

Бедерак Ярослав Семенович, канд. техн. наук, начальник лабораторії цеху електропостачання Приватного акціонерного товариства «АЗОТ», 096 036 66 82, yaroslav0768@gmail.com;

Вул. Героїв Холодного Яру, 72, ПрАТ «АЗОТ», м. Черкаси, Україна, 18028.

Тарадай Віктор Іванович, канд. техн. наук, м. Київ, Україна.

Кисельова Ганна Олексіївна, старший викладач, 068 391 21 95, annakys.777@gmail.com;

Кисельов Владлен Борисович, старший викладач, 068 106 26 30, vladkis.777@gmail.com,

Черкаський державний технологічний університет, б-р. Шевченка, 460, м. Черкаси, Україна, 18000.

ЗАСТОСУВАННЯ ДЕЯКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ПРИКЛАДОМ УРАХУВАННЯ ЇХ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ У ПРАКТИЧНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ

***Анотація.** Представлені найбільш поширені та перспективні моделі і схеми заміни системи електропостачання промислових підприємств, і приклад їх використання на практиці для електропостачання очисних споруд хімічного підприємства. Розглядаються різні типи моделей (в табличній формі, у вигляді електричної схеми заміщення або у вигляді кінцевого автомата), а також логіко-імовірнісний підхід до подання системи електропостачання. Використання систем автоматизації в системах електропостачання промислових підприємств дозволяє знизити загальну кількість аварій, запобігти їх розвитку, скоротити час відключень електроустановок і простоїв механізмів, а також дозволяє перевести на роботу без постійного технічного обслуговування значну кількість електроустановок підстанцій, що, в свою чергу, призводить до скорочення чисельності обслуговуючого персоналу, підвищення продуктивності праці і зниження витрат на технічне обслуговування. Одним з основних завдань на шляху автоматизації системи електропостачання підприємств є її представлення у вигляді моделі. Перелік моделей і схем заміщення, які можуть бути використані для представлення системи електропостачання підприємств, досить великий, і вибір відповідної моделі, яка найкращим чином відповідає вимогам кінцевої мети, є досить складним науковим завданням. Метою даної статті є аналіз найбільш поширених і перспективних моделей і схем заміни системи електропостачання та надання рекомендацій щодо їх застосування на практиці для електропостачання очисних споруд хімічного підприємства. Представлення системи електропостачання у вигляді таблиці дозволяє спростити і візуально виконати сертифікацію електрообладнання, виявити проблемні і слабкі місця в системі електропостачання промислових підприємств. Така таблиця доводить, що велика кількість електрообладнання на нижчих рівнях залежить від одного електричного апарата на більш вищих рівнях. Представлення системи електроживлення у вигляді трифазної симетричної схеми заміщення може бути використано для розрахунку струмів короткого замикання в симетричному і несиметричному режимах в програмі MatLab і аналогічних. Використання моделі системи електропостачання у вигляді кінцевого автомата дозволяє візуально перевірити надійність електропостачання споживачів, спростити проектування системи електропостачання промислового підприємства, вибрати стан комутаційних пристроїв в системі електропостачання і врахувати переваги і недоліки кожного стану. Розглянуті в даній статті методи доцільно використовувати для представлення системи електропостачання (в табличній формі, у вигляді кінцевого автомата або трифазної симетричної схеми заміщення) і їх подальшого застосування і використання в автоматизованих системах електропостачання промислових підприємств. Логіко-імовірнісний метод дозволяє розглянути питання надійності електропостачання на основі теорії алгебри логіки.*

Ключові слова: система електропостачання, схема заміщення, кінцевий автомат.

Bederak Yaroslav Semyonovich, Ph. D., head of the laboratory of the power Supply of the Private Joint-Stock Company "AZOT", 096 036 66 82, yaroslav0768@gmail.com;

Str. Heroes of Kholodny Yar, 72, P.J-S Company «AZOT», Cherkassy, Ukraine, 18028.

Taradai Viktor Ivanovich, Ph. D., Kiev, Ukraine.

Kyselova Hanna Alekseevna, senior lecturer, 068 391 21 95, annakys.777@gmail.com;

Kyselov Vladlen Borisovich, senior lecturer, 068 106 26 30, vladkis.777@gmail.com,

Cherkassy State Technological University, Shevchenko Boulevard, 460, Cherkassy, Ukraine, 18000.

APPLICATION OF SOME MODELS OF POWER SUPPLY SYSTEMS WITH AN EXAMPLE OF TAKING INTO ACCOUNT THEIR RELIABILITY FOR INDUSTRIAL ENTERPRISES IN PRACTICE

***Abstract.** The publication presents the most common and promising models and schemes for replacing the power supply system of industrial enterprises, and an example of their use in practice for power supply to sewage treatment plants of a chemical enterprise. Various types of models are considered (in tabular form, in the form of an*

electrical replacement circuit or in the form of a finite-state machine), as well as a logical-probabilistic approach to the representation of the power supply system. The use of automation systems in power supply systems of industrial enterprises can reduce the total number of accidents, prevent their development, reduce the time of disconnections of electrical installations and downtime of mechanisms, and also allows to transfer to work without constant maintenance a significant number of electrical installations of substations, which, in turn, leads to a reduction in the number of service personnel, increase labor productivity and reduce maintenance costs. One of the main tasks on the way to automating the power supply system of enterprises is to present it in the form of a model. The list of replacement models and schemes that can be used to represent the power supply system of enterprises is quite large, and choosing the appropriate model, for that best meets the requirements of the final goal is quite a complex scientific task. The purpose of this article is to analyze the most common and promising models and schemes for replacing the power supply system and provide recommendations on their application in practice for power supply to sewage treatment plants of a chemical enterprise. Presenting the power supply system in the form of a table allows you to simplify and visually perform certification of electrical equipment, identify problem and weak points in the power supply system of industrial enterprises. Such a table proves that a large amount of electrical equipment at lower levels depends on a single electrical device at higher levels. The representation of the power supply system in the form of a three-phase symmetric replacement circuit can be used to calculate short-circuit currents in symmetric and unbalanced modes in the MatLab program and similar. Using the model of the power supply system in the form of a finite-state machine allows you to visually check the reliability of power supply to consumers, simplify the design of the power supply system of an industrial enterprise, select the state of switching devices in the power supply system and take into account the advantages and disadvantages of each state. It is advisable to use the methods discussed in this article to represent the power supply system (in tabular form, in the form of a finite-state machine or a three-phase symmetric replacement scheme) and their further application and use in automated power supply systems of industrial enterprises. The logical-probabilistic method allows us to consider the issue of power supply reliability based on the theory of logical algebra.

