mail: lxafanasyev@gmail.com

Васильєва Євгенія Володимирівна (Vasylieva Ievgeniia Volodymyrivna) – аспірант кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0349-9700>; e-mail: 17irla@gmail.com

Левченко Олександр Петрович (Levchenko Oleksandr Petrovich) – аспірант кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: levchenko17101984@gmail.com