

ПРЕДСТАВЛЕННЯ ШАФ КРУ НАПРУГОЮ 6 (10) КВ ЯК КІНЦЕВОГО АВТОМАТУ

Мета публікації – розробити методологію представлення шаф КРУ напругою 6 (10) кВ у вигляді кінцевого автомату.

Комплектний розподільний пристрій – це один з найвідповідальніших електричних апаратів середньої напруги. Надійна їх робота забезпечує безперебійне електропостачання промисловості, адміністративно-побутових приміщень та сільського господарства.

Доведено, що принцип дії шаф КРУ подібний до детермінованого кінцевого автомату. Застосована теорія кінцевих автоматів та графів для аналізу роботи шафи комплектної розподільної установки. Показано, що теорія кінцевих автоматів дозволяє звести воедино усі можливі режими роботи шаф КРУ.

Представлення моделі шафи КРУ у вигляді детермінованого кінцевого автомату дозволяє запроєктувати шафу з необхідними рисами.

Розроблена діаграма переходів станів шафи КРУ напругою 6 (10) кВ. Така діаграма може бути корисна для розуміння роботи шафи комплектної розподільної установки, підвищення кваліфікації електротехнічного персоналу.

На прикладі шафи КРУ типу К-ХІІ з вимикачем ВМП-10К (приєднання СД-300 кВт) наведений повний опис роботи шафи за допомогою морфологічних фраз.

Зроблений висновок, що будь-який комутаційний апарат напругою як до, так і вище 1000 В може бути представлений у вигляді кінцевого автомату. Окрім діаграми переходів станів робота комутаційних апаратів повинна бути викладена за допомогою морфологічних фраз (ЯКЦО, ТА, АБО, ТО, НЕ МОЖНА).

Ключові слова: кінцевий автомат, комплектна розподільна установка, діаграма переходів.

Вступ.

Комплектний розподільний пристрій – це сукупність електротехнічного обладнання, необхідного для схеми розподільчого пристрою, змонтованого окремими шафами на спеціалізованих заводах в умовах серійного виробництва.

Комплектні розподільні пристрої (КРУ) напругою 6 та 10 кВ є найважливішими елементами систем електропостачання та багато в чому визначають надійність електропостачання споживачів.

У камері КРУ висувний елемент щодо корпусу шафи займає робоче, контрольне (роз'єднане) або ремонтне положення: робоче, коли головні та допоміжні кола шафи замкнуті; контрольне, коли головні кола розімкнуті, а допоміжні замкнуті (у цьому випадку допускається розмикання допоміжних кіл - таке положення називають роз'єднаним); ремонтне, коли висувний елемент знаходиться поза корпусом шафи та її головні та допоміжні кола розімкнуті.

Розрізняють такі типи КРУ: КРУН (комплектні розподільні пристрої зовнішньої установки), КРУ (комплектні розподільчі пристрої), КСВ (камери збірні одностороннього обслуговування).

Вимикачі 6÷10 кВ служать для відключення або підключення споживачів електроенергії, а також для зняття живлення з окремих ділянок системи для обслуговування, для швидкого відключення від електричної системи ділянок з пошкодженнями, що викликають протікання струмів короткого замикання для збереження електропостачання решти системи. Всі вищеперелічені операції вимагають виконання відключень (комутацій) електричного струму, що є особливо непростим завданням у разі відключення пошкодженої ділянки, коли величина струму, що відключається (струм короткого замикання) може досягати десятків тисяч ампер, а час, відведений на відключення аварійної частини системи обмежено проміжком 50 -100 мілісекунд.

Контакти вимикача розмикаються, вимикаючи аварійний струм. Надійна робота та безпечне обслуговування вимикачів високої напруги неможливі без надійного приводу, що забезпечує безвідмовне виконання операцій увімкнення та вимкнення вимикачів та роз'єднувачів вручну та автоматично. Монтаж приводу повинен бути по можливості простим і не вимагати спеціальних знань, він не повинен вимагати і точних робіт із встановлення та регулювання приводу.