Keywords: power supply system, replacement scheme, end machine.

Бедерак Ярослав Семенович, канд. техн. наук, начальник лаборатории цеха электроснабжения Частного акционерного общества «АЗОТ», 096 036 66 82, yaroslav0768@gmail.com;

Ул. Героев Холодного Яра, 72, ПрАТ «АЗОТ», г. Черкассы, Украина, 18028.

Тарадай Виктор Иванович, канд. техн. наук, г. Киев, Украина.

Киселева Анна Алексеевна, старший преподаватель, 068 391 21 95, annakys.777@gmail.com;

Киселев Владлен Борисович, старший преподаватель, 068 106 26 30, vladkis.777@gmail.com,

Черкасский государственный технологический университет, б-р. Шевченко, 460, г. Черкассы, Украина, 18000.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕРОМ УЧЕТА ИХ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ПРАКТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Аннотация. В публикации представлены наиболее распространенные и перспективные модели и схемы замещения системы электроснабжения промышленных предприятий, и пример их использования на практике для электроснабжения очистных сооружений химического предприятия. Рассматриваются различные типы моделей (в табличной форме, в виде электрической схемы замещения или в виде конечного автомата), а также логико-вероятностный подход к представлению системы электроснабжения. Применение систем автоматизации в системах электроснабжения промышленных предприятий позволяет снизить общее количество аварий, предотвратить их развитие, сократить время отключений электроустановок и простоев механизмов, а также позволяет перевести на работу без постоянного технического обслуживания значительное количество электроустановок подстанций, что, в свою очередь, приводит к сокращению численности обслуживающего персонала, повышению производительности труда и снижению затрат на техническое обслуживание. Одной из главных задач на пути автоматизации системы электроснабжения предприятий является представление ее в виде модели. Перечень моделей и схем замещения, которые могут быть использованы для представления системы электроснабжения предприятий, довольно велик, и выбор подходящей модели, которая наилучшим образом отвечает требованиям конечной цели, является довольно сложной научной задачей. Целью данной статьи является анализ наиболее распространенных и перспективных моделей и схем замещения системы электроснабжения и предоставление рекомендаций по их применению на практике для электроснабжения очистных сооружений химического предприятия. Представление системы электроснабжения в виде таблицы позволяет упростить и визуально выполнить сертификацию электрооборудования, выявить проблемные и слабые места в системе электроснабжения промышленных предприятий. Такая таблица показывает, что большое количество электрооборудования на более низких уровнях зависит от одного электрического устройства на более высоких уровнях. Представление системы электропитания в виде

трехфазной симметричной схемы замещения может быть использовано для расчета токов короткого замыкания в симметричном и несимметричном режимах в программе MatLab и аналогичных. Использование модели системы электроснабжения в виде конечного автомата позволяет визуально проверить надежность электроснабжения потребителей, упростить проектирование системы электроснабжения промышленного предприятия, выбрать состояние коммутационных устройств в системе электроснабжения и учесть преимущества и недостатки каждого состояния. Рассмотренные в данной статье методы целесообразно использовать для представления системы электроснабжения (в табличной форме, в виде конечного автомата или трехфазной симметричной схемы замещения) и их дальнейшего применения и использования в автоматизированных системах электроснабжения промышленных предприятий. Логико-вероятностный метод позволяет рассмотреть вопрос надежности электроснабжения на основе теории алгебры логики.

Ключевые слова: система электроснабжения, схема замещения, конечный автомат.

Вступ. Системою електропостачання називається сукупність електроустановок, призначених для забезпечення споживачів електричною енергією. Вона здійснює єдиний процес виробництва, передачі, розподілу та споживання електричної енергії.

Системи електропостачання – це складний виробничий комплекс, всі елементи якого беруть участь в єдиному виробничому процесі, основними специфічними особливостями якого є:

- швидкоплинність явищ – має місце одночасність генерування електроенергії та її споживання;
- неминучість пошкоджень аварійного характеру – коротких замикань (КЗ) або інших пошкоджень в електричних установках;
- зміна режиму електроспоживання, що призводять до дефіциту або надлишку активної і реактивної потужності, і як наслідок – до зміни таких параметрів як напруга, частота, навантаження на елементи системи електропостачання [1, 2].

Системи електропостачання (СЕР) промислових підприємств мають три особливості, притаманні тільки даним системам. Перша – це жорсткий зв'язок процесу виробництва, передачі та споживання електроенергії. Виникнення відмови на будь-якому етапі виробництва (перетворення, передачі) електроенергії миттєво позначається на функціонуванні споживача. Друга – швидкість протікання процесів в системах електропостачання виключає можливість включення в контур управління людини-оператора. Третя особливість – топологічна складність побудови систем електропостачання для енергоємних об'єктів, обумовлюється необхідністю забезпечення багаторівневого резервування. СЕР можна уявити як складну систему, що складається з безлічі елементів – одиниць електрообладнання, які характеризуються набором експлуатаційних параметрів, які можуть змінюватися. Причинами розкиду параметрів є процес старіння, який має, як правило, монотонний характер і зазвичай зростає з плином часу, та повторення впливів, що призводять до скорочення терміну служби електрообладнання.

