

Л. Б. ЖОРНЯК, О. І. АФАНАСЬЄВ, В. М. ЩУСЬ, О. П. ЛЕВЧЕНКО

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТИРИСТОРНОГО МОДУЛЮ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ГІБРИДНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ В УМОВАХ РЕЗЕРВУВАННЯ

У статті авторами запропоновано методикою оцінки основних показників експлуатаційної надійності високовольтного тиристорного модуля, який є елементом електроенергетичного обладнання, на прикладі конструкції таких електротехнічних пристроїв, як гібридні вимикачі та перетворювачі в структуру тягових підстанцій, систем електропостачання металургійних комплексів тощо. Запропонована методика дає змогу оцінити ймовірність безвідмовної роботи реальної конструкції тиристорного модуля з урахуванням його конструкції та схеми реалізації, а також як рівень і глибина резервування включених до нього напівпровідникових приладів. В якості вихідних даних запропонований спосіб передбачає використання параметрів електричного навантаження за напругою і струмом та їх перерозподіл у міру вичерпання резервного ресурсу з урахуванням конструктивних особливостей як самого електротехнічного пристрою, так і мережі електропостачання, де він знаходиться. встановлено. Запропонована методика дає змогу оцінити ефективність впливу конструктивних факторів (кількості напівпровідникових приладів, принципу та глибини резервування, економічної складової та ін.) на основні показники експлуатаційної надійності відповідних типів високовольтного обладнання з урахуванням електричного навантаження та його змін. Запропонований спосіб апробовано на прикладі реальної схеми тиристорного модуля комутаційного пристрою РПН, який тривалий час перебував у промисловій експлуатації в найбільш несприятливих умовах в структурі електропостачання металургійного виробництва, де присутні це висока частота комутацій, коливання навантаження тощо. Реалізація даної методики в умовах проектування високовольтного комутаційно-перетворювального електрообладнання, а також його експлуатації в структурі електропостачання дозволяє оцінити вплив конструктивних особливостей напівпровідникової частини з урахуванням режиму навантаження, а також впливу зовнішніх і експлуатаційних факторів. Більш точного визначення ефективності запропонованої методики прогнозування показників експлуатаційної надійності залежно від режиму і глибини навантаження та типу системи резервування можна досягти шляхом проведення додаткової серії дослідно-експериментальних перевірок щодо вибору типу теоретичної системи, закон розподілу та визначення його параметрів для конкретних конструкцій електротехнічних пристроїв. Таким чином, зроблено висновок про можливість використання отриманих результатів для оцінки параметрів експлуатаційної надійності вищевказаного високовольтного обладнання, що використовується у складі розподільних пристроїв і систем електропостачання як в умовах високої, так і низької напруги.

Ключові слова: перемикаючий пристрій, відмова, резервування, тиристорний модуль, ймовірність безвідмовної праці, інтенсивність відмов, система диференціальних рівнянь, теоретичний закон розподілу.

L. B. ZHORNIAK, A. I. AFANASIEV, V. M. SCHUS, O. P. LEVCHENKO

RELIABILITY ASSESSMENT OF THE THYRISTOR MODULE OF HIGH-VOLTAGE HYBRID SWITCHGEARS IN RESERVATION CONDITIONS

In the article, the authors proposed a methodology for evaluating the main indicators of the operational reliability of a high-voltage thyristor module, which is an element of electric power equipment, using the example of the design of such electrical devices as hybrid switches and converters in the structure of traction substations, power supply systems of metallurgical complexes, etc. The proposed method makes it possible to estimate the probability of failure-free operation of the real design of the thyristor module, taking into account its design and implementation scheme, as well as the level and depth of redundancy of the semiconductor devices included in it. As initial data, the proposed method involves the use of electrical load parameters in terms of voltage and current and their redistribution as the reserve resource is exhausted, taking into account the design features of both the electrical device itself and the power supply network where it is located. is established. The proposed method makes it possible to evaluate the effectiveness of the influence of design factors (the number of semiconductor devices, the principle and depth of redundancy, the economic component, etc.) on the main indicators of the operational reliability of the corresponding types of high-voltage equipment, taking into account the electrical load and its changes. The proposed method was tested on the example of a real scheme of the thyristor module of the on-load tap-changer switching device, which was in industrial operation for a long time in the most unfavourable conditions in the power supply structure of the metallurgical industry, where there is high switching frequency, load fluctuations, etc. The implementation of this technique in the conditions of designing high-voltage switching and converting electrical equipment, as well as its operation in the power supply structure, allows to evaluate the influence of the structural features of the semiconductor part, taking into account the load mode, as well as the influence of external and operational factors. A more accurate determination of the effectiveness of the proposed methodology for predicting operational reliability indicators depending on the mode and depth of the load and the type of backup system can be achieved by conducting an additional series of experimental tests on the choice of the type of theoretical system, distribution law and determination of its parameters for specific designs of electrical devices. Thus, a conclusion was made about the possibility of using the obtained results to evaluate the parameters of the operational reliability of the above-mentioned high-voltage equipment, which is used as part of switchgear and power supply systems in both high and low voltage conditions.