Коли контакти, по яким протікає струм, розмикаються, незалежно від типу дугогасильного середовища, у якому перебувають контакти (вакуум, рідина чи елегаз), з-поміж них виникає електрична

дуга. Маючи достатню електричну провідність, що виникла між контактами, дуга забезпечує струму короткого замикання шлях його подальшого протікання. Струм, маючи практично індуктивний характер, відстає від напруги джерела на 90° , таким чином, коли струм підходить до нуля, напруга джерела досягає свого максимального значення.

Кабелі, трансформатори струму та напруги та обмежувачі перенапруг розташовуються в кабельному відсіку позаду вимикача. Верхню частину осередку займає релейна шафа чи релейний відсік.

Альтернативний підхід – розташування вимикача у середній частині шафи КРУ. Шафа при цьому чітко ділиться на три яруси: у нижній частині розташовуються кабелі та трансформатори нульової послідовності («бублики»), в середній - вимикач у т.з. "касетному" виконанні. Верхню частину зазвичай займає релейний відсік. В релейному відсіку встановлюються електровимірювальні прилади, пристрої захисту, автоматики та керування.

Типове компонування апаратів у шафах КРУ наведено на рис. 1.

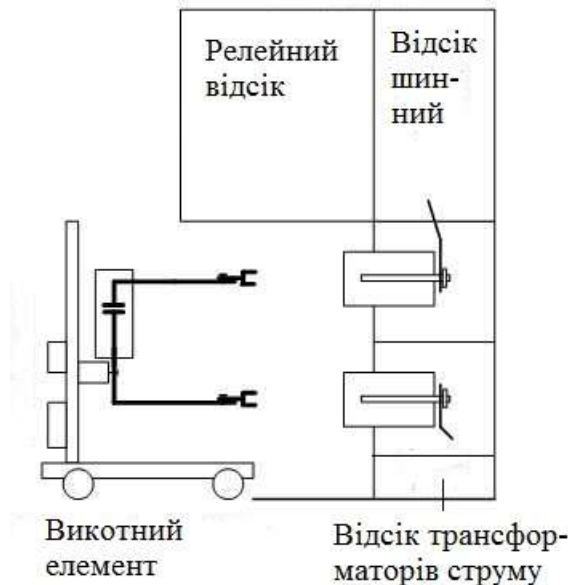


Рисунок 1 - Комірка КРУ з викаченим вимірювальним елементом

Основним елементом КРУ, що впливає на надійність, є висувний елемент з вимикачем. У ньому зібрано більшість необхідних блокувань.

Головні з них:

- блокування, що не дозволяє вкотити у робоче положення висувний елемент із увімкненим вимикачем;
- блокування, що не дозволяє вкотити із зафіксованого контрольного або робочого положення висувний елемент з увімкненим вимикачем;
- блокування, що не дозволяє увімкнути вимикач при знаходженні висувного елемента (викатної частини) в проміжному (між робочим та контрольним) положенні;
- блокування, що не дозволяє вкотити висувний елемент у робоче положення шафи при включеному заземлювальному роз'єднувачі, та ін.

Для опису роботи шафи комплектної розподільної установки (КРУ) доцільно застосувати теорію кінцевих автоматів.

Модель шафи КРУ, як і будь-якого елемента системи електропостачання, можна спробувати подати у вигляді кінцевого автомату

$$M_c = (X, Y, Q, r, s),$$

де X - безліч вхідних величин: $X = \{x_i; i = \overline{1, n}\}$; Y - безліч вихідних величин: $Y = \{y_j; j = \overline{1, m}\}$; X - безліч

станів: $Q = \{q_l; l = \overline{1, p}\}$; r - перехідна функція: $r = X \times Q \rightarrow Q$; s - вихідна функція: $s = X \times Q \rightarrow Y$.

Кінцевий автомат в теорії алгоритмів – модель дискретного пристрою, що має один вхід, один вихід і в кожен момент часу знаходиться в одному стані з безлічі можливих. Поведінка кінцевого автомата може бути представлена діаграмою переходів станів.