Згідно [3] СЕР називають також електропостачальною системою (ЕПС). За п. 4.1 ДСТУ 3465-96 [3] ЕПС – це сукупність електричних установок, призначених для виробництва, передавання, перетворення та розподілу електричної енергії.

Раціонально виконана сучасна СЕР ПП повинна задовольняти ряду вимог: економічності й надійності, безпеки та зручності експлуатації, забезпечення надійної якості електроенергії, рівнів напруги [1]. В останні роки СЕР промислових підприємств (ПП) представляють у вигляді різноманітних моделей та схем заміщення. Різні завдання аналізу процесів у СЕР примушують використовувати різні моделі, що відрізняються за ступенями складності структури та проміжками часу аналізу.

Перелік цих моделей та схем заміщення доволі великий. Але в даній публікації будуть розглянуті найбільш поширені та перспективні на прикладі системи електропостачання очисних споруд хімічного підприємства.

Фрагмент однолінійної схеми системи електропостачання очисних споруд наведений на рис. 1.

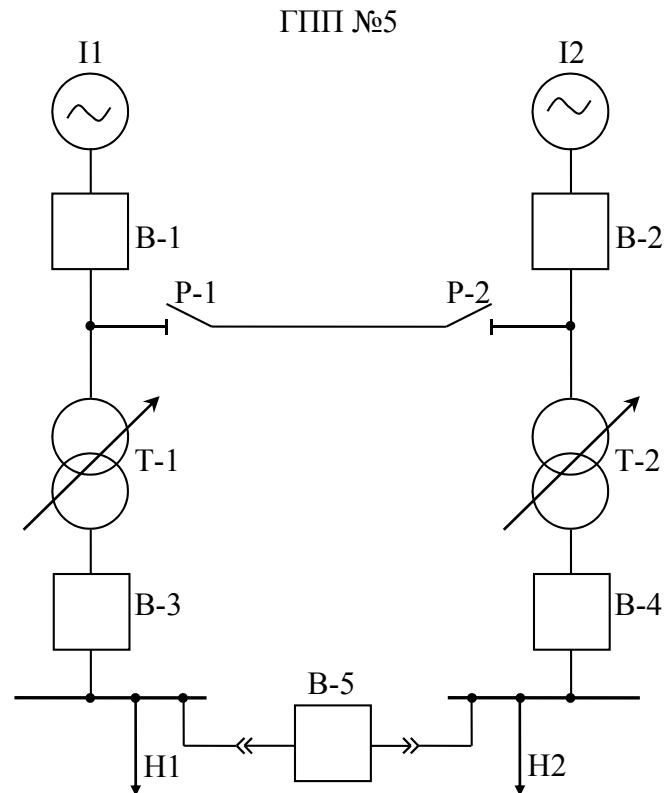


Рис. 1. Фрагмент однолінійної схеми системи електропостачання з трансформаторами 110/6 кВ

СЕП здебільшого мають ієрархічну структуру. В основу розробки ієрархічної структури СЕП покладено принцип агрегування функцій окремих елементів в функціональні блоки (ФБ) і функціональні комплекти (ФК) [1].

Ієрархія функцій СЕП така, що принципова схема для різних її рівнів виявляється описаною повторюваними ланцюжками функціональних елементів. Параметри всіх елементів ФБ виявляються залежними від характерних станів потоку енергії в блоці. Крім того, типовими є схемні рішення, відповідні об'єднання окремих ФБ в ФК.

В останній час в промисловості намагаються впроваджувати автоматизовані системи керування електропостачанням (АСКЕПС) промислових підприємств. Впровадження автоматизації дозволяє досягти певного економічного ефекту. Основним показником ефективності АСКЕПС в поєднанні з автоматизацією підстанцій є підвищення надійності та безперебійності електропостачання промислових підприємств, що сприяє підвищенню ритмічності роботи підприємств, скороченню кількості браку продукції, підвищенню її якості.

Наявність в АСКЕПС системи діагностування несправностей дозволяє прискорити визначення причини виниклої несправності, її усунення та скоротити час перерви електропостачання.

Основними економічними показниками ефективності АСКЕПС є зниження споживання електроенергії за рахунок автоматизованого щогодинного та щодобового обліку електроенергії по кожному приєднанню комерційного та технічного обліку, оптимальний розподіл реактивної потужності, зниження вартості не обслуговуваних підстанцій завдяки централізованому оперативному управлінню, скорочення зупинок устаткування внаслідок перерв електропостачання за рахунок наявності централізованого оперативного керування (телесигналізації).

Застосування систем автоматизації в СЕП дозволяє:

1. Запобігти розвитку багатьох аварій, скоротити їх загальну кількість, а також зменшити час відключень електроустановок і простою механізмів;
2. Скоротити кількість обслуговуючого персоналу і перевести на роботу без постійного обслуговування значне число електроустановок підстанцій;
3. Підвищити продуктивність праці.

Мета роботи. Розглянути найбільш поширені та перспективні на прикладі системи електропостачання очисних споруд хімічного підприємства.

Основна частина досліджень. Електроприймачі можуть бути підключені практично до будь-якого рівня СЕП, наприклад 2а, 2б, 3, 4, 5 і 6 (рис. 2). У СЕП можуть існувати власні джерела електроенергії.