Keywords: switching device, failure, redundancy, thyristor module, probability of failure-free work, intensity of failures, system of differential equations, theoretical distribution law.

Вступ. Зниження витрат на процеси вироблення та передачі електроенергії (ЕЕ), її зберігання та споживання є одним із головних завдань підвищення ефективності функціонування сучасного електромережевого розподільчого комплексу. Відомими в даний час ключовими напрямками, пов'язаними з вирішенням цього завдання, є концепції: «інтелектуальної» активно-адаптивної мережі (Smart Grid), «інтелектуальних» вимірів (Smart Metering), Інтернету речей (Internet of Things) [1-3]. Їхні елементи отримують свій розвиток у силовому устаткуванні, терміналах релейних захистів та автоматики, пристроях зв'язку та комунікації від

різних українських та світових виробників, таких як: Електротехнічна Компанія Е.NEXT-Україна, АБВ, Schneider Electric, General Electric, Cisco та ін. [3-6]. Разом з цим рішенням поставленому завданню в Україні присвячені заходи з відновлення, а також технічного та інформаційного переозброєння мереж напругою 6 кВ, 10 кВ, 20 кВ та 35 кВ, які далі називаються розподільчими мережами (РМ).

На сьогоднішній день серед основних пристроїв керування в РМ можна виділити сучасну комутаційну апаратуру, у тому числі автоматизовані реклоузери, пристрої регулювання напруги під навантаженням

© Л.Б. Жорняк, О.І. Афанасьєв, В.М. Щусь, О.П. Левченко, 2024

(РПН) силових трансформаторів, пристрої компенсації реактивної потужності, накопичувачі ЕЕ, джерела генерації. Використання можливостей регулювання величини та швидкості видачі активної та реактивної потужності установок розподіленої генерації (РГ) також дає нові перспективи керування потоками в мережах, де вони встановлені [1, 2]. Отже, завдяки відновленню з одночасним технічним розвитком РМ виникає необхідність розширення кола завдань щодо забезпечення їхньої надійної та ефективної роботи.

Аналіз технічних рішень щодо забезпечення надійної та ефективної роботи РМ в літературних джерелах показав, що застосування гібридних комутаційних пристроїв (ГКП) в системах регулювання напруги в розподільчих мережах як загального, так і спеціального призначення грають важливу роль у структурі питань щодо технічної експлуатації енергосистеми та мереж живлення споживачів електроенергії. В цьому сенсі питання о засобах регулювання напруги, їх рівні експлуатаційної надійності приймає дуже важливе значення [1, 2]. Вважається, що одним з найбільш ефективних засобів регулювання напруги у високовольтних мережах є використання пристроїв РПН, які забезпечують перемикання виводів обмоток силового трансформатора (приклад силового трансформатора з пристроєм РПН показано на рис. 1 [1, 2, 7]).

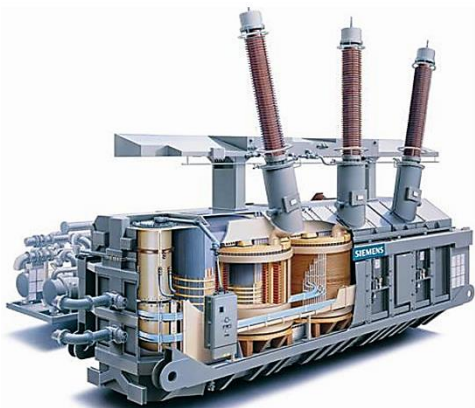
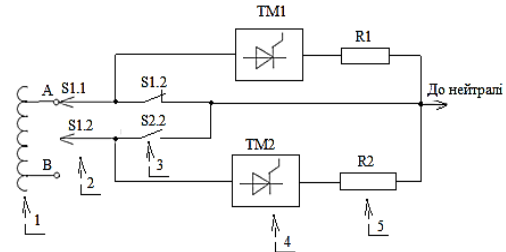


Рис. 1. Вид загальний силового трансформатора з пристроєм РПН [7]

На середніх класах напруги основними заходами щодо зниження втрат ЕЕ в електричних мережах є централізоване регулювання напруги на шинах підстанцій живлення та оптимізація схеми роботи мережі. Перший захід реалізується за рахунок перемикання регулювальних відпайок силових трансформаторів, оснащених пристроями РПН, а другий – шляхом розрахунку можливих втрат ЕЕ від переміщення точки нормального розриву вздовж магістрального контуру мережі. Сьогодні обидва ці заходи повною мірою не реалізуються через вироблення ресурсу трансформаторного та комутаційного обладнання. Однак за наявності сучасного обладнання в РМ за рахунок регулювання режиму роботи мережі та зміни її схеми мережеві компанії можуть знизити витрати на експлуатацію мереж.