Теоретичні засади роботи кінцевих автоматів викладені в класичній роботі [1]. В праці [2] запропоновано використовувати кінцеві автомати для проектування систем електропостачання промислових підприємств. В публікації [3] показано роботу компресорних установок як кінцевого автомату.

Мета та задачі. Метою даної роботи є представлення шафи комплектної розподільної установки напругою 6 (10) кВ як кінцевого автомату.

Матеріал та результати досліджень.

Проведений аналіз видів схем керування приєднаннями 6 (10) кВ.

Є декілька видів вторинних кіл шаф КРУ в залежності від призначення комірок. Це приєднання СТ, АД, СД, КУ, СВ, ТН, де:

СТ – силовий трансформатор 6(10)/0,4 (0,22) кВ;

АД – електродвигун асинхронний 6 кВ;

СД – електродвигун синхронний 6 кВ;

КУ - конденсаторна установка напругою вище 1 кВ;

СВ – секційний вимикач;

ТН – трансформатор напруги.

Доцільно ввести скорочені позначення видів релейного захисту згідно стандарту ANSI [4].

Основні коди стандарту ANSI C37.2, прийняті для позначень релейного захисту у мережах 6-10 кВ, що застосовуються для захисту шаф КРУ різних призначень, наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Основні коди стандарту ANSI C37.2, що застосовуються для релейного захисту шаф КРУ напругою 6 (10) кВ

Код ANSI	Найменування функції захисту
27	Захист мінімальної напруги (ЗМН)
40	Захист від асинхронного режиму із втраченою збудження
49	Захист від перевантаження
50	Максимальний струмовий захист у фазах, миттєвий (струмова відсічка)
51	Максимальний струмовий захист у фазах, з витримкою часу (МСЗ)
51N	Максимальний струмовий захист на землю (захист від замикання на землю 333)
51NC	Захист від струму небалансу
59	Захист максимальної напруги
87M	Диференційний захист електродвигуна

Види релейного захисту, що застосовується на приєднаннях у системі електропостачання 6-10 кВ промислових підприємств та відповідний захист для різних шаф КРУ наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Види релейного захисту в залежності від типу шаф КРУ

Введення 6-10 кВ ГПП	СТ	АТ	ЦД	КУ	СВ
49, 51	50, 51	50, 51, 51N, 27	27, 40, 50, 51, 51N, 87M	27, 50, 51, 51NC, 59	51

Згідно теорії управління кінцевий автомат – це модель дискретного пристрою, що має входи і виходи та може перебувати у кожен час лише в одному стані. Іншими словами, кінцевий автомат є сукупністю безлічі станів і функцій переходів між ними за подіями. Зазвичай кінцевий автомат зображується у вигляді діаграми переходів. Для осередку КРУ виконавчим механізмом є високовольтний вимикач, який впливають зовнішні чинники через релейну захист. Доцільно представити шафу КРУ як «чорну скриньку» (рис. 2).

Кнопка скидання RESET необхідна для того, щоби повернути КА у вихідний стан після подачі живлення. Шафу КРУ як КА можна перезавантажити (повернути у вихідний стан) за допомогою команди RESET, яка для шафи КРУ є або кнопкою ручного відключення, або рукояткою ручного відключення.

Нескладно представити роботу шаф КРУ за допомогою діаграми переходів станів шафи КРУ (рис. 3).

Граф діаграми переходів може бути використаний для навчання електротехнічного персоналу.

За допомогою діаграми переходів станів можливо як можна повніше описати функціональні можливості комірки КРУ.

Як вказано в [2], окрім діаграми переходів станів робота шафи КРУ повинна бути викладена за допомогою морфологічних фраз (ЯКЩО, ТА, АБО, ТО, НЕ МОЖНА та інші).