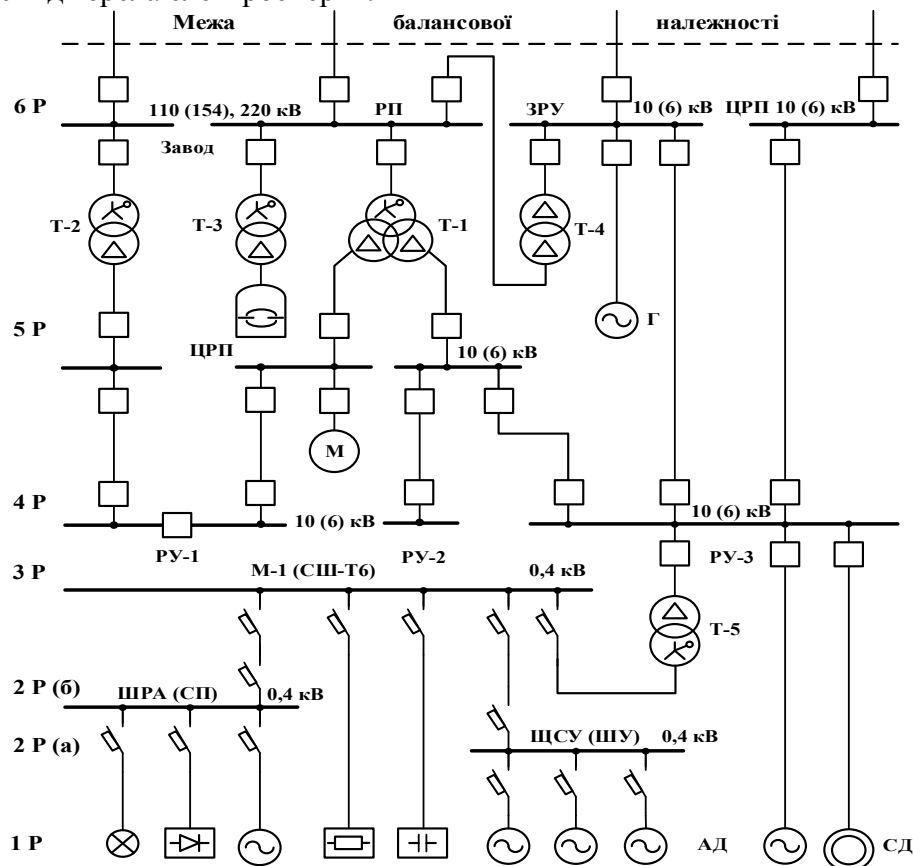


Рис. 2. Рівні системи електропостачання

Кожен рівень може існувати в декількох виконаннях:

- 2Р (б) – у вигляді щита станцій управління (ЩСУ) або шафи управління (ШУ);
- 2Р (б) – розподільний шинопровід алюмінієвий (ШРА) або силовий пункт (СП);
- 3Р – у вигляді шинопровода (магістраль М-1) або секції шин (СШ) трансформаторної підстанції з трансформатором Т-6;
- 4Р – у вигляді розподільних установок (РУ) напругою 10 (6) кВ;
- 5Р – у вигляді центральних розподільних пунктів (ЦРП) напругою 10 (6) кВ;
- 6Р – у вигляді відкритих (ВРУ) або закритих розподільних установок (ЗРУ) загальнозаводських головних понижувальних підстанцій (ГПП), або підстанцій глибокого вводу (ПГВ), або ж у вигляді ЦРП при живленні підприємства на генераторній напрузі 10 (6) кВ.

Чим вище рівень, на якому електроприймачі (наприклад, асинхронні електродвигуни (АД)) підключені до СЕП, тим більшу активну і реактивну (за винятком синхронних двигунів (СД)) потужність вони споживають з мережі.

Представлення СЕП у вигляді багаторівневої таблиці. Системи електропостачання відображаються у вигляді схем. Коли необхідно оцінювати ефективність функціонування систем, встановлювати їх безвідмовність, а це пов'язано з розподілом систем на рівні, то більш прийнятним є використання таблиці [4].

Параметри, представлені в таблиці, дозволяють описувати функціонування як окремої одиниці обладнання, так і системи в цілому.

Як приклад, запису інформації про елементи СЕП в багаторівневу таблицю, розглядається система електропостачання очисних споруд хімічного підприємства. СЕП забезпечує живлення 240 електричних двигунів робочих машин. До них відносяться: п'ять нагнітачів та чотири насоси, двигуни яких працюють на напрузі 6 кВ, по декілька десятків вентиляторів, засувок, насосів, мотор-редукторів, двигуни їх розраховані на напругу 0,4 кВ.

Для спрощення аналізу функціонування схеми електропостачання доцільно розділити її на рівні. Кількість рівнів є умовною. Це залежить від складності схеми і питань, які аналізуються. У нашому випадку схема розділена на шість рівнів (табл. 1).

Таблиця 1.
Технологічне та електричне обладнання

Найменування технологічного обладнання	Найменування рівня електропостачання					
	1	2	3	4	5	6
Насос К 65-50-160	АД АИР100L2	Пускач; Автоматичний вимикач; кабельна лінія 0,4 кВ; апарати в схемі керування	Трансформатор ТМ-100/6/0,4; рубильник РС-36; секція шин 0,4 кВ	Вимикач ВМПЕ-10-20/630; кабельна лінія 6 кВ L=500 м від ГПП до РУ; секція шин 6 кВ РУ-6 кВ; апаратура керування в релейному відсіці РУ	Секція шин 6 кВ ГПП; вимикач ВМПЕ-10-20/630; апаратура керування в релейному відсіці комірки ГПП (ввода на РУ)	2 вимикачі ЛТВ-145D1В; 2 трансформатори ТДН-10000/110; 2 роз'єднувачі РНДЗ-2-110/1000; вентильні розрядники
Насос К 65-50-160	АД АИР100L2	Пускач; Автоматичний вимикач; кабельна лінія 0,4 кВ; апарати в схемі керування				
Насос К 65-50-160	АД АИР100L2	Пускач; Автоматичний вимикач; кабельна лінія 0,4 кВ; апарати в схемі керування				

Таке представлення СЕП у вигляді таблиці дозволяє спростити і наочно виконати паспортизацію електрообладнання, побачити проблемні і слабкі місця в СЕП ПП. Така таблиця доводить, що велика кількість електрообладнання на рівні 1 або на рівні 2 залежить від одного електричного апарату на вищих рівнях.