Головні структурні елементи пристрою РПН показано на рис. 2. У загальному випадку принцип дії пристрою РПН можливо уявити наступним чином. Кінець

обмотки високої напруги (в зоні нейтралі) силового трансформатора виконано з потенціальними виводами для регулювання напруги. Для забезпечення безперервного протікання струму навантаження в процесі перемикання з однієї відпайки обмотки до другої пристрій РПН має два паралельних кола.



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

Принцип дії схеми, зображеної на рис. 2, є наступним. У початковому стані струм навантаження протікає від відпайки А у нейтраль трансформатора. Для здійснення перемикання з відпайки А на відпайку В контакт обирача S1.2 перемикається на відпайку В за умови відсутності струму. Сигнал керування подається на блок TM1, тиристори відкриваються, і головні контакти S1.2 розмикаються. Сигнал керування подається на блок TM2, і між відпайками А та В протікає циркулюючий струм, який обмежується резисторами R1 і R2. Від блоку TM1 відключається керування, а головний контакт S2.2 замикається. Відключається керування від TM2, і живлення здійснюється від відпайки В. Обирач (1) забезпечує перемикання кола навантаження у безструмову паузу. Контакт (2), який виконано за принципом ГКП здійснює комутацію під навантаженням та має можливість працювати обмежений час без використання тиристорного модулю (3), який виконує функцію контактів дугогасіння. Струмообмежувальний резистор (4) забезпечує обмеження струму короткого замикання секції обмотки в процесі комутації.

Як показує досвід експлуатації пристроїв РПН [1, 2], найбільш навантаженим елементом конструкції є контакт внаслідок електромеханічної ерозії його контактів, що суттєво обмежує термін його експлуатації. Суттєвого підвищення його експлуатаційної надійності можна досягти за рахунок використання тиристорного модулю (ТМ) замість контактів дугогасіння. Але це можливо за умовою, що показники надійності такого модулю будуть на порядок вище надійності самого силового трансформатора.

Тому **головною метою** роботи є розробка методики оцінювання головних показників надійності ТМ при умові, що внаслідок високої напруги його електрична схема має групове з'єднання тиристорів в умовах забезпечення того чи іншого рівню резервування.

З урахуванням таких структурних особливостей у загальному випадку схему електричну принципову ТМ можливо уявити, як показано на рис. 3, де застосовано наступні позначення: g – кількість паралельних кіл, що вміщують h гілок, відмова типу «обрив» яких не

приводить до відмови ТМ; у кожній гілці увімкнено q послідовно з'єднаних тиристорів, r з яких є резервними. Нормальна робота ТМ можлива тільки у випадку, коли у кожній гілці працездатні не менше, ніж $(q-r)$ з q тиристорів, а також відсутній обрив тиристорів у $(g-h)$ з g гілок. Тоді відмова ТМ виникатиме при пробію більш, ніж r тиристорів у будь-якій з гілок, або обриві тиристорів у більш, ніж h гілках. Обрив h з g паралельних гілок призводить до зростання навантаження за струмом, а пробій r з q тиристорів у окремій гілці призводить до зростання навантаження по напрузі тиристорів, що залишилися працездатними.

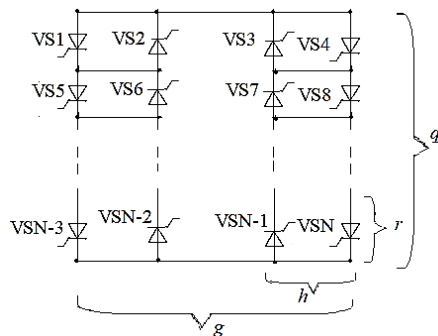


Рис. 3. Схема електрична принципова ТМ

Кожний фіксований стан ТМ, який може виникнути у процесі експлуатації, можливо характеризувати багатовимірним вектором E , перша координата якого позначає число паралельних гілок у ТМ, які не мають обривів та пробитих тиристорів; друга координата позначає число паралельних гілок, які мають один пробитий тиристор; третя координата позначає число паралельних гілок, які мають обрив тиристора; четверта координата позначає число паралельних гілок, що мають два пробитих тиристора і так далі в залежності від глибини резервування. Останні координати вектору E будуть характеризувати число гілок, в яких виник обрив $(h+1)$ тиристорів або їх пробій $(r+1)$, тобто буде представляти відмовний стан ТМ.