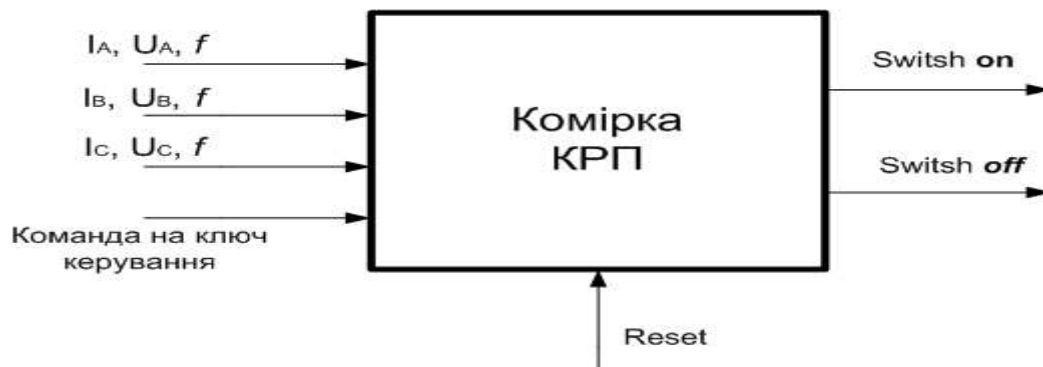


Рисунок 2 - Шафа КРУ як «чорна скринька»

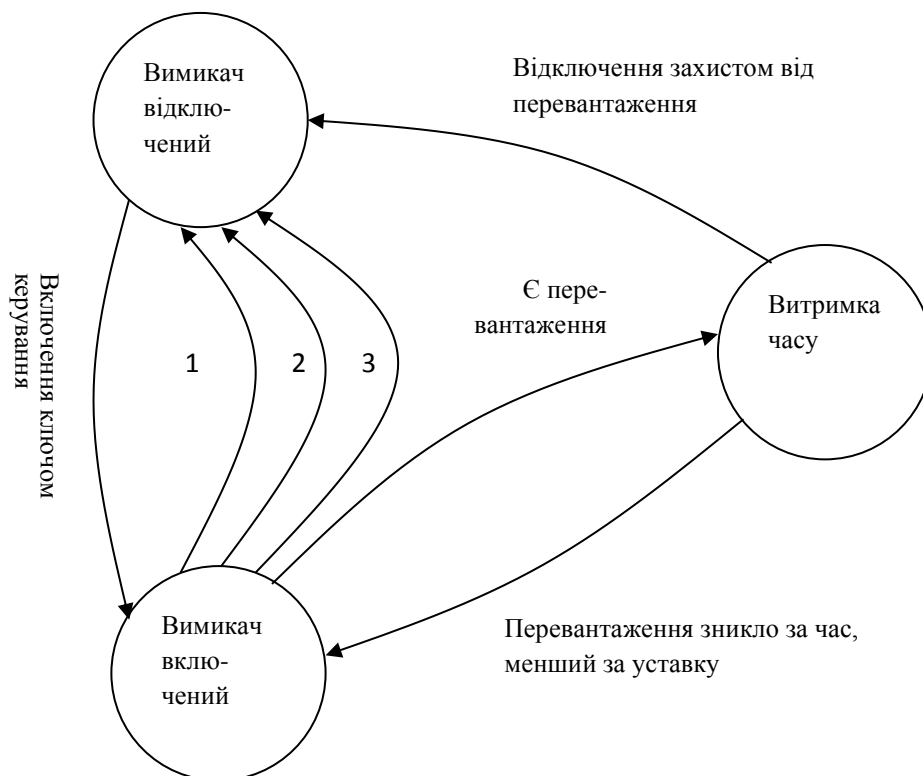


Рисунок 3 - Діаграма переходів станів шафи КРУ

Позначення на рисунку 3:

- 1 – відключення вимикача захистом миттєвої дії;
- 2 – відключення вимикача ключом керування;
- 3 – відключення вимикача у випадку відсутності оперативного струму.

На прикладі шафи КРУ типу К-ХІІ з вимикачем ВМП-10К (приєднання СД-300 кВт з трансформаторами струму в фазах А та С, уставками захистів (СВ – 450 А; МСЗ – 60А 4”); 333 5 А на вимкнення; ЗМН – 60 В 4”) можна зробити цей опис.

ЯКЩО струм в фазах А та С не перевищує 450А ТА струм протікає до 4 секунд менше 60А ТА струм замикання на землю менше уставки реле 333 (до 5А) ТА три лінійні напруги між фазами А і В, А і С та В і С одночасно повинні бути менше 60В на протязі до 4 секунд, ТО вимикач не вимикається при роботі приєднання.

ЯКЩО струм в фазах А та С перевищує 450А ТА струм на протязі не менше 4 секунд більше 60А ТА струм замикання на землю більше уставки реле 333 (понад 5А) ТА три лінійні напруги між фазами А і В, А і С та В і С одночасно повинні бути більше 60В на протязі часу більше 4 секунд, ТО вимикач вимикається при роботі приєднання.

ЯКЩО у висувного елемента (викатної частини) увімкнений вимикач, ТО вкотити у робоче положення його НЕ МОЖНА.

ЯКЩО у висувного елемента увімкнений вимикач, ТО викотити із зафіксованого контрольного або робочого положення його НЕ МОЖНА.

ЯКЩО висувний елемент знаходиться в проміжному (між робочим та контрольним) положенні, ТО увімкнути вимикач НЕ МОЖНА.

ЯКЩО висувний елемент викочений ТА включений заземлювальний роз'єднувач (заземлюючі ножі), ТО вкотити висувний елемент у робоче положення шафи НЕ МОЖНА.

Найважливішими параметрами систем електропостачання є кількість фаз m , частота електричної мережі f , напруга U , струм I , зсув фаз φ .

Для функції виходу кінцевого автомату можна звести усі необхідні дані в таблицю 3.

Таблиця 3. Чисельні значення для функції виходу щодо шафи КРУ

Безліч усіх підмножин електроенергетичних величин					Підклас функціональних елементів ФЕ (s)	Коротке позначення
m	f	U	I	φ		
1	1	1	1	1	Кількість фаз, частота, напруга, струм, зсув фаз	$F_{UI\theta}$

Перехідна функція $r_i = Q \times X \rightarrow Q$ характеризується парою $(q_i, q_j) \in Q \times X$, визначається вхідною величиною $x_i \in X$. Добуток множин $Q \times X$ містить опис процесу у вигляді послідовності станів. Елементарна перехідна функція характеризується двома станами та умовами, за яких здійснюється перехід з одного стану в інший.

Таблиця 4. Визначення перехідних функцій при представленні шафи КРУ як кінцевого автомату

q_i	x	y	q_j
Вимкнено	Увімкнення	Увімкнено	Увімкнено
Увімкнено	Увімкнення	Увімкнено	Увімкнено
Увімкнено	Вимкнення	Вимкнено	Вимкнено
Вимкнено	Вимкнення	Вимкнено	Вимкнено

Відносно шафи КРУ цю таблицю можна пояснити наступним чином.

Якщо вимикач вимкнений, то команда на увімкнення, подана шляхом перемикачання ключа керування, його вмикає і вимикач переходить у стан «Увімкнено».

Якщо вимикач включений, то команда на вмикачання його так і залишає у стані «Увімкнено».

Якщо вимикач включений, то команда на вимикання його переводить його у стан «Вимкнено».

Якщо вимикач вимкнений, то команда на вимкнення його, подана шляхом перемикачання ключа керування, так і залишає його у стані «Вимкнено».

Представлення моделі шафи КРУ у вигляді детермінованого кінцевого автомату дозволить запроєктувати шафу з необхідними рисами.

Якщо використати принцип узагальнення, то, ґрунтуючись на будові комутаційних апаратів напругою до 1000 В (автоматичні вимикачі, контактори, пускачі, запобіжники, реле тощо) та вище 1000 В (високовольтні вимикачі усіх типів, запобіжники, вакуумні контактори і т.п.) та використовуючи морфологічні фрази такі, як ЯКЩО, ТА, АБО, ТО, НЕ МОЖНА тощо, можливо представити будь-який комутаційний апарат у вигляді кінцевого автомату

Висновки

1. Вперше розроблена модель шафи КРУ у вигляді абстрактного детермінованого кінцевого автомату.

2. Представлено схему роботи шафи комплектної розподільної установки у вигляді діаграми переходів стану, що дає можливість стисло, з мінімальним об'ємом інформації звести воедино усі можливі режими роботи шаф КРУ та використовувати ці діаграми для навчання та підвищення кваліфікації електротехнічного персоналу.

3. Приведений повний опис роботи шаф КРУ за допомогою морфологічних фраз (ЯКЩО, ТА, АБО, ТО, НЕ МОЖНА).

4. Зроблений висновок, що будь-який комутаційний апарат можна представити у вигляді кінцевого автомату, що дасть можливість запроєктувати комутаційний апарат з необхідними рисами.

Список використаної літератури

1. John E. Hopcroft, Rajeev Motwani, Jeffrey D. Ullman. Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation. – Pearson Education, 2001. – P. 535.
2. Дичка, І. А. Основи прикладної теорії цифрових автоматів [Електронний ресурс] : підручник / І. А. Дичка, В. П. Тарасенко, М. В. Онаї ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 23,22 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 506 с. – Назва з екрана.
3. Волошко А. В. Використання теорії кінцевих автоматів для нагляду за роботою компресорної установки / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак, В. В. Мороз // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2023. - № 1. – С. 97 – 103. DOI 10.20535/1813-5420.1.2023.276064.
4. Інтелектуальні пристрої релейного захисту та автоматики: навч. посібник / Махлін П.В., Костенко С.Ю., Кузьменко О.П. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 256 с.

A. Voloshko¹, Dr. Sc. (Eng), ORSID 0000-0002-6867-2060

Ya. Bederak², Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-2669-0965

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

²Private joint stock company “AZOT” Cherkasy city

**USE OF THE THEORY OF FINITE AUTOMATA FOR SUPERVISION
OF THE OPERATION OF THE COMPRESSOR UNIT**

The purpose of the publication is to develop a methodology for presenting switchgear cabinets with a voltage of 6 (10) kV in the form of a state machine. The complete distribution device is one of the most responsible electrical devices of medium voltage. Their reliable operation ensures uninterrupted power supply to industry, administrative and household premises, and agriculture. It has been proven that the principle of operation of switchgear cabinets is similar to a deterministic finite state machine. The theory of finite automata and graphs is applied for the analysis of the operation of the cabinet of a complete switchgear. It is shown that the theory of finite state machines allows combining all possible modes of operation of switchgear cabinets. Representation of the switchgear cabinet model in the form of a deterministic finite state machine allows designing a cabinet with the necessary features. A 6 (10) kV switch cabinet state transition diagram has been developed. Such a diagram can be useful for understanding the operation of the cabinet of a complete switchgear, improving the qualifications of electrical personnel.

A complete description of the operation of the cabinet using morphological phrases is given on the example of the K-XII type switchgear cabinet with the VMP-10K circuit breaker (SD-300 kW connection). It was concluded that any switching device with a voltage up to and above 1000 V can be represented as a finite state machine. In addition to the diagram of state transitions, the operation of switching devices should be explained using morphological phrases (IF, AND, OR, THEN, NOT POSSIBLE).

Keywords: state machine, complete switchgear, transition diagram.

References

1. John E. Hopcroft, Rajeev Motwani, Jeffrey D. Ullman. Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation. – Pearson Education, 2001. – P. 535.
2. Dychka, I. A. Fundamentals of the applied theory of digital automata [Electronic resource] : textbook / I. A. Dychka, V. P. Tarasenko, M. V. Onai ; KPI named after Igor Sikorsky. – Electronic text data (1 file: 23.22 MB). – Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 2019. – 506 p. – Title from the screen.
3. A. V. Voloshko Using the theory of finite state machines to monitor the operation of a compressor unit / A. V. Voloshko, Y. S. Bederak, V. V. Moroz // Energy: economics, technologies, ecology. – 2023. - No. 1. - P. 97 – 103. DOI 10.20535/1813-5420.1.2023.276064.
4. Intelligent devices of relay protection and automation: teaching. manual / Makhlin P.V., Kostenko S.Yu., Kuzmenko O.P. – Zaporizhzhia: Zaporizhzhya Polytechnic University, 2020. – 256 p.

Надійшла: 30.11.2023

Received: 30.11.2023