Електрична схема заміщення фрагменту СЕП. Електропостачання змінним струмом частотою 50 Гц здійснюється зазвичай від трифазної промислової мережі 110 кВ через понижуючий трифазний трансформатор, що встановлюється на підстанції. Три первинних обмотки трансформатора, з'єднані в зірку з нульовим виводом, підключені до мережі 110 кВ, а три вторинних обмотки з'єднані в трикутник. На підстанції №5 встановлено трифазний понижуючий трансформатор, первинні обмотки якого підключені до мережі 110 кВ, а вторинні обмотки трансформатора – до навантаження. Схема заміщення фрагменту системи електропостачання приведена на рис. 3.

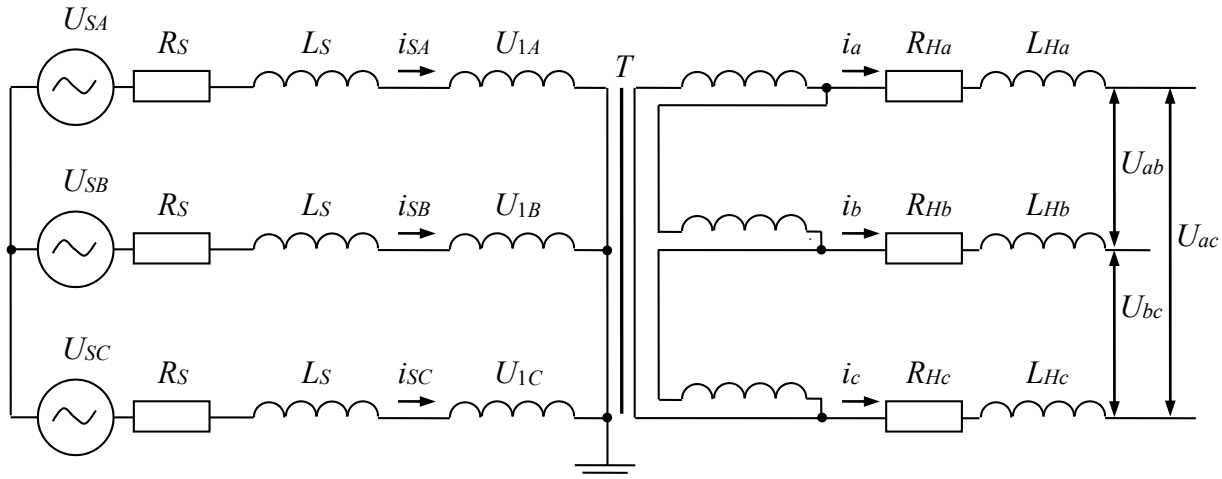


Рис. 3. Еквівалентна схема заміщення фрагменту схеми електропостачання очисних споруд

Мережа 110 кВ представлена трифазною симетричною системою синусоїдальних напруг (рис. 3). Параметри мережі враховані в кожній фазі активним опором R_s і індуктивністю L_s . Три первинних обмотки трансформатора з'єднані в зірку, а три вторинних – в трикутник. Еквівалентне навантаження, представлене активними опорами R_{HA} , R_{HB} , R_{HC} та індуктивними опорами L_{HA} , L_{HB} , L_{HC} , підключеними до фаз A , B , C . U_{SA} , U_{SB} , U_{SC} – діюче значення напруги фаз джерела живлення; U_{1A} , U_{1B} , U_{1C} – діюче значення напруги на фазах первинної обмотки трансформатора; U_{ab} , U_{bc} , U_{ac} – діюче значення лінійних напруг на вторинній обмотці трансформатора, i_a , i_b , i_c – діюче значення фазних струмів на вторинній обмотці трансформатора.

Така схема заміщення може використовуватися для проведення розрахунків струмів короткого замикання в симетричних та несиметричних режимах в програмі MatLab та аналогічних.

СЕП – кінцевий автомат. В роботі [5] доведено, що модель СЕП можна представити у вигляді кінцевого автомата

$$M_c = (X, Y, Q, r, s), \quad (1)$$

де X – множина вхідних величин; Y – множина вихідних величин; Q – множина станів; r – перехідна функція; s – вихідна функція.

Кінцевий автомат (КА) в теорії алгоритмів – модель дискретного пристрою, що має один вхід, один вихід і в кожен момент часу знаходиться в одному стані з безлічі можливих [6], [7].

Для аналізу будь-якої схеми довільного ФК, що описує СЕП, в довільний момент часу необхідно знати стан джерел живлення (справний – несправний), комутаційних апаратів (включений – відключений) і елементів, що визначають функції транспортування, розподілу і перетворення параметрів потоку електроенергії. Отже, потрібно мати дві підмоделі по типу (1), одна з яких служить для опису структури схеми в

даний момент часу (енергетична підмодель), а друга – описує структуру процесу, що відбувається в схемі, і є інформаційною підмоделлю.

Енергетична підмодель має вигляд

$$M_e = (X_e, Y_e, Q_e, r_e, s_e).$$

Інформаційна підмодель описується аналогічно:

$$M_i = (X_i, Y_i, Q_i, r_i, s_i).$$

Послідовність побудови моделі ФК розглядається на прикладі роботи схеми розподільного пристрою (рис. 1), де позначені: I_1, I_2 – джерела живлення і їх стани; M_1, M_2 – функціональні модулі і їх стани; P_1, P_2 – секції розподільного пристрою; Π_1, Π_2 – приєднання споживачів (першого і другого) і їх стани. Зробити будь-які висновки щодо режиму живлення споживачів (Π_1, Π_2) можна тільки при наявності інформації про стан функціональних модулів ($I_1, I_2, M_1, M_2, P_1, P_2, \Pi_1, \Pi_2$) і комутаційних апаратів схеми (вимикачі $B_1 - B_7$), а також про величини, що характеризують параметри потоку енергії в цих елементах. В даному випадку мається на увазі проведення аналізу стану розподільного пристрою, утвореного функціональними модулями P_1 і P_2 . Це дає підставу перейти від схеми рис. 1 до еквівалентної схеми станів рис. 4.