Перехід з одного фіксованого стану в інший можливо уявити наступним чином. Нехай пробій виник у одній з паралельних гілок, що мають e тиристорів, що відмовили. Тоді число паралельних гілок, що мають e відмов змінюється на одну, а число гілок, що мають $(e+1)$ відмов зростає на одну. Перехід системи ТМ з одного фіксованого стану E в інший згідно з вище означеним буде характеризуватися наступним чином:

$$\begin{aligned} & [g_0, g_1, g_2, \dots, g_e, g_{e+1}, \dots, g_g] - \\ & - [g_0, g_1, g_2, \dots, (g_e - 1), (g_{e+1} + 1), \dots, g_g]. \end{aligned}$$

Кількість таких переходів визначається сумою координат, що не дорівнюють нулю багатовимірного вектору E . Кожний відповідний перехід здійснюється з інтенсивністю, яка визначається як здобуток кількості діючих тиристорів у гілці, де виникає відмова, на кількість таких гілок та на відповідні інтенсивності відмов λ_i тиристорів даної гілки, тобто виконується умова:

$$\Lambda = q \cdot g \cdot \lambda_i.$$

Перехід системи з одного стану в інший у випадку відмови тиристора типу «обрив» проходить аналогічно з тій різницею, що координата, яка характеризує обрив гілки зростає на одиницю, а якась інша координата, що не дорівнює нулю зменшується на одиницю. Всі стани системи, які характеризуються наявністю у паралельних гілках $(r+1)$ пробитих тиристорів та $(h+1)$ гілок з відмовою тиристорів типу «обрив» є відмовними.

За вище означеною методикою визначаються всі можливі стани системи ТМ, а також інтенсивності кожного переходу з одного стану в інший. Всі відмовні стани об'єднуються у один. Для кращого уявлення процесу переходу з одних станів у інші слід побудувати граф змінень станів системи ТМ. Стрілками на графі вказують напрямок переміщення (переходу) з одного стану в інший.

В якості прикладу реалізації вище наведеної методики розглянемо схему головних кіл ТМ, що показано на рис. 4, яка має наступні конструктивні особливості: схема являє собою систему ТМ з пасивним резервуванням одним тиристором у кожній паралельній гілці; одна з двох гілок бівентилів є резервною; в процесі експлуатації мають місце відмови тиристорів типів «обрив» та «пробій»; внаслідок виникнення відмов тиристорів.

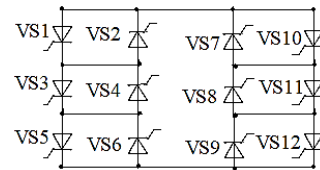


Рис. 4. Схема електрична принципова ТМ пристрою РПН

На основі аналізу наслідків можливих відмов визначаються всі можливі стани ТМ в процесі експлуатації при виникненні відмов окремих тиристорів, перелік таких станів показано на рис. 5.

На основі аналізу можливих станів ТМ (див. рис. 5) та послідовності їх виникнення будується граф змінень можливих станів ТМ в процесі експлуатації з урахуванням принципів резервування та наявності відмов типів «обрив» та «пробій». Причому з метою мінімізації графу стани, що мають однакове позначення вектору E об'єднуються у один стан при умові підведення до цього об'єданого стану всіх можливих переходів від попередніх станів, з яких здійснюється перехід. Біля кожної стрілки таких переходів наноситься значення інтенсивності такого переходу. При визначенні величини інтенсивності такого переходу враховуються такі чинники, як: кількість тиристорів, питома вага відмови, параметри перерозподілу навантаження, вид теоретичного закону розподілу, тощо. Загальний вид графу змінень можливих станів ТМ в процесі експлуатації, що відповідає можливим станам рис. 5, показано на рис. 6.

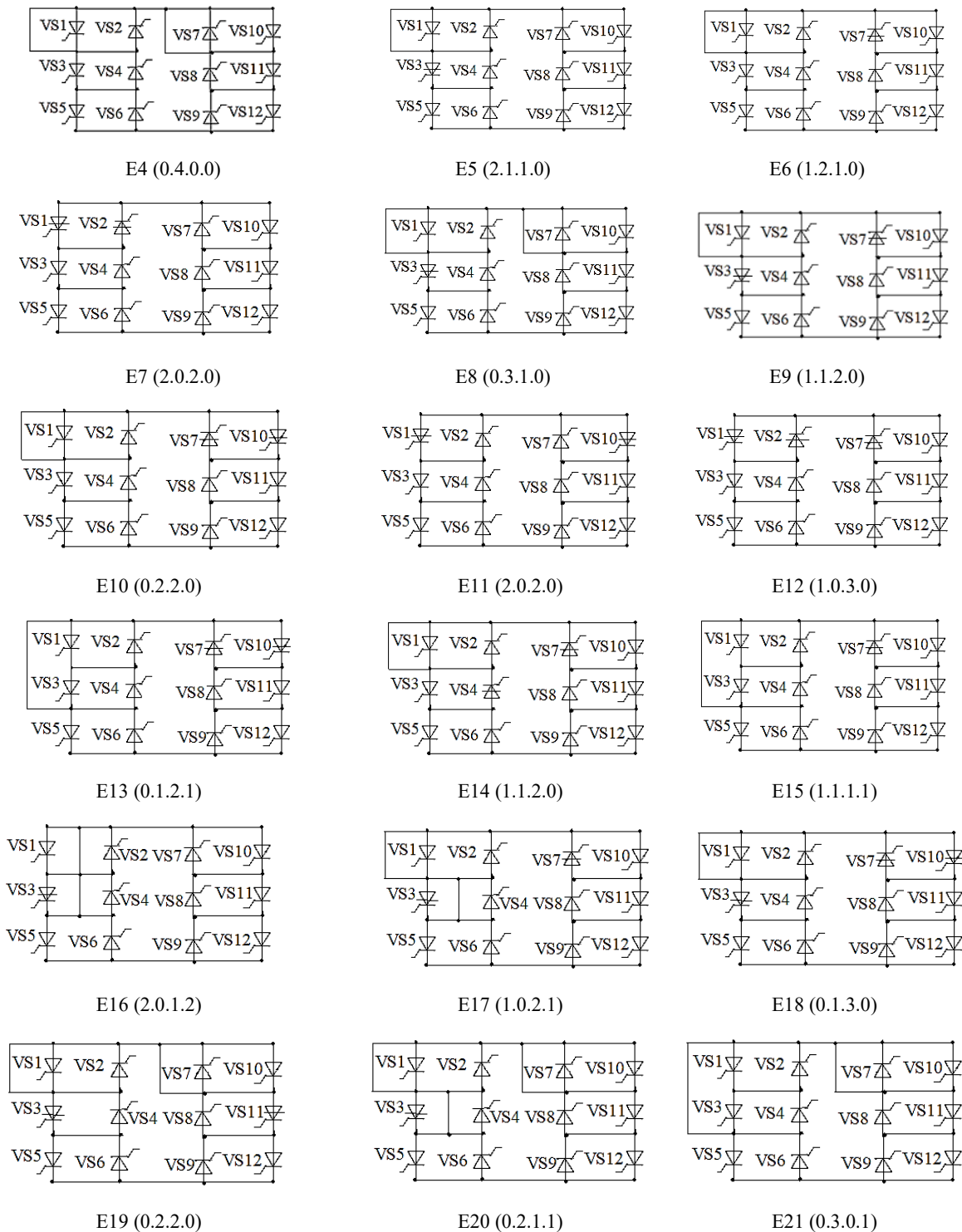


Рис. 5. Можливі стани ТМ при врахуванні відмов тиристорів типів «обрив» та «пробій»

На основі отриманого графу зміння станів ТМ у процесі його експлуатації (див. рис. 6) складається система диференційних рівнянь, що описує даний граф. Сенс кожного рівняння складається у тому, що похідна від ймовірності знаходження системи ТМ у даному стані дорівнює алгебраїчній сумі добутків інтенсивностей переходів на відповідні ймовірності знаходження у станах, з яких здійснюються переходи.

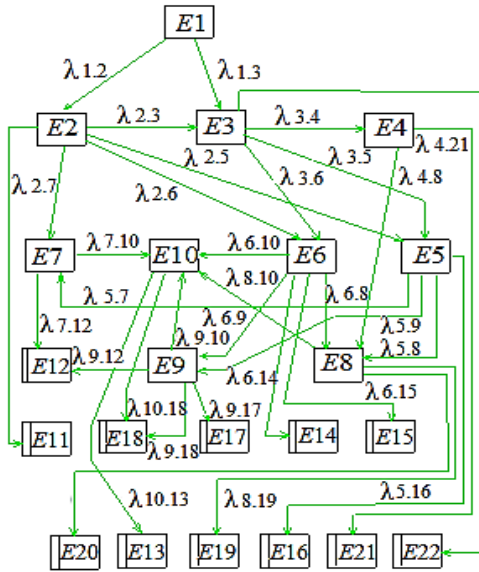


Рис. 6. Граф зміння станів ТМ у процесі експлуатації

Причому складові кожного рівняння, що являють собою перехід з попередніх станів у даний стан обираються зі знаком плюс, а складові, що являють собою перехід із даного стану в наступні стани обираються зі знаком мінус. Тоді, якщо позначити ймовірність знаходження системи ТМ у момент часу t у стані E_i через $P_i(t)$, систему диференціальних рівнянь, яка визначає поведінку ТМ у процесі експлуатації (див. рис. 6), можливо уявити у вигляді наступних рівнянь:

$$\begin{aligned}
 P_1'(t) &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13}) \cdot P_1(t); \\
 P_2'(t) &= \lambda_{12} \cdot P_1(t) - (\lambda_{24} + \lambda_{26} + \lambda_{27} + \lambda_{13} + \lambda_{211}) \cdot P_2(t); \\
 P_3'(t) &= \lambda_{13} \cdot P_1(t) + \lambda_{23} \cdot P_2(t) - (\lambda_{322} + \lambda_{34} + \lambda_{35} + \lambda_{36}) \cdot P_3(t); \\
 P_4'(t) &= \lambda_{34} \cdot P_3(t) + \lambda_{23} \cdot P_2(t) - (\lambda_{48} + \lambda_{421}) \cdot P_4(t); \\
 P_5'(t) &= \lambda_{35} \cdot P_3(t) + \lambda_{25} \cdot P_2(t) - (\lambda_{58} + \lambda_{59} + \lambda_{516} + \lambda_{57}) \cdot P_5(t); \\
 P_6'(t) &= \lambda_{36} \cdot P_3(t) + \lambda_{26} \cdot P_2(t) - (\lambda_{69} + \lambda_{68} + \lambda_{615} + \lambda_{614} + \lambda_{610}) \cdot P_6(t); \\
 P_7'(t) &= \lambda_{27} \cdot P_2(t) + \lambda_{57} \cdot P_5(t) - (\lambda_{710} + \lambda_{712}) \cdot P_7(t); \\
 P_8'(t) &= \lambda_{48} \cdot P_4(t) + \lambda_{58} \cdot P_5(t) + \lambda_{68} \cdot P_6(t) - \\
 &\quad - (\lambda_{820} + \lambda_{819} + \lambda_{810}) \cdot P_8(t); \\
 P_9'(t) &= \lambda_{59} \cdot P_5(t) + \lambda_{69} \cdot P_6(t) - (\lambda_{918} + \lambda_{917} + \lambda_{912} + \lambda_{910}) \cdot P_9(t); \\
 P_{10}'(t) &= \lambda_{610} \cdot P_6(t) + \lambda_{910} \cdot P_9(t) + \lambda_{710} \cdot P_7(t) + \lambda_{810} \cdot P_8(t) - \\
 &\quad - (\lambda_{1018} + \lambda_{1013}) \cdot P_{10}(t); \\
 P_{11}'(t) &= \lambda_{211} \cdot P_2(t) + \lambda_{712} \cdot P_7(t) + \lambda_{912} \cdot P_9(t) + \lambda_{1013} \cdot P_{10}(t) + \\
 &\quad + \lambda_{614} \cdot P_6(t) + \lambda_{615} \cdot P_6(t) + \lambda_{516} \cdot P_5(t) + \lambda_{917} \cdot P_9(t) + \\
 &\quad + \lambda_{918} \cdot P_9(t) + \lambda_{819} \cdot P_8(t) + \lambda_{820} \cdot P_8(t) + \lambda_{421} \cdot P_4(t) + \lambda_{322} \cdot P_3(t).
 \end{aligned}$$

Необхідною умовою використання вище приведенного методу з використанням системи диференціальних рівнянь є те, що процес, що розглядається повинен бути Марківським. Тому важливим етапом розрахунку надійності є визначення характеру цього процесу послідовної зміни станів в електричній схемі ТМ та можливості розглядати його в якості Марківського процесу [8-10].

Згідно з теоретичною математикою випадковий процес $X(t)$ можливо рахувати Марківським, якщо для будь-яких моментів часу $t_k > t_j > t_i$ на проміжку часу $(0, T)$ умовна функція розподілу останнього значення $X(t_k)$

залежить тільки від попереднього значення $X(t_j)$, тобто виконується умова [11]:

$$P \left\{ X(t_k) \leq \frac{x_k}{x(t_i)} = X_i, X(t_j) = X_j \right\} = P \left\{ X(t_k) \leq \frac{x_k}{x(t_j)} = X_j \right\}.$$

Виходячи з цього характерною властивістю Марківського процесу можливо розрахувати наступне: якщо точно відомо стан Марківського процесу у поточний момент часу t_i , то майбутній стан t_k не залежить від минулого стану t_i . Тоді за використанням умовної густини ймовірностей можливо записати наступне:

$$P(t_k, t_i / t_j) = S_{kj}(t_k / t_j) \cdot S_{ij}(t_i / t_j),$$

де $P(t_k, t_i / t_j)$ – сумісна густина ймовірності виникнення випадків i, j та k на проміжку часу $(0, T)$;

$S_{kj}(t_k / t_j) \cdot S_{ij}(t_i / t_j)$ – густини ймовірностей відповідних переходів.

Блок силових тиристорів, що розглядається являє собою систему, що має кінцеве число станів, $E_1, E_2, E_3, \dots, E_i, E_j, E_k$. Дана система послідовно і ступенево змінює власні стани, тобто мають місце переходи $E_1 \rightarrow E_i \rightarrow E_j \rightarrow E_k$. Кожне наступне зміння визначається навантаженням на працюючі тиристори та місцем розміщення цих тиристорів у схемі ТМ, тобто станом ТМ у попередній момент часу.

Приймаємо припущення, що стан E_j визначено, тоді на основі попереднього рівняння можна записати:

$$\begin{aligned}
 P(E_k, E_i, E_j) &= \frac{P(E_i, E_j, E_k)}{P(E_j)} = \frac{P(E_i, E_j) \cdot S(E_k, E_j)}{P(E_j)} = \\
 &= S_{ij} \left(\frac{E_i}{E_j} \right) \cdot S_{jk} \left(\frac{E_k}{E_j} \right).
 \end{aligned}$$

Отриманий висновок дозволяє стверджувати, що випадкові величини E_i та E_k можна вважати незалежними. Тоді послідовність випадкової зміни станів блоку силових тиристорів, що розглядається, можна рахувати Марківським процесом.