Використовуючи поняття і функції алгебри логіки [5], [8] можна побудувати таблицю, що описує послідовність зміни структури модельованої електричної мережі (табл. 2).

Стан $q_0 sz_0$ – напруга відсутня на обох вводах; стан $q_1 sz_1$ – напруга подається тільки на перший ввід; стан $q_2 sz_2$ – напруга подається тільки на другий ввід; стан $q_3 sz_3$ – напруга подана на обидва вводи, секційний вимикач В-5 ввімкнено; стан $q_4 sz_4$ – напруга подана на перший ввід, але секційний вимикач В-5 ввімкнено і навантаження Π_1 та Π_2 живиться по вводам В-6 та В-7; стан $q_5 sz_5$ – напруга подана на другий ввід, але секційний вимикач В-5 ввімкнено і навантаження Π_1 та Π_2 живиться по вводам В-6 та В-7; стан $q_6 sz_6$ – напруга подана на перший ввід, роз'єднувачі Р-1 включено і навантаження Π_1 живиться шляхом В-1, В-3, В-6 та навантаження Π_2 живиться шляхом В-1, Р-1, В-4, В-7; стан $q_7 sz_7$ – напруга подана на другий ввід, роз'єднувачі Р-1 включено і навантаження Π_1 живиться шляхом В-2, Р-1, В-3, В-6 і навантаження Π_2 живиться шляхом В-2, В-4, В-7.

Базуючись на послідовності зміни структури мережі, можливо розробити таблицю переходів згідно [5] (табл. 3) для найбільш характерних станів.

Таблиця 2.
Послідовність зміни структури мережі

Множина станів			$F(s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8)$							
Стан	Опис		s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8
q_0	sz_0	Відключено	0	0	0	0	0	0	0	0
q_1	sz_1	$I_1 \& P_1$	1	1	1	0	0	0	0	0
q_2	sz_2	$I_2 \& P_2$	0	0	0	1	1	1	0	0
q_3	sz_3	$I_1 \& P_1 \vee I_2 \& P_2$	1	1	1	1	1	1	0	1
q_4	sz_4	$I_1 \& P_1 \vee P_2$	1	1	1	0	0	1	0	1
q_5	sz_5	$I_2 \& P_2 \vee P_1$	0	0	1	1	1	1	0	1
q_6	sz_6	$I_1 \& M_1 \vee M_2$	1	1	1	0	1	1	1	0
q_7	sz_7	$I_2 \& M_2 \vee M_1$	0	1	1	1	1	1	1	0

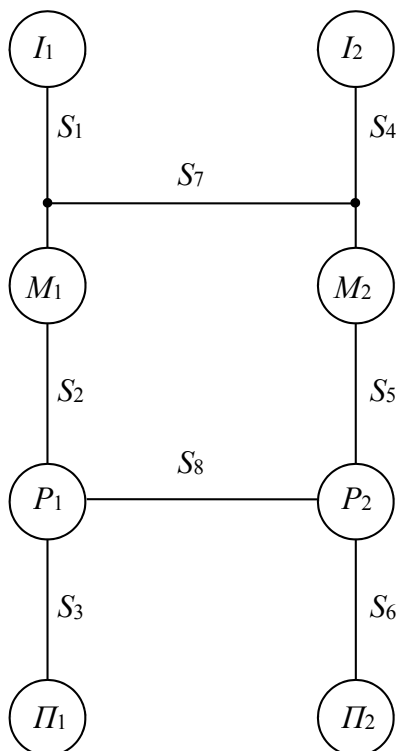


Рис. 4. Еквівалентна схема станів комутаційних апаратів, наведених на рис. 1.

Таблиця 3.

Стани автомата для наведеної послідовності зміни структури мережі

q_i	X	Y	q_j
q_0	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot s_7 \cdot s_8$	$\bar{s}_1 \cdot \bar{s}_2 \cdot \bar{s}_3 \cdot \bar{s}_4 \cdot \bar{s}_5 \cdot \bar{s}_6 \cdot \bar{s}_7 \cdot \bar{s}_8$	q_0
	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot s_7 \cdot s_8 \cdot I_1$	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot \bar{s}_4 \cdot \bar{s}_5 \cdot \bar{s}_6 \cdot \bar{s}_7 \cdot \bar{s}_8$	q_1
	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot s_7 \cdot s_8 \cdot I_2$	$\bar{s}_1 \cdot \bar{s}_2 \cdot \bar{s}_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot \bar{s}_7 \cdot \bar{s}_8$	q_2
q_1	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot s_7 \cdot s_8 \cdot I_1$	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot \bar{s}_4 \cdot \bar{s}_5 \cdot \bar{s}_6 \cdot \bar{s}_7 \cdot \bar{s}_8$	q_1
	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot s_7 \cdot s_8 \cdot I_1$	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot \bar{s}_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot \bar{s}_7 \cdot s_8$	q_4
	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot s_7 \cdot s_8 \cdot I_1 \cdot I_2$	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot \bar{s}_7 \cdot s_8$	q_3
q_2	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot s_7 \cdot s_8 \cdot I_2$	$\bar{s}_1 \cdot \bar{s}_2 \cdot \bar{s}_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot s_7 \cdot \bar{s}_8$	q_2
	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot s_7 \cdot s_8 \cdot I_1 \cdot I_2$	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot \bar{s}_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot \bar{s}_7 \cdot \bar{s}_8$	q_3
	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot s_7 \cdot s_8 \cdot I_1 \cdot I_2$	$\bar{s}_1 \cdot \bar{s}_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot \bar{s}_7 \cdot s_8$	q_5
	$s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot s_7 \cdot s_8 \cdot I_2$	$\bar{s}_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot \bar{s}_4 \cdot s_5 \cdot s_6 \cdot s_7 \cdot \bar{s}_8$	q_7

Застосування моделі СЕП у вигляді кінцевого автомата дозволяє наочно перевірити надійність живлення споживачів, спростити проектування системи електропостачання промислового підприємства, обрати стан комутаційних апаратів в СЕП та розглянути переваги та недоліки кожного стану.

Логіко-ймовірносний підхід до розрахунку надійності електропостачання кінцевого споживача. При розрахунку надійності СЕП застосовується логіко-ймовірносний метод. Під висловом X розуміється будь-який вираз, щодо якого можна стверджувати, помилковий він або істинний без урахування конкретного змісту. Змінна величина, яка встановлює лише два значення (1 і 0), називається двійковою. Функція, що визначається набором двійкових аргументів і приймає лише два значення (1 і 0), називається функцією алгебри логіки. Основи алгебри логіки наведені в роботах [10], [11].

Функцію алгебри логіки (ФАЛ), що зв'язує стан елементів зі станом системи, називають функцією працездатності системи (ФПС), яка і обумовлює умови її працездатності. Структури, умови працездатності яких вдається записати за допомогою монотонних ФПС, називаються монотонними. Для монотонних структур функцію працездатності можна записувати за допомогою так званих найкоротших шляхів успішного функціонування (НШУФ). НШУФ являє собою таку кон'юнкцію її елементів, ні одну з компонент якої не можна вилучити, не порушивши функціонування системи. Таку кон'юнкцію можна записати у вигляді такої ФАЛ:

$$P_l = \bigwedge_{i \in K_p} x_i,$$

де K_p означає безліч номерів, які відповідають цьому шляху.

Можна записати умови працездатності системи у вигляді диз'юнкції усіх наявних найкоротших шляхів успішного функціонування

$$y(x_1, \dots, x_n) = \bigvee_{l=1}^d P_l = \bigvee_{l=1}^d \left[\bigwedge_{i \in K_p} x_i \right].$$

Умови працездатності реальної системи (УПС) можна представити у вигляді умов працездатності деякої еквівалентної (в сенсі надійності) системи, структура якої являє паралельне з'єднання найкоротших шляхів успішного функціонування.

Уявимо, що для СЕП, схема якої наведена на рис. 1, необхідно оцінити надійність забезпечення живленням відповідальних споживачів, підключених до П1. Поставлене завдання можна виконати за допомогою різних комбінацій елементів системи. Справді, зазначені споживачі отримують надійне живлення, якщо будуть справні вимикачі В-1, В-2, В-3, В-4, В-5, В-6, В-7, роз'єднувачі Р-1, трансформатори Т-1 та Т-2.

Якщо цей громіздкий словесний опис перевести на мову алгебри логіки, то функція працездатності даної системи за допомогою НШУФ запишеться наступним чином:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_8) = \left. \begin{array}{l} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{array} \right| = \left. \begin{array}{l} s_1 \quad s_2 \quad s_3 \\ s_4 \quad s_7 \quad s_2 \quad s_3 \\ s_4 \quad s_5 \quad s_8 \quad s_3 \\ s_1 \quad s_7 \quad s_5 \quad s_8 \quad s_3 \end{array} \right|. \quad (2)$$

Умови працездатності (2) графічно можна представити у вигляді схеми (рис. 5), еквівалентної в сенсі логіки реальній системі, однолінійна схема якої приведена на рис. 1.

Тоді логічна функція працездатності буде мати вигляд:

$$Z = (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3) + (x_4 \cdot x_7 \cdot x_2 \cdot x_3) + (x_4 \cdot x_5 \cdot x_8 \cdot x_3) + (x_1 \cdot x_7 \cdot x_5 \cdot x_8 \cdot x_3).$$

Кожна складова – це один з можливих шляхів передачі потужності від джерела до споживача, що забезпечують працездатність СЕП. Причому це найкоротші шляхи успішного функціонування СЕП, коли не можна вилучити ні одну з компонент не порушивши функціонування СЕП.

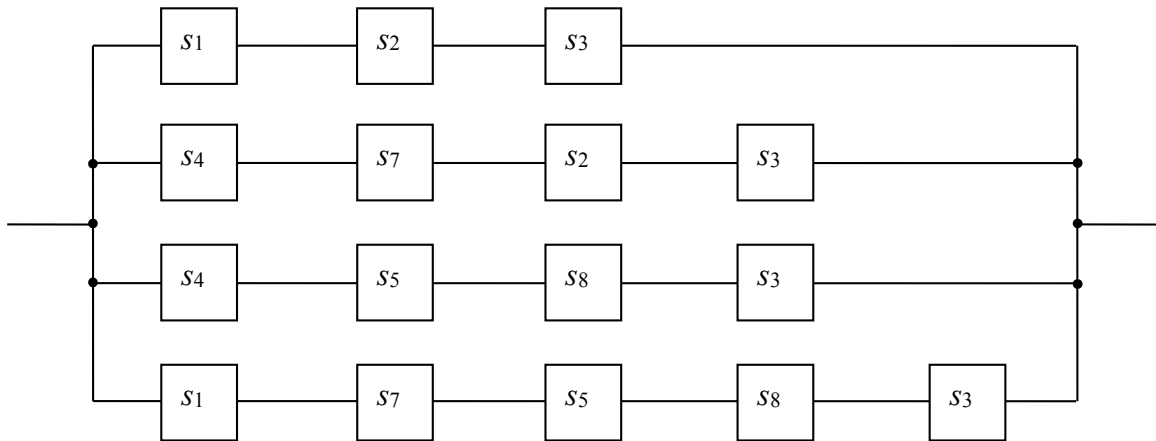


Рис. 5. Схеми працездатності реальної системи електропостачання

Якщо буде потрібно знайти ймовірність успішного функціонування СЕП, тоді, маючи вираз Z , необхідно знайти – ймовірність безвідмовного функціонування першого шляху передачі потужності від джерела споживача через ймовірності безвідмовної роботи елементів, які складають цей шлях. Для схеми заміщення за надійністю СЕП, представленій на малюнку 1, отримуємо наступні вирази:

$$\begin{aligned}
 P_I &= P_1 \cdot P_2 \cdot P_3; \\
 P_{II} &= P_4 \cdot P_7 \cdot P_2 \cdot P_3; \\
 P_{III} &= P_4 \cdot P_5 \cdot P_8 \cdot P_3; \\
 P_{IV} &= P_1 \cdot P_7 \cdot P_5 \cdot P_8 \cdot P_3.
 \end{aligned}$$

Тоді результуюча ймовірність успішного функціонування СЕП

$$P = 1 - (1 - P_I) (1 - P_{II}) (1 - P_{III}) (1 - P_{IV}).$$

Ймовірність неуспішного функціонування СЕП знаходиться як

$$Q = 1 - P = (1 - P_I) (1 - P_{II}) (1 - P_{III}) (1 - P_{IV}).$$

З рис. 6 видно, що поставлене перед системою завдання (живлення споживачів від П1) буде виконане, якщо збережеться хоча б один з чотирьох шляхів успішного функціонування.

В роботах І. О. Рябініна [10], [11] вирішена проблема розрахунку надійності електропостачання. Логіко-ймовірносний метод дозволяє розглянути питання надійності електропостачання, ґрунтуючись на теорії алгебри логіки. Цей метод дозволяє розрахувати надійність СЕП за даними про надійність елементів системи.

Висновки. Доцільно використовувати перераховані в роботі способи представлення СЕП (у табличному вигляді, як кінцевий автомат або електрична схема заміщення) для подальшого їх застосування та використання в автоматизованих системах електропостачання промислових підприємств.

Логіко-ймовірносний метод дозволяє провести розрахунки надійності системи електропостачання, ґрунтуючись на схемі працездатності реальної системи та надійності кожного елемента схеми електропостачання.

Список використаної літератури:

1. Ермилов, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
2. Овчаренко, Н. И. Автоматизация энергосистем. Учебник для вузов / под ред. А. Ф. Дьякова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476 с.
3. Системи електропостачальні загального призначення. Терміни та визначення: ДСТУ 3465-96. – [Чинний від 1998-01-01]. К.: Держстандарт України, 1997. – 19 с. – (Національний стандарт України).
4. Зацепин, Е. П. Представление систем электроснабжения многоуровневой таблицей // Известия ТулГУ. Технические науки, 2018. Вып. 12. – С. 161–165.
5. Винославский, В. Н., Тарадай, В. И., Бутц, У., Хайнце, Д. Автоматизация проектирования систем электроснабжения. – К.: Высшая школа, Главное изд-во, 1988. – 208 с.
6. Kai, Wang, Wanqing, Li. Application of Electrical Automation Technology in Power System // Journal of Power and Energy Engineering. 2019. – Vol.7, No.5. – P. 8-13.
7. Кобринский, Н. Е., Трахтенброт, Б. А. Введение в теорию конечных автоматов. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 405 с.
8. Sakarovitch, Jacques. Elements of automata theory. Translated from the French by Reuben Thomas. Cambridge: Cambridge University Press. 2009. – 782 P.
9. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2007. – 275 с.
10. Рябинин, И. А., Черкесов, Г. Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.

References:

1. Ermilov A. A. Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. M. Energoatomizdat, 1983. 208 p.
2. Ovcharenko N. I., Avtomatizatsiya energosistem. Uchebnik dlya vuzov, pod red. A. F. Diakova. – 2-e izd. pererab. i dop. M. Izdatelskiy dom MEI, 2007. 476 p.
3. 1997. Systemy elektropostachalni zahalnoho pryznachennia. Terminy ta vyznachennia: DSTU 3465-96. – [Chynnyi vid 1998-01-01]. K. Derzhstandart Ukrainy,. 19 p. (Natsionalnyi standart Ukrainy).
4. Zatsepin E. P., Predstavleniye sistem elektrosnabzheniya mnogourovnevoy tablitsy. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki, 2018, Vyp. 12, P. 161–165.
5. Vinoslavskiy V. N., Taraday V. I., Butts U., Khayntse D. Avtomatizatsiya proyektirovaniya sistem elektrosnabzheniya. K. Vysshaya shkola. Glavnoye izd-vo, 1988. 208 p.
6. Kai Wang, Wanqing Li. Application of Electrical Automation Technology in Power System. Journal of Power and Energy Engineering, 2019, Vol.7, No.5, P. 8-13.
7. Kobrinskiy N. E., Trakhtenbrot B. A. Vvedeniye v teoriyu konechnykh avtomatov. M. GIFML, 1962. 405 p.
8. Sakarovitch Jacques. Elements of automata theory. Translated from the French by Reuben Thomas. Cambridge. Cambridge University Press, 2009. 782 p.
9. Ryabinin I. A. Nadezhnost i bezopasnost strukturno-slozhnykh system. SPb. Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2007. 275 p.
10. Ryabinin I. A., Cherkesov G. N. Logiko-veroyatnostnyye metody issledovaniya nadezhnosti strukturno-slozhnykh sistem. M. Radio i svyaz, 1981. 264 p.

Надійшла до редакції 02.03.2021