З практичної точки зору отримати підтвердження, що процес, який розглядається, можна вважати однорідним Марківським процесом завдяки рівнянню А. М. Колмогорова, що має наступний вигляд [11]:

$$S_{jk}(t) = \frac{\lambda_{jk}(t)}{z_i},$$

де S_{jk} – умовна ймовірність переходу системи зі стану E_j у стан E_k за умови, що система вийшла зі стану E_j ;

λ_{jk} – інтенсивність переходу системи зі стану E_j у стан E_k ;

z_i – сумарна інтенсивність переходу виходу системи зі стану E_j .

Якщо вищезначена умова виконується, можливо стверджувати, що процес, що розглядається є однорідним Марківським процесом, і до нього можливо застосування теорії «загибелі та розмноження», яка описується за допомогою вище зазначеної системи диференціальних рівнянь.

Для подальшого рішення отриманої системи диференціальних рівнянь необхідно визначити наступні початкові параметри перелік яких можливо сформулювати за допомогою рівняння зв'язку наступним чином [11, 12]:

$$\lambda_i(t) = f(\lambda_0, n, K1, K2, K3, I_{\text{нав}}, U_{\text{роб}}, \dots),$$

де λ_0 – інтенсивність відмов у номінальному режимі навантаження тиристорів, значення якої визначається з урахуванням типу теоретичного закону розподілу, який у кожному конкретному випадку потребує проведення додаткових досліджень [12];

n – кількість працездатних тиристорів;

$K1, K2$ – відповідно коефіцієнти, що враховують зростання інтенсивності відмов тиристорів внаслідок зростання зворотної напруги та струму навантаження по мірі відмови резерву у процесі експлуатації. Числове значення цих коефіцієнтів визначається для конкретної схеми, типу тиристорів, глибини резервування, тощо;

$K3$ – коефіцієнт, що враховує частоту виникнення відмов типу «обрив» по відношенню до відмов типу «пробій» у процесі експлуатації;

$I_{\text{нав}}, U_{\text{роб}}$ – відповідно струм навантаження та робоча зворотна напруга, що діють на тиристори.

Рішення отриманої системи диференціальних рівнянь дозволяє визначити ймовірності знаходження системи ТМ у кожному стані. Сума ймовірностей знаходження системи ТМ у всіх станах за виключенням відмовних дає ймовірність безвідмовної роботи за визначений час (кількість циклів роботи) наступним чином:

$$P(t) = \sum_{i=1}^v P_i(t),$$

де v – число станів (диференціальних рівнянь) системи ТМ за виключенням відмовних;

$P_i(t)$ – ймовірності знаходження у кожному з v станів.

Висновки. На основі вище наведеної методики можна здійснити оцінку експлуатаційної надійності будь-якої схеми не тільки гібридних комутаційних апаратів різного призначення, але й силової частини перетворювальних агрегатів в структурі тягових підстанцій, системах електроспоживання металургійних комплексів тощо. На основі отриманих результатів можливо досягнути оптимального співвідношення таких показників, як рівень експлуатаційної надійності та коштовність технічних засобів для її реалізації з урахуванням конкретних умов функціонування.

Для отримання кінцевих результатів необхідно доповнити вище означену методику початковими даними, що відображують змінення інтенсивності відмов під дією експлуатаційних чинників, а також засобами визначення типу та параметрів теоретичного закону розподілу, що описує цій випадковий процес.

В якості прикладу реалізації вище зазначеної методики за умови використання розподілу Вейбула в якості теоретичного закону на рис. 7 показані залежності розподілу ймовірностей безвідмовної праці для деяких станів системи ТМ згідно вище означеної системи диференціальних рівнянь з урахуванням початкових даних, що наведені у табл. 1. При рішенні системи диференціальних рівнянь та побудові графіків вводяться початкові умови: $P_1(0)=1; P_2(0); \dots; P_{11}(0)=0$.

Таблиця 1 – Головні початкові дані для визначення розподілу ймовірностей знаходження системи ТМ у різних станах

Напрацювання	Коефіцієнти		
	$K1$	$K2$	$K3$
10^6 циклів	1,44	1,26	0,25

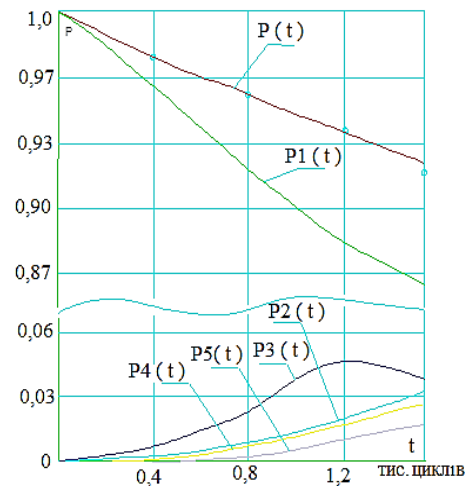


Рис. 7. Приклад графіків розподілу ймовірностей знаходження системи ТМ у окремих станах у процесі експлуатації.

Список літератури

- Афанасьев, О. І. Электричні апарати високої напруги / О. І. Афанасьев, Л. Б. Жорняк, В. М. Щусь. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 356 с.
- Афанасьев, О. І. Электроапаратне обладнання систем електропостачання енергоємних виробництв / О. І. Афанасьев, Л. Б. Жорняк, О. В. Немикіна, В. М. Щусь; за заг. ред. П. Д. Андрієнко. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 432 с.
- <https://enext.ua/uk/>
- https://enext.com/about/#packaged_supply
- www.abb.com
- <https://www.se.com/ua/uk/>
- <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:0ee68de45f229220f27381e8744e012dcb76d32e/peg-part05-ru.pdf>
- https://uk.wikipedia.org/wiki/Марковський_процес_вирішування
- [https://ukrayinska.libretexts.org/Статистика/Теорія_ймовірностей/Ймовірність%2C_математична_статистика_та_стохастичні_процеси_\(Siegrist\)/16%3A_Марківські_процеси](https://ukrayinska.libretexts.org/Статистика/Теорія_ймовірностей/Ймовірність%2C_математична_статистика_та_стохастичні_процеси_(Siegrist)/16%3A_Марківські_процеси)
- Shebanin, V. Optimization Method for Electromagnetic Systems of Electrical Apparatus [Electronic Resource] / V. Shebanin, L. Vakhonina, L. Zhorniak, O. Sadovoy // Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022, 2022.
- Карташов М. В. Навчальний посібник з курсу «Процеси Маркова в актуарній математиці» / Упорядник: М. В. Карташов – К., Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008 – 56 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://probability.knu.ua/userfiles/kmv/markact.pdf>.
- Жорняк, Л. Б. Особливості обрання теоретичного закону розподілу при оцінці надійності зовнішньої ізоляції газонаповнених вимірювальних трансформаторів [Текст] / Л. Б. Жорняк, О. І. Афанасьев, В. О. Поляков, Ж. О. Кулік, Р. В. Кот, І. О. Кравець // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2020. – № 1. – С. 10– 14.

References (transliterated)

- Afanasyev O.I., Zhorniak L.B., Shchus' V.M. Elektrichni aparaty vysokoyi napruhy. Zaporizhzhya: NU «Zaporiz'ka politekhnika»,

2021. 356 p.
2. Afanas'yev O.I., Zhornyak L. B., Nemykina O. V., Shchus' V. M. Elektroaparadne obladnannya system elektropostachannya enerhoyemnykh vyrobnystv; za zah. red. P. D. Andriyenko. Zaporz'ka politekhnika, 2023. 432 p.
 3. <https://enext.ua/uk/>
 4. https://enext.com/about/#packaged_supply
 5. www.abb.com
 6. <https://www.se.com/ua/uk/>
 7. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:0ee68de45f229220f27381e8744e012dcb76d32e/peg-part05-ru.pdf>
 8. https://uk.wikipedia.org/wiki/Markovs'kyy_protse_pryynyattya_rishen'
 9. [https://ukrayinska.libretexts.org/Statistics/Teoriya_probabilnykh_Probability%2C_mathematical_statistics_and_stochastic_processes_\(Siegrist\)/16%3A_Markov_processes](https://ukrayinska.libretexts.org/Statistics/Teoriya_probabilnykh_Probability%2C_mathematical_statistics_and_stochastic_processes_(Siegrist)/16%3A_Markov_processes)
 10. Shebanin, V., Vakhonina L., Zhorniak L., Sadovoy O. Optimization Method for Electromagnetic Systems of Electrical Apparatus [Electronic Resource]. Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022, 2022.
 11. Kartashov M. V. Navchal'no-metodychnyy posibnyk z kursu «Markovs'ki protsesy v aktuarniy matematytsi». K., Vydavnycho-polihrafichnyy tsentr Kyiv's'koho universytetu, 2008. 56 p. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: <https://probability.knu.ua/userfiles/kmv/markact.pdf>
 12. Zhornyak, L.B., Afanas'yev O.I., Polyakov V.O., Kulik Zh.O., Kot R.V., Kravets' I.O. Osoblyvosti obrannya teoretychnoho zakonu rozpodilu pry otsyntsi nadiynosti zovnishn'oyi izolyatsiyi hazonapovnenykh vymiryval'nykh transformatoriv [Tekst]. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPi». Seriya: Problemy udoskonalyuvannya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka. 2020. No 1. Pp. 10–14.

Надійшла (received) 30.03.2024

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, e-mail: lxafanasyev@gmail.com

Щусь Віталій Миколайович (Schus Vitaliy Mikolaievich) – аспірант кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: Nittz.ltd@gmail.com

Левченко Олександр Петрович (Levchenko Oleksandr Petrovich) – аспірант кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна.