

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 1

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Державного університету
«Житомирська політехніка»
протокол від 4 вересня 2025р.
№5

КОРОТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ з навчальної дисципліни «Надійність, діагностика та безпека енергетичних систем»

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
освітня програма «Комп'ютеризоване управління енергетичними системами»
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

Схвалено на засіданні кафедри
робототехніки, електроенергетики та
автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна
25 серпня 2025 р., протокол № 07
Завідувач кафедри
_____ Олексій ГРОМОВИЙ

Розробник: к.т.н., доцент, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та
автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Віталій КУЗНЕЦОВ

Житомир
2025

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»			
	Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 2

ЗМІСТ

Змістовий модуль 1. Принципи аналізу, забезпечення та керування надійністю електроенергетичних систем	3
Тема 1. Загальні принципи аналізу, забезпечення та керування надійністю електроенергетичних систем. Основні термінологічні поняття та показники надійності електроенергетичних систем	3
Тема 2. Елементи теорії ймовірностей та математичної статистики в задачах аналізу надійності	18
Тема 3. Аналіз, нормування та забезпечення надійності електроустановок	23
Тема 4. Визначення показників надійності об'єктів з паралельно-послідовним з'єднанням елементів	28
Змістовий модуль 2. Аналіз, забезпечення й оптимізація надійності	36
Тема 5. Аналіз, забезпечення й оптимізація надійності електричних мереж	36
Тема 6. Аналіз і забезпечення надійності електростанцій та підстанцій	51
Тема 7. Розрахунки показників надійності об'єктів електроенергетичних систем. Основні напрями аналізу надійності електроенергетичних систем та енергооб'єднань	61
Тема 8. Забезпечення надійності електроенергетичних систем та енергооб'єднань на стадії керування розвитком	72

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 3

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1

Принципи аналізу, забезпечення та керування надійністю електроенергетичних систем

ТЕМА 1. Загальні принципи аналізу, забезпечення та керування надійністю електроенергетичних систем. Основні термінологічні поняття та показники надійності електроенергетичних систем

Надійність - одна з основних вимог, які ставлять до електроенергетичних систем у процесі їх функціонування, і важлива науково-технічна проблема електроенергетики.

Електроенергетичні системи (ЕЕС) - складні за структурою та режимами технологічні комплекси. Вони займають великі території та концентрують у собі значні потужності. Об'єднана ЕЕС України складається з 8-ми регіональних ЕЕС і функціонує як одне ціле на всій території держави. Сумарна встановлена потужність електростанцій (ЕС) об'єднаної ЕЕС України становить понад 50 млн. кВт, а її системотвірна електрична мережа (ЕМ) сформована з ліній електропередавання (ЛЕП) напругою 330-750 кВ. Концентрація потужного устаткування на ЕС та підстанціях (ПС), наявність потужних ЛЕП призводить до того, що порушення функціонування сучасних ЕЕС супроводжується великими економічними збитками та негативними соціальними наслідками. Тому проблема надійності стоїть у ряді особливо важливих проблем експлуатації та розвитку ЕЕС.

Розв'язання проблеми надійності ЕЕС - надзвичайно складне завдання. Труднощі його вирішення зумовлені складністю устаткування, процесів та структури ЕЕС, необхідністю неперервного контролю та ефективного керування технологічними процесами, різноманітністю експлуатаційних режимів, можливістю виникання аварій, здатних розвиватися у складні форми, необхідністю підтримання відповідного рівня резервування, а також характерною для України та інших пострадянських держав застарілістю та зношеністю основних фондів.

Проблема надійності ЕЕС є проблемою державного рівня і тому для її розв'язання залучено значні наукові та інженерні сили. Задачі аналізу, забезпечення та управління надійністю в електроенергетиці розв'язуються фахівцями експлуатаційних, проектних і ремонтно-налагоджувальних організацій, апарато- та електромашинобудівних заводів, а також співробітниками науково-дослідних та навчальних закладів електроенергетичного профілю.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 4

До загальних понять у даній терміносистемі віднесено передусім поняття об'єкта, системи, елемента, тобто предметів розгляду в теорії надійності.

Об'єкт – система, споруда, машина, підсистема, апаратура, функціональна одиниця, пристрій, елемент чи будь-яка їх частина, що розглядається з погляду надійності як самостійна одиниця.

Система - сукупність елементів, які взаємодіють у процесі виконання певного кола задач і взаємопов'язані функціонально.

Елемент - найпростіша частина системи, яка з погляду аналізу надійності не підлягає дальшому поділові.

Об'єкт - одне з найзагальніших понять теорії надійності. Об'єкт включає в себе поняття і системи, і елемента. Об'єктом можна назвати електроенергетичну систему, систему керування, електричну машину, апарат тощо. Найважливішою ознакою системи є те, що її складові елементи утворюють у взаємозв'язку єдине ціле з якісно новими властивостями. Поділ на систему чи елемент часто буває умовним, оскільки елемент, як найпростіша частина системи в рамках даного розгляду, може являти собою систему в рамках детальнішого аналізу. Об'єкти (елементи) в теорії надійності ділять на два класи: відновлювані та невідновлювані.

Відновлюваний об'єкт - об'єкт, робота якого після відмови може бути відновлена в результаті проведення відновлювальних робіт (ремонт, регулювання, оперативних перемикань тощо).

Невідновлюваний об'єкт - об'єкт, робота якого після відмови вважається небезпечною, неможливою чи недоцільною.

Поняття, що визначають властивості об'єкта з погляду надійності. Кожен об'єкт має певні властивості, які визначають характер його функціонування. Надійність роботи - одна з таких властивостей.

Надійність - властивість об'єкта виконувати задані функції в заданому обов'язку у певних умовах функціонування.

Надійність - це комплексна властивість об'єкта, яка може включати кілька одиничних властивостей. До одиничних властивостей надійності електроенергетичних об'єктів належать: безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, схоронність, стійкоздатність, живучість, режимна керованість, безпека.

Безвідмовність - властивість об'єкта неперервно зберігати працездатність протягом деякого часу чи наробку.

Довговічність - властивість об'єкта зберігати працездатність до настання граничного стану в умовах наявної системи технічного

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 5

обслуговування та ремонтів.

Ремонтпридатність - властивість об'єкта бути пристосованим до виявлення причин виникання відмов та пошкоджень і до проведення технічного обслуговування та ремонтів.

Схоронність - властивість об'єкта неперервно зберігати працездатність протягом всього часу збереження і (або) транспортування та безпосередньо після нього.

Одиничні властивості **стійкоздатність, живучість, режимна керованість, безпека** будуть визначені після розгляду особливостей функціонування ЕЕС.

Поняття, що визначають стани об'єкта. У процесі функціонування об'єкт може перебувати в різних станах, частота виникання та тривалість яких впливають на виконання об'єктом заданих функцій у заданому обсязі.

Працездатний стан (працездатність) - стан об'єкта, в якому він здатний виконувати всі або частину заданих функцій у повному або частковому обсязі.

Непрацездатний стан (непрацездатність) - стан об'єкта, в якому він не здатний виконувати жодної з заданих функцій.

Робочий стан - стан об'єкта, в якому він виконує всі або частину заданих функцій у повному чи частковому обсязі.

Неробочий стан - стан об'єкта, в якому він не виконує жодної з заданих функцій.

Стан відновлення (аварійного ремонту) - неробочий стан об'єкта, коли на ньому проводять роботи з відновлення працездатності.

Граничний стан - стан об'єкта, коли його подальша експлуатація повинна бути припинена внаслідок небезпеки, неможливості чи недоцільності.

У теорії надійності враховують також частково (повністю) працездатні стани, частково (повністю) робочі стани, стани перебування об'єкта в резерві тощо.

Поняття, що визначають події змін станів об'єкта. Зміни станів об'єкта настають після виникання певних подій.

Відмова - подія, яка спричинює порушення працездатності об'єкта, тобто його перехід з одного рівня працездатності чи функціонування на інший нижчий рівень або у повністю непрацездатний стан.

Аварія - подія, яка спричинює порушення працездатності об'єкта, тобто його перехід з одного рівня працездатності чи функціонування на інший значно нижчий рівень і призводить до важких техніко-економічних та соціальних

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 6

наслідків.

Відмови класифікують за рядом ознак. За ознакою рівня порушення працездатності розрізняють повні та часткові відмови, за ознакою зв'язку з відмовами інших об'єктів - залежні та незалежні, за характером прояву - раптові та поступові і т.д.

Повна (часткова) відмова - відмова, внаслідок якої об'єкт повністю (частково) втрачає працездатність.

Залежна (незалежна) відмова - відмова об'єкта, ймовірність виникання якої залежить (не залежить) від того, наступила чи не наступила відмова іншого об'єкта.

Поділ відмов на раптові та поступові умовний. Раптова відмова формується миттєво та супроводжується стрибкоподібною зміною основних параметрів об'єкта внаслідок діяння зовнішніх навантажень, різкого погіршення умов роботи, помилкових дій персоналу тощо. Поступова відмова формується довго та супроводжується плавною зміною параметрів об'єкта внаслідок старіння та зношення. Якщо процес формування поступової відмови контролюють, то в разі її наближення об'єкт позапланово виводять з роботи, знижуючи цим до мінімуму можливі негативні наслідки. Якщо ж такий контроль відсутній, то поступова відмова проявить себе як раптова.

До інших подій, які зумовлюють зміну станів об'єкта, можна віднести також відновлення, пошкодження, намірене вимикання тощо.

Відновлення - подія, яка зумовлює перехід об'єкта з непрацездатного у працездатний стан.

Пошкодження - подія, яка спричинює порушення справності об'єкта за умови збереження його працездатності.

Намірене вимикання - подія переведення об'єкта в неробочий стан цілеспрямованим вимиканням.

Поняття, що стосуються кількісної оцінки надійності об'єктів. Властивості об'єкта, пов'язані з надійністю його роботи, певним чином характеризують кількісно. Такими характеристиками є показники надійності.

Показник надійності - кількісна характеристика одної чи кількох властивостей об'єкта, які визначають його надійність.

Одиничний показник надійності - кількісна характеристика одної властивості об'єкта, яка визначає його надійність.

Комплексний показник надійності - кількісна характеристика двох і більше властивостей об'єкта, які визначають його надійність.

Наробок - тривалість або обсяг роботи об'єкта.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 7

Ресурс - наробок об'єкта від початку експлуатації чи від її відновлення після ремонту до настання граничного стану.

Термін служби - календарна тривалість експлуатації об'єкта від її початку чи від її відновлення після ремонту до настання граничного стану.

У загальному випадку надійність характеризується сукупністю показників, номенклатуру яких в умовах конкретної задачі доводиться вибирати. Вибір тієї чи іншої номенклатури показників визначається можливістю їх встановлення та повнотою оцінки рівня надійності об'єкта. Вибрати сукупність показників і встановити значення кожного з них неможливо без чіткого формулювання критеріїв відмови та відновлення.

Критерій відмови - ознака або сукупність ознак порушення працездатності об'єкта.

Критерій відновлення - ознака або сукупність ознак переходу об'єкта до повної чи часткової працездатності.

Конкретні форми критеріїв відмов та відновлень встановлюють, переважно, нормативно-технічною документацією. Їх вибирають так, щоб забезпечити ідентифікацію працездатності та непрацездатності об'єкта максимально швидко та доступними технічними засобами.

Поняття надійності електроенергетичної системи. Надійність ЕЕС визначають, виходячи з загального визначення надійності технічного об'єкта, як його властивості виконувати задані функції в заданому обсязі у певних умовах функціонування.

Першою заданою функцією ЕЕС є її функція за призначенням, тобто постачання споживачам електроенергії. З виконанням цієї функції пов'язують надійність ЕЕС у вузькому розумінні. Надійність ЕЕС у широкому розумінні пов'язують з виконанням двох функцій: названої функції за призначенням та функції, зумовленої фактом існування ЕЕС. Виконання другої функції полягає в тому, що ЕЕС зобов'язана не створювати ситуацій, небезпечних для людей і навколишнього середовища. У цій другій функції проявляється безпека ЕЕС, як одинична властивість її надійності.

ЕЕС повинна постачати електроенергію споживачам неперервно і дотримуватися вимог щодо обсягів постачання та якості електроенергії. Орієнтуючись на критерії відмов, можна твердити, що відмовою ЕЕС є будь-яка перерва електропостачання чи обмеження живлення частини споживачів. Для встановлення факту обмеження живлення до уваги беруть записані в договорі між ЕЕС і споживачем умови, згідно з якими обсяги електропостачання регламентують відповідними диспетчерськими графіками.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 8

Якщо споживач вимагає збільшити постачання електроенергії понад встановлені обсяги, то ЕЕС має право не задовольняти такої вимоги і для неї це не вважається відмовою.

Вимоги щодо якості електроенергії регламентують нормативними показниками. Проте дотримання нормативних показників якості не обов'язкове і не служить критерієм відмови. За порушення норм якості електроенергії електропостачальна організація виплачує споживачам компенсацію збитків, але ці витрати не стосуються надійності роботи ЕЕС. До речі, частота в ЕЕС України тривало опускалася до рівня 49,2 Гц в той час, коли нормативне відхилення частоти не повинно перевищувати рівня $50 \pm 0,4$ Гц.

Критерієм відмови ЕЕС з погляду якості електроенергії є вихід її параметрів за технічно допустимі межі, коли неспроможні працювати електроустановки споживача або неспроможний існувати режим системи. Технічно допустимі параметри встановлені для напруги і частоти. У вузлах навантаження допустиму напругу визначають, виходячи з нормативних запасів статичної стійкості навантаження за напругою. Вони становлять 15% у нормальних та обтяжених режимах і 10% у вимушених (післяаварійних) режимах. Допустиме значення частоти лежить в межах 49,0...50,5 Гц, бо за межами цього діапазону частот не може працювати устаткування власних потреб ЕС, яке найбільше чутливе до її змін.

Таким чином, у вузькому розумінні необхідними та достатніми умовами надійної роботи ЕЕС є безперебійність живлення споживачів, відсутність обмежень електропостачання в границях встановлених обсягів і відпуск споживачам електроенергії технічно допустимих параметрів. Отже, надійність ЕЕС у вузькому розумінні можна визначити так:

Надійність ЕЕС - це її властивість виконувати безперебійне в часі та необмежуване у границях встановлених обсягів постачання споживачам електроенергії технічно допустимих параметрів.

У загальному випадку необхідні та достатні умови надійної роботи ЕЕС включають ще вимогу безпеки. Тому в широкому розумінні надійність ЕЕС визначають так:

Надійність ЕЕС - це її властивість виконувати безперебійне в часі та необмежуване в границях встановлених обсягів постачання споживачам електроенергії технічно допустимих параметрів і не допускати ситуацій, небезпечних для людей і довкілля.

Вимога безпеки, врахована у визначенні надійності ЕЕС, передбачає врахування тих небезпечних для людини і навколишнього середовища

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 9

ситуацій, які виникають у результаті відмов, а не в умовах нормального функціонування системи. Виникання небезпечних ситуацій в умовах відсутності відмов пов'язані з низьким рівнем технічної досконалості об'єкта і відношення до надійності його роботи не мають.

Проблема надійності ЕЕС багатопланова, проте можна виділити три основні площини, в яких вона розв'язується: теоретична (розробка та вдосконалення методів аналізу); практична (розробка та впровадження заходів щодо забезпечення надійності); організаційна (створення системи управління надійністю). Задачі аналізу, забезпечення та управління надійністю ЕЕС взаємопов'язані. Їх розв'язання надзвичайно складне через складність самих ЕЕС як систем кібернетичного типу.

Ефективний аналіз надійності ЕЕС можливий лише за умови врахування всіх особливостей процесу їх функціонування, який на відміну від процесів функціонування інших технічних об'єктів відзначається неперервною зміною станів системи та існуванням у ній цілого спектру різних режимів.

У нормальних умовах роботи ЕЕС періодично виводять у ремонт або в резерв і вводять у дію ЛЕП, генерувальні агрегати ЕС, устаткування ПС. Окремі електроустановки переводять з робочого в неробочий стан і навпаки під час режимних змін у системі внаслідок зменшення навантаження до мінімуму та наступного його збільшення до максимуму. В умовах наявності дефіцитів потужності ЕС чи енергоресурсів, ЕЕС після втрати окремих зв'язків може перейти в обтяжений (утруднений) режим роботи.

Аварійні режими ЕЕС формуються по-особливому. У випадкових місцях території та у випадкові моменти часу виникають відмови елементів системи, спостерігаються збіги відмов, стаються аварії. У таких випадках наступають перерви електропостачання окремих споживачів або їх груп, вузлів навантаження, обмеження в забезпеченні електроенергією значної частини споживачів. Втрати окремих важливих зв'язків ЕЕС, глибокі порушення балансів її потужності, відмови засобів автоматичного керування режимами, помилки оперативно-диспетчерського персоналу можуть спричинити формування важких системних аварій і непередбачувані за наслідками зміни структури та енергетичного стану системи.

Вирішення питань аналізу, забезпечення та управління надійністю ЕЕС потребує розв'язання цілого комплексу задач. Усю їх сукупність можна розділити на такі класи:

концептуальні задачі (визначення місця та обсягу задач надійності в загальній проблемі експлуатації та управління розвитком ЕЕС, розробка

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025 Арк 83 / 10
	ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»			
	Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	

системи показників надійності та концепції аналізу і забезпечення надійності ЕЕС);

інформаційні задачі (реєстрація, збирання та обробка статистичних даних про відмови електроустановок і про наслідки порушень електропостачання споживачів, створення баз даних для електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) автоматизованих систем проектування та диспетчерського управління);

функціональні задачі (оцінка фактично досягнутого чи прогнозованого ступеня надійності ЕЕС на різних часових, територіальних, ситуативних та структурно-функціональних рівнях, декомпозиція загальної задачі аналізу надійності функціонування ЕЕС);

нормативні задачі (вироблення експлуатаційних та проектних рішень стосовно ЕЕС з урахуванням чинника надійності на основі підтверджених практикою нормативів, розробка самих нормативів);

оптимізаційні задачі (вироблення експлуатаційних та проектних рішень стосовно ЕЕС з урахуванням чинника надійності на основі критеріїв економічної ефективності).

Основні оптимізаційні задачі надійності ЕЕС

Часовий рівень управління	
проектування розвитку	планування режимів
1. Вибір (оптимізація) структури і параметрів електроустановок.	1. Вибір складу працюючого устаткування та розробка оперативної схеми ЕМ.
2. Вибір (оптимізація) схеми ЕМ, головних схем ЕС і ПС, пропускної здатності зв'язків.	2. Розподіл резервів потужності між районами системи та між увімкненою та неувімкненою складовими.
3. Визначення величини резерву активної потужності та його розміщення в системі.	3. Складання графіків капітальних і поточних ремонтів основного устаткування ЕС і ПС.
4. Розробка структури, вибір та розміщення засобів керування системою в аварійних режимах.	4. Визначення алгоритмів дії та параметрів спрацювання засобів автоматичного протиаварійного керування (АПАК).

Порушення електропостачання споживачів виникають, коли припиняється або обмежується їх живлення. Ці порушення настають з вини ЕЕС, тобто вони є фактично відмовами ЕЕС як деякого електроенергетичного об'єкта. За своїм характером відмови ЕЕС є частковими, бо втрата живлення всіх споживачів одночасно не настає. Відмови ЕЕС - це події, які є наслідком виникання інших подій. Вони пов'язані з деякими первинними збуреннями (відмовами в самій системі), до яких належать:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 11

- короткі замикання (КЗ) і пошкодження електроустановок (дефекти, старіння, діяння перенапруг чи механічних сил тощо);
- хибна робота та відмови пристроїв РЗА, систем керування та засобів регулювання режимів;
- помилки експлуатаційного персоналу під час оперативних перемикань та дій у моменти ліквідації аварій;
- виникання дефіцитів енергоресурсів (спрацювання водних запасів, недопоставки чи погіршення якості палива).

Первинні збурення змінюють схему та режими ЕЕС і спричинюють тим самим порушення електропостачання споживачів. Проте первинні збурення не завжди призводять до відмови ЕЕС. Наприклад, аварійне вимикання одного з трансформаторів ПС, вимикання одної з ліній кільця тощо не обов'язково порушують електропостачання споживачів.

Надійність ЕЕС визначається великою кількістю чинників. Існуючі методи аналізу надійності не спроможні враховувати всі особливості ЕЕС в єдиних розрахункових схемах і алгоритмах. У зв'язку з цим дослідження надійності роботи ЕЕС виконують шляхом декомпозиції єдиної задачі аналізу надійності на певні напрями, які мають самостійне значення.

Первинні збурення виникають у різних підсистемах ЕЕС і внаслідок порушення їх структури чи режиму спричинюють недовідпуски електроенергії споживачам. Підсистеми ЕЕС, а також систему ресурсного забезпечення та систему керування режимами можна розглядати як основні спричинювачі недовідпусків електроенергії споживачам, кожен з яких характеризується своїм індивідуальним рівнем надійності й у загальному обсязі недовідпусків електроенергії має свою частку (сектори круга). Це значить, що надійність ЕЕС у цілому можна оцінювати за рівнем надійності її підсистем і що окремий розгляд надійності кожної з підсистем ЕЕС є першим кроком декомпозиції загальної задачі аналізу надійності ЕЕС.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 12

Підсистеми ЕЕС у структурному та режимному плані також дуже складні й оцінювати їх повну (функціональну) надійність надзвичайно важко. Для підсистем ЕЕС вдається оцінювати тільки їх часткові види надійності, які найбільш характерні для конкретної підсистеми. Такими частковими видами надійності є структурна, режимна, балансова та перехідна надійності, а також стійкоздатність та живучість як одиничні властивості надійності.

Існують три магістральні шляхи забезпечення надійності ЕЕС. Це - використання резервування в його різних формах, підвищення рівня надійності всіх елементів структури системи та вдосконалення системи керування режимами ЕЕС. Ці шляхи реалізують на основі розробки та впровадження організаційних і технічних заходів щодо підвищення надійності.

Резерви в ЕЕС

Резервування - це метод підвищення надійності за рахунок надлишковості, тобто за рахунок додаткових засобів і можливостей понад мінімально необхідні для виконання об'єктом заданих функцій.

З існуючих видів резервування в ЕЕС використовують структурне (надлишкові елементи структури об'єкта), навантажувальне (здатність об'єкта сприймати додаткове навантаження), ресурсне (запаси енергоносіїв), функціональне (здатність елементів структури виконувати додаткові функції - переведення генератора в режим синхронного компенсатора), інформаційне (надлишкова інформація для управління енергосистемою).

У генерувальній частині ЕЕС утворюють резерви активної потужності. Резерв потужності визначається різницею між сумарною наявною потужністю ЕС та річним максимумом їх сумарного навантаження. Створення резерву потужності належить до дорогих заходів забезпечення надійності і вимагає тривалого часу для своєї реалізації, тому вирішується на стадії управління розвитком ЕЕС.

Необхідну величину резерву потужності можна визначити, врахувавши кожен зі складових повного розрахункового резерву: навантажувальний, аварійний та ремонтний резерв.

Навантажувальний резерв необхідний для покривання випадкових коливань потужності споживання. Цей резерв виділяється для регулювання частоти в ЕЕС. Нерегулярні коливання навантаження відносно значення, заданого графіком, підпорядковуються нормальному закону. Відносна величина середньоквадратичного відхилення навантаження менша в потужніших ЕЕС внаслідок збільшення імовірності взаємної компенсації

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 13

випадкових відхилень навантаження окремих споживачів. Величину резерву навантаження встановлюють переважно за даними статистики.

Ремонтний резерв необхідний для компенсації зниження потужності ЕЕС під час виведення основного устаткування ЕС у плановий ремонт. Його величина визначається частотою та тривалістю планових ремонтів усієї сукупності агрегатів ЕС. Зі збільшенням цих показників величина ремонтного резерву зростає, бо працюючими агрегатами необхідно покривати більшу частину недовиробленої електроенергії.

Аварійний резерв потужності необхідний для компенсації аварійного зниження потужності ЕЕС у разі вимушених (аварійних та інших непланових) простоїв основного устаткування ЕС. Величину аварійного резерву розраховують методами теорії ймовірностей, які враховують частоту та тривалість аварійних вимикань генерувальних агрегатів.

Аварійний резерв разом з резервом навантаження в умовах експлуатації зберігається у вигляді єдиного оперативного резерву, який використовують для покривання раптових дефіцитів потужності в ЕЕС, що виникають у результаті аварійних вимикань генерувального устаткування та непередбачуваних збільшень навантаження.

Оперативний резерв за ознакою мобільності ділять на дві складові: ввімкнений (гарячий) та неввімкнений (холодний) резерви. До ввімкненого резерву відносять обертовий резерв, розміщений на працюючих агрегатах, який можна реалізувати за час від декількох секунд до декількох хвилин, а також резерв, розміщений на зупинених агрегатах (ГЕС, ГАЕС, ГТЕС, ТЕС з поперечними зв'язками), які можна запустити в роботу за час від декількох хвилин до 1-2 годин. До неввімкненого (холодного) резерву відносять резерв, розміщений на зупинених агрегатах (переважно ТЕС і АЕС), які можна запустити в роботу за час від 1-2 до 24 годин і більше.

Кожен об'єкт має певні властивості, які визначають характер його функціонування. Надійність об'єкта - це комплексна властивість і залежно від призначення об'єкта та умов його застосування може характеризуватися такими властивостями як безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережувальність чи містити певні їх поєднання.

Безвідмовність (англ. reliability) - властивість об'єкта виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи наробітку.

Довговічність (англ. durability) - властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан за наявної системи технічного обслуговування та ремонту.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 14

Ремонтопридатність (англ. maintainability) - властивість об'єкта бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, в якому він здатний виконувати потрібні функції за допомогою технічного обслуговування та ремонту.

Збережуваність - властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати необхідні функції, протягом і після збереження або транспортування.

Такі одиничні властивості об'єкта як стійкоздатність, живучість, режимна керованість та безпека будуть визначені нижче після розгляду особливостей функціонування ЕЕС.

Справність (англ. good state) - стан об'єкта, за якого він здатний виконувати всі задані функції об'єкта.

Несправність (англ. fault) - стан об'єкта, за якого він нездатний виконувати хоча б одну із заданих функцій об'єкта.

Аналіз несправностей (англ. fault analysis) - логічне та систематичне дослідження об'єкта для ідентифікації та аналізу ймовірностей виникнення, причин та наслідків потенційних несправностей.

Працездатний стан (англ. up state) - стан об'єкта, який характеризується його здатністю виконувати усі потрібні функції.

Непрацездатний стан (англ. down state) - стан об'єкта, за яким він нездатний виконувати хоча б одну з потрібних функцій.

Робочий стан - стан об'єкта, в якому він виконує всі або частину заданих функцій у повному чи частковому обсязі.

Неробочий стан - стан об'єкта, в якому він не виконує жодної з заданих функцій.

Стан відновлення (аварійного ремонту) — неробочий стан об'єкта, коли на ньому проводять роботи з відновлення працездатності.

Граничний стан - стан об'єкта, коли його подальша експлуатація повинна бути припинена внаслідок небезпеки, неможливості чи недоцільності.

Класифікація відмов за ознаками

Відмови	Ознака відмов
За характером виникнення	<p><i>Раптова відмова (англ. sudden failure)</i> - відмова, що виявляється в різкій (миттєвій) зміні характеристик об'єкта;</p> <p><i>Поступова відмова (англ. gradual failure)</i> - відбувається в результаті повільного, поступового погіршення якості об'єкта</p>

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 15

За причиною виникнення	<p><i>Конструкційна відмова (англ. design failure)</i> - спричинена недоліками або невдалою конструкцією об'єкта.</p> <p><i>Виробнича відмова (англ. manufacturing failure)</i> - пов'язана з помилками під час виготовлення об'єкта через недосконалість або порушення технології.</p> <p><i>Експлуатаційна відмова</i> - зумовлена порушенням правил експлуатації об'єкта</p>
За характером усунення	<p><i>Стійка відмова.</i></p> <p><i>Нестійка (переміжна) відмова</i> - то виникає, то зникає.</p> <p><i>Легка відмова</i> (яку можна легко усунути).</p> <p><i>Середня відмова</i> (не спричиняє відмови суміжних вузлів - вторинні відмови).</p> <p><i>Важка відмова</i> (яка зумовлює вторинні відмови або призводить до загрози життю та здоров'ю людини)</p>
За подальшим використанням об'єкта	<p><i>Повна відмова (англ. complete failure)</i> - виключає можливість роботи об'єкта до її усунення.</p> <p><i>Часткова відмова (англ. partial failure)</i> - відмова, за якої об'єкт можна частково використовувати.</p>
За легкістю виявлення	<p><i>Очевидна (явна) відмова.</i></p> <p><i>Прихована (неявна) відмова</i></p>
За часом виникнення	<p><i>Відмова припрацювання</i> виникає у початковий період експлуатації.</p> <p><i>Відмова під час нормальної експлуатації.</i></p> <p>Відмови, зумовлені незворотними процесами зношування деталей, старіння матеріалів тощо.</p>

Інтенсивність відмов (англ. instantaneous failure rate) $Z(t)$ - умовна густина ймовірності появи відмови об'єкта, яку визначають, якщо до цього моменту відмова не виникла (лише для невідновлюваних об'єктів);

Середня інтенсивність відмов (англ. mean failure rate) $Z(t_1, t_2)$ - середнє значення інтенсивності відмов у заданому інтервалі часу.

Імовірність безвідмовної роботи (англ. reliability function) $R(t_1, t_2)$ - імовірність того, що протягом заданого напрацювання відмови об'єкта не виникне.

Середній ресурс (англ. mean life) - математичне сподівання ресурсу.

Гамма-відсотковий ресурс (англ. gamma-percentile life) - сумарне

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 16

напрацювання, протягом якого об'єкт не досягне граничного стану з імовірністю u , вираженою у відсотках.

Середній термін служби (англ. mean lifetime) - математичне сподівання терміну служби.

Гамма-відсотковий термін служби (англ. gamma-percentile lifetime) - календарна тривалість експлуатації, протягом якої об'єкт не досягне граничного стану з імовірністю u , вираженою у відсотках.

Імовірність відновлення (англ. probability of restoration) $M(B)$ - імовірність того, що час відновлення працездатного стану об'єкта не перевищить заданого значення.

Середня тривалість відновлення (англ. mean restoration time) MTTR - математичне сподівання часу відновлення працездатного стану об'єкта після відмови.

Гамма-відсоткова тривалість відновлення (англ. gamma-percentile restoration time) - інтервал часу, протягом якого відновлення працездатності об'єкта здійсниться з імовірністю u , вираженою у відсотках.

Інтенсивність відновлення (англ. instantaneous repair rate) $\rho(t)$ - умовна густина ймовірності відновлення працездатності об'єкта, яку визначають для одного моменту часу, якщо до цього моменту відновлення не завершилося.

Середня інтенсивність відновлення (англ. mean repair rate) $\rho(t_1, t_2)$ - середнє значення інтенсивності в заданому інтервалі часу.

Резервування (англ. redundancy) - спосіб забезпечення надійності об'єкта за рахунок використання додаткових засобів та (або) можливостей, надлишкових відносно мінімально необхідних для виконання потрібних функцій.

Структурне резервування (англ. structural redundancy) - резервування з застосуванням резервних елементів структури об'єкта.

Основний елемент (en: major element) - елемент об'єкта, необхідний для виконання потрібних функцій без використання резерву.

Резервований елемент (англ. element under redundancy) - основний елемент, на випадок відмови якого в об'єкті передбачені один або кілька резервних елементів, тобто таких, які призначені для виконання функцій основного елемента в разі його відмови.

Резервний елемент (англ. redundancy element) - елемент, призначений для виконання функцій основного елемента в разі його відмови.

Кратність резерву (англ. redundancy ratio) - відношення кількості резервних елементів до кількості резервованих ними елементів, виражене нескоротним дробом.

Навантажений резерв (англ. active reserve) - резерв, що містить один чи кілька резервних елементів, які перебувають у режимі основного елемента.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 17

Полегшений резерв (англ. reduced reserve) - резерв, що складається з одного чи кількох резервних елементів, які перебувають у режимі меншого навантаження порівняно з основним елементом.

Ненавантажений резерв (англ. standby reserve) - резерв, що складається з одного чи кількох резервних елементів, які перебувають у ненавантаженому стані до початку виконання ними функцій основного елемента.

Загальне резервування (англ. whole system redundancy) - резервування, в якому резервується об'єкт в цілому.

Роздільне резервування (англ. segregated redundancy) - резервування, в якому резервуються окремі елементи об'єкта чи їх групи.

Стале резервування (англ. continuous redundancy) - таке, в якому використовують навантажений резерв і в якому, за відмови будь-якого елемента резервованої групи, виконання об'єктом потрібних функцій забезпечується без перемикань рештою елементів.

Заміщувальне резервування (англ. standby redundancy) - резервування, в якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного елемента.

Ковзне резервування (англ. sliding redundancy) - заміщувальне резервування, за якомго група основних елементів резервується одним чи кількома резервними елементами, кожний з яких може замінити будь-який з елементів цієї групи у випадку його відмови.

Резервування без відновлення (англ. redundancy without restoration) - резервування, при якому відновлення основних і (чи) резервних елементів у випадках їх відмови технічно неможливе без порушення працездатності об'єкта в цілому та (або) не передбачене експлуатаційною документацією.

Резервування з відновленням (англ. redundancy with restoration) - це резервування основних і (чи) резервних елементів, у випадку їх відмови, технічно можливе без порушення працездатності об'єкта в цілому та передбачене експлуатаційною документацією.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 18

ТЕМА 2. Елементи теорії ймовірностей та математичної статистики в задачах аналізу надійності

Одним з найважливіших понять теорії ймовірності є поняття «випадкова величина». Випадковою називають величину, яка в результаті дослідження може набувати певних значень, причому заздалегідь невідомо, яких саме. Під час аналізу надійності енергообладнання методами математичної статистики доводиться мати справу з дискретними і з неперервними випадковими величинами. Дискретні можуть набувати лише відокремлених одне від одного значень, а неперервні - неперервно заповнюють деякий проміжок на числовій осі. До дискретних випадкових величин, зокрема, належать кількість виробів, що відмовили, кількість відмов устаткування за розглянутий проміжок часу тощо. До неперервних випадкових величин належить напрацювання до відмови або між двома послідовними відмовами, час відновлення агрегату тощо.

Для кількісного порівняння подій (наприклад, відмови устаткування) за ступенем їх імовірності потрібно з кожною з них пов'язати певне число, яке тим більше, чим імовірніша подія. Таке число, яке називають імовірністю події, є числовою мірою об'єктивної можливості цієї події. Поняття «ймовірність події» пов'язане з досліджуваним поняттям «частота події». Одиницю виміру ймовірності визначають на основі двох протилежних видів подій: достовірної, тобто такої, яка в результаті дослідження неодмінно відбудеться, і неможливої, яка під час дослідження відбутися не може. Для першої ймовірність дорівнює одиниці, для другої - нулю. Отже, ймовірність будь-якої події перебуває в інтервалі $0 \dots 1$.

Існує клас подій, де можливий безпосередній розрахунок їх імовірностей. Це дослідження із симетричними та однаково можливими результатами. Декілька подій у таких дослідженнях утворюють повну групу подій, якщо в результаті дослідження має з'явитися принаймні одна з них.

Несумісними подіями в подібних дослідженнях є такі, які не можуть виникнути разом (наприклад, відмова агрегату й одночасно його безвідмовна робота протягом розглянутого періоду часу). Декілька подій у дослідженні називають рівноможливими, якщо за умовою симетрії жодна із цих подій не є об'єктивно більш можливою. Наприклад, відмова в роботі будь-якого агрегату з групи однотипних, що перебувають в однакових умовах експлуатації, рівноможлива.

Розрізняють групи подій, яким притаманні всі три властивості, тобто вони

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 19

утворюють повну групу, а також є несумісними й рівноможливими. Події, що утворюють таку групу, називають випадками. Випадок вважають сприятливим для деякої події, якщо його виникнення спричиняє виникнення цієї події.

Безпосередні способи обчислення ймовірностей комплексних подій часто ускладнені й не завжди можливі, тому застосовують непрямі методи, що дають змогу за відомими ймовірностями одних подій визначати ймовірності інших подій, що пов'язані з ними. Для цього використовують основні теореми теорії ймовірностей.

Однією з найважливіших вважають теорему про підсумовування ймовірностей: імовірність суми двох несумісних подій дорівнює сумі ймовірностей окремих подій.

Випадкову величину можна повністю описати з погляду ймовірності якщо задати розподіл імовірностей. Випадкові величини позначають великими літерами (наприклад, X), а їх можливі значення - відповідними малими літерами алфавіту (x).

Законом розподілу випадкової величини називають співвідношення між можливими значеннями випадкової величини й відповідними їм імовірностями. Для дискретної випадкової величини закон розподілу ймовірностей подають у вигляді ряду розподілу.

Для неперервної випадкової величини таку характеристику побудувати не можна, оскільки ця величина може мати нескінченну множину значень, що суцільно заповнюють проміжок. Крім того, кожному окремому значенню неперервної випадкової величини зазвичай не властива ніяка відмінна від нуля ймовірність, тому для неперервної випадкової величини не існує ряду розподілу в тому розумінні, у якому його описано для дискретної величини, але, у той самий час, різні області можливих значень випадкової величини X не однаково ймовірні. Для кількісної характеристики розподілу ймовірностей неперервної випадкової величини використовують не ймовірність події $X = x$, а ймовірність події $X < x$, де x - деяка поточна змінна. Імовірність цієї події є функцією від x , яку називають функцією розподілу випадкової величини X і позначають $P(x)$; $P(x) = P(X < x)$.

Таку функцію ще називають інтегральною функцією розподілу. Цю універсальну характеристику випадкової величини використовують як для неперервних, так і для дискретних випадкових величин, вона повністю визначає випадкову величину з імовірнісного погляду.

Серед числових характеристик випадкових величин найперше виокремлюють ті, які визначають положення випадкової величини на числовій осі, а саме: математичне сподівання (середнє значення), моду й медіану.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 20

Математичним сподіванням випадкової величини називають суму добутків усіх значень випадкової величини на ймовірності цих значень.

Модю М випадкової величини називають її найімовірніше значення. Для неперервної випадкової величини модю вважають те значення, у якому густина ймовірності є максимальною.

Якщо у відновлюваному об'єкті потік відмов найпростіший, то випадкова кількість відмов об'єкту протягом фіксованого напрацювання має розподіл Пуассона. Цьому ж закону розподілу підпорядковано випадкову кількість відмов відновлюваного виробу протягом періоду припрацювання. Здебільшого розподіл Пуассона застосовують як зручне наближення до біномного розподілу.

Нормальний закон розподілу неперервних випадкових величин (закон Гауса). Цей закон на практиці використовують найчастіше. Його основна особливість полягає в тому, що він є граничним законом, до якого наближаються всі інші закони розподілу. Зокрема, цьому закону підпорядковуються похибки вимірювання. Час відновлення ремонтів об'єктів наближено розподілений за нормальним законом. Іноді за нормальним законом розподіляється напрацювання до відмови невідновлюваних об'єктів. Нормальний розподіл переважно використовують для наближених розрахунків у випадках біномного розподілу або розподілу Пуассона.

Експонентний розподіл часто використовують для розгляду раптових відмов у разі, коли явища зношування і старіння виражені слабо. Експоненціальному розподілу підпорядковано також напрацювання відновлюваних об'єктів між сусідніми відмовами до закінчення періоду припрацювання. У першому наближенні час відновлення об'єктів розподілено також за експоненціальним законом.

Для розв'язання задач надійності в електроенергетичних системах налагоджено збирання інформації про відмови електроустановок. Збирають статистичні дані на основі єдиної системи обліку, яка передбачає ведення первинної технічної документації про відмови й аварії, складання технічної звітності, збереження отриманих статистичних даних та їх централізовану обробку. Зібраний статистичний матеріал слугує не лише для потреб аналізу надійності, а й для вивчення причин відмов та розроблення заходів, спрямованих на підвищення надійності електроустановок, які реалізуються на стадіях проектування, виготовлення, монтажу та експлуатації.

Ефективним засобом нагромадження статистичної інформації про відмови є випробування, хоча вони мають такий недолік, як значні витрати часу та матеріальні затрати. Випробування повинні проводитися в умовах і режимах

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 21

роботи, близьких до експлуатаційних. Вони поділяються на визначальні та контрольні. Визначальні випробування проводять для всіх новостворених та модернізованих виробів на їх дослідних зразках з метою визначення фактичних значень показників надійності та перевірки відповідності показників технічному завданню або чинним нормам. Контрольні випробування простіші. Вони покликані констатувати факт, що значення показника надійності досліджуваного виробу не нижче за встановлену норму із заданою ймовірністю (переважно з ймовірністю 0,8). Контрольні випробування повинні проводитися на базових моделях устаткування одного типу періодично в терміни, передбачені технічними умовами, а також після змін конструкції, матеріалів чи технології виготовлення, які впливають на показники надійності.

Збирання інформації про відмови, її обробка, встановлення значень показників надійності за статистичними даними, планування випробувань та спостережень тощо виконують за методами математичної статистики. Використання цих методів проілюстровано нижче на прикладі трьох важливих для практики надійності задач: встановлення закону розподілу випадкової величини; оцінка ступеня достовірності статистичних показників надійності; визначення необхідних обсягів статистичних даних. Методи обробки статистичної інформації, одержаної в результаті випробувань чи за даними експлуатації, однакові, тому надалі джерела інформації про відмови розмежовувати не будемо.

Встановлення закону розподілу випадкової величини. Нехай у результаті спостережень, випробувань чи вимірювань встановлено n значень деякої випадкової величини X (часу безвідмовної роботи, амплітуди струму блискавки тощо). Одержану сукупність значень X називають простим статистичним рядом. Для встановлення закону розподілу величини X виділяють три етапи:

- оброблення даних простого статистичного ряду та побудова гістограми чи статистичної функції розподілу;
- вибір виду теоретичного розподілу та розрахунок його параметрів;
- перевірка відповідності теоретичного розподілу статистичному за критеріями згоди.

Мінімально необхідні обсяги статистичної інформації залежать від досліджуваного показника надійності, закону розподілу часу безвідмовної роботи об'єкта, вимог до точності визначення показника та від плану випробувань чи спостережень.

Спостереження за відмовами та випробування на надійність виконують за одним з таких планів: [NUN]; [NUr]; [NRr]; [NMr]; [NUT]; [NRT]; [NMT]; [NUS]; [NRS]; [NMS] і т.д. У наведених позначеннях планів кожна літера несе

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 22

певний зміст: N - обсяг вибірки; U - невідновлювані об'єкти; R - відновлювані замінювані об'єкти; M- відновлювані ремонтвані об'єкти; r - число відмов чи об'єктів, що відмовили; T - наробок або час випробувань; S - випробування з поточними змінами

План [NUr], наприклад, - це план випробувань (спостережень), згідно з яким випробовують одночасно N об'єктів; об'єкти, що відмовили, невідновлюють і не замінюють; випробування тривають до відмови r об'єктів.

Якщо випробування доводять до відмови останнього об'єкта, то план [NUr] вироджується у план [NUN]. Згідно з планом [NMT], одночасно випробовують N об'єктів; після кожної відмови об'єкт відновлюють; випробування тривають протягом заданого часу T або до нагромадження наробку T.

Обсяги випробувань (спостережень) - це кількість випробовуваних об'єктів N для плану [NUN]; кількість випробовуваних об'єктів N і кількість відмов r для планів [NUr], [NMr], [NRr]; кількість випробовуваних об'єктів N і тривалість T випробувань для планів [NUT]; [NRT]; [NMT].

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 23

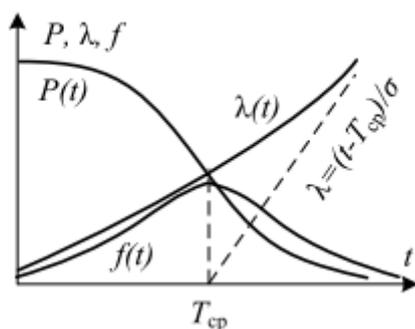
ТЕМА 3. Аналіз, нормування та забезпечення надійності електроустановок

Електроустановку математично можна абстрагувати як невідновлюваний або відновлюваний об'єкт.

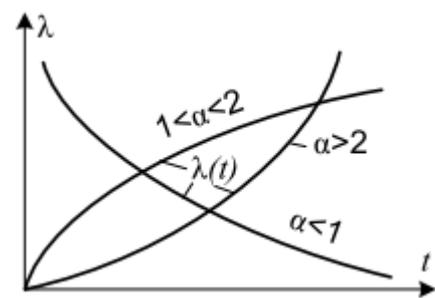
Показники надійності невідновлюваних об'єктів. Для оцінювання надійності невідновлюваних об'єктів використовують імовірнісні характеристики випадкової величини T - часу безвідмовної роботи. Величина T для конкретного об'єкта може набувати значень, більших від заданого часу t з певною імовірністю. Для різних об'єктів ця імовірність різна. Надійніше працює той об'єкт, у якого вона більша. Це означає, що така імовірність може бути мірою надійності.

Моделі надійності на основі законів розподілу часу безвідмовної роботи будуються для установок, для яких відома тільки статистика відмов. Установка розглядається як «чорна скринька», вміст якої з погляду аналізу надійності не становить жодного інтересу. Наявність статистичних даних про відмови дає змогу встановити закон розподілу часу T і визначити його параметри $M(T)$, $O(T)$ тощо, які використовуються для формування моделі.

Експоненційний закон розподілу займає особливе місце в теорії надійності. Він широко застосовується завдяки простоті виразів показників надійності та його відповідності умовам нормальної експлуатації технічних об'єктів. Він справедливий для нестаріючих об'єктів, надійність роботи яких сьогодні не залежить від попередньої тривалості експлуатації.



Зміна в часі показників надійності в разі загального нормального розподілу часу T



Зміна в часі інтенсивності відмов у разі розподілу часу T за законом Вейбулла

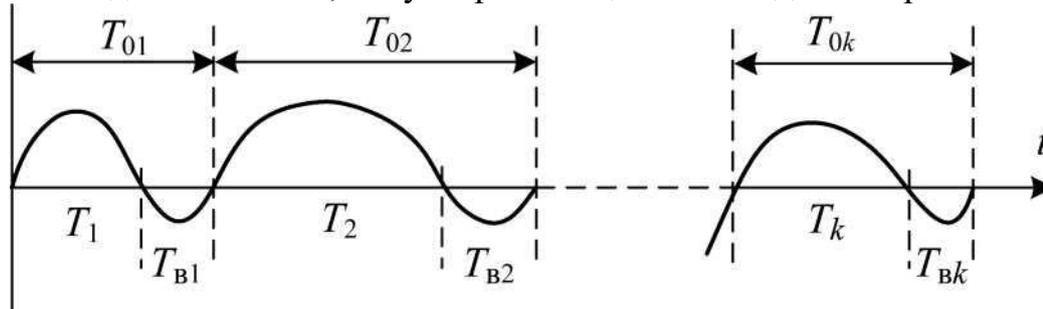
Значна частина електроустановок складається з обмеженої кількості певним способом сполучених між собою однотипних чи різнотипних стандартних елементів заводського виготовлення. Прикладами таких установок можуть бути: гірлянди ізоляторів, батареї конденсаторів, тиристорні

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 24

перетворювачі, пристрої РЗА тощо.

Якщо в результаті заводських випробувань встановлено показники надійності елементів, то надійність роботи установки загалом можна розрахувати, застосувавши основні теореми теорії ймовірностей. При цьому має бути відома структура електроустановки й особливості взаємодії елементів.

У процесі функціонування відновлюваних об'єктів чергуються інтервали роботи T та відновлення T_v , які утворюють цикли випадкової тривалості T_0 .



Процес функціонування відновлюваного об'єкта

Модель надійності відновлюваного об'єкта, яка враховує зміну в часі ймовірностей його станів. Нехай об'єкт складається з n елементів відповідно сполучених між собою. Будь-яка зміна стану (робочий, неробочий) будь-якого елемента призводить до зміни стану об'єкта загалом.

Загальна кількість станів об'єкта дорівнює 2^n . Відмову чи відновлення будь-якого елемента слід розглядати як перехід об'єкта з одного стану в інший. Процес зміни станів є випадковим.

Якщо для кожного моменту часу ймовірність будь-якого стану в майбутньому залежить тільки від стану в певний момент і не залежить від того, яким способом об'єкт (система) прийшов у цей стан, то процес зміни станів називають марковським (за іменем російського математика Маркова, який першим дослідив такі процеси). Марковським процесом зміни станів стає, якщо час безвідмовної роботи і час відновлення кожного елемента системи підпорядковані експоненційному закону розподілу, бо тільки в цьому разі ймовірність відмови (відновлення) не залежить від попередньої тривалості роботи (відновлення). Марковський процес можна описати звичайними диференціальними рівняннями, у яких невідомими функціями є ймовірності станів. Розв'язавши рівняння, тобто визначивши ймовірності станів, можна встановити показники надійності об'єкта.

Стадія проектування та конструювання (розроблення) електроустановок з погляду вирішення проблем забезпечення їх надійності - найвідповідальніша. На цій стадії детально вивчають причини та характер відмов, аналізують

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 25

можливі способи підвищення надійності. У проектно-конструкторській документації обґрунтовують конструктивно - технологічні та схемно-режимні рішення щодо забезпечення надійності. Фактично на стадії проектування закладається загальний рівень надійності створюваних електроустановок.

На стадії проектування капіталовкладення і щорічні експлуатаційні видатки для будь-якої електроустановки оцінюють порівняно легко і точно. Значення збитків від ненадійної роботи електроустановки можна оцінити тільки орієнтовно як деяку усереднену величину, оскільки створювані електроустановки працюватимуть у різних ланках ЕЕС і спричинятимуть у разі відмов різні за величиною збитки.

Фактично рівень надійності електроустановок не оптимізується, а нормується. Для кожної конкретної установки можна задати значення показників надійності, які має бути забезпечено після введення установки в експлуатацію. Проте, враховуючи неперервний розвиток технологій, конструкцій та схем, за основу доцільніше брати не зафіксований, а досягнутий на певний час рівень надійності. Фактичні показники надійності створюваних електроустановок не мають бути гіршими від показників надійності вже працюючих установок.

Нормування надійності від її досягнутого рівня - важливий принцип конструювання та проектування. Досягнуті експлуатаційні показники надійності отримують, обробляючи статистичну інформацію про відмови. Такі показники мають бути достовірними.

Оптимізувати та нормувати можна рівень надійності електроустановки загалом, окремих її частин та елементів відносно всієї сукупності відмов або лише відносно окремих видів відмов.

Щоб забезпечити надійну роботу в умовах, що відрізняються від нормальних, наприклад, для електричних машин нормують:

- допустиме навантаження в умовах несиметрії струмів фаз;
- допустиме відхилення напруги і частоти від номінальних значень;
- допустиме спотворення синусоїдної кривої напруги генераторів змінного струму;
- ударний струм КЗ синхронної машини;
- кратність максимального обертового моменту синхронного двигуна;
- параметри короткотривалих перевантажень струмом;
- гранично допустиму швидкість обертання;
- ступінь іскріння;
- допустимі шуми, вібрацію та індустриальні радіозавади;
- гранично допустимі перевищення температури частин машини;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 26

- електричну міцність ізоляції обмоток;
- опір ізоляції обмоток.

Технічні вимоги до конструкції електричних апаратів також безпосередньо пов'язані з умовами їхньої роботи та функціональним призначенням.

Електротехнічне устаткування ЕС і ПС розробляють з таким розрахунком, щоб елементи його конструкції задовольняли чинним нормам випробувань. Ці норми мають переважно надійнісний характер, оскільки їх недотримання призводить до порушень функціонування електроустановок.

Надійність роботи електроустановок у процесі експлуатації найбільше залежить від їх технічного стану та ефективності системи захисту від зовнішніх та внутрішніх діянь.

Технічний стан електроустановки визначається станом її ізоляції та контактів, ступенем зношення конструктивних елементів і деталей, рівнем розрегулювання рухомих частин тощо. У разі погіршення технічного стану зростає частота відмов електроустановки, знижується її ресурс. З метою запобігання пошкодженням і аваріям технічний стан електроустановок неперервно контролюють.

Погіршення технічного стану електроустановки може бути виявлене під час оглядів (коронування ізоляції чи контактних з'єднань, підвищення вібрації чи шуму, виникнення тріщин чи інших дефектів), під час поточного контролю режимних параметрів (зниження економічності, загальне чи локальне підвищення температури) або в результаті спеціальних вимірювань чи випробувань (погіршення характеристик ізоляції, зношення конструктивних елементів, виникнення дефектів та несправностей).

Профілактичні випробування. В умовах експлуатації періодично контролюють стан ізоляції, щоб своєчасно виявляти зміни в ній і не допускати пошкоджень електроустаткування. Однією з форм такого контролю є профілактичні випробування. Профілактика - ефективний спосіб забезпечення надійності, бо в результаті її проведення з експлуатації усувається непридатне устаткування, спроможне спричинити аварії. Вона дає змогу оцінювати технічний стан устаткування без розбирання та внутрішнього огляду і виявляти, чи потребує воно невідкладного ремонту. За даними випробувань і вимірювань можна також приймати рішення про збільшення міжремонтного періоду.

Проте існують чинники, які знижують ефективність профілактики. До них належать:

- недостатньо суворобґрунтованість термінів проведення випробувань

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 27

внаслідок відсутності чітко налагодженої системи збирання й аналізу даних про несправності електроустановок;

- багато дефектів устаткування взагалі не можна виявити методами і засобами профілактики, які застосовуються в електроенергосистемах;

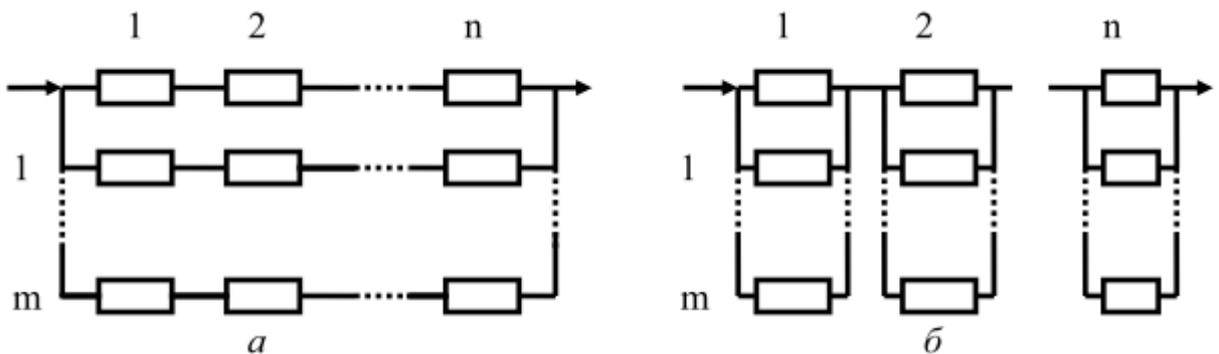
- через недосконалість вимірювань контрольних параметрів об'єкта часто відбраковується придатне для експлуатації устаткування, що спричиняє додаткові експлуатаційні витрати.

Вказані недоліки можна усунути шляхом удосконалення засобів випробувань та вимірювальної апаратури й насамперед на основі організаційних заходів: розроблення оптимальної стратегії профілактики, що ґрунтується на методах теорії надійності.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 28

ТЕМА 4. Визначення показників надійності об'єктів з паралельно-послідовним з'єднанням елементів

На рис. 1 наведено два види резервування групи послідовно з'єднаних невідновлюваних елементів: загальне резервування, в якому резервується об'єкт у цілому та роздільне резервування, в якому резервуються окремі елементи об'єкта чи їх групи.



Приклад резервування групи послідовно з'єднаних невідновлюваних елементів: а - загальне; б - роздільне

Структурне резервування передбачає введення надмірності. При цьому надмірні резервні структурні елементи виконують робочі функції при відмові відповідних основних або протягом усього періоду функціонування об'єкта.

Структурне резервування може бути загальним і поелементним. Розрізняють загальне постійне, поелементне постійне, загальне заміщувальне, поелементне заміщувальне і ковзне (з дробовою кратністю), резервування систем і підсистем (рис. 1).

При постійному резервуванні (рис. 1, а, б,) резервні елементи працюють нарівні з основними, а тому немає потреби у пристроях, що включають в резерв. Такий вид резервування називають *пасивним*.

При заміщувальному резервуванні (рис. 1, в, г) у разі відмови основного елемента вмикається резервний, а тому такий вид резервування називають *активним*.

Ковзне резервування (рис. 1, д) – окремий вид заміщувального – застосовують тоді, коли до складу системи входять однотипні елементи. Тоді група основних елементів може мати один або кілька резервних.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 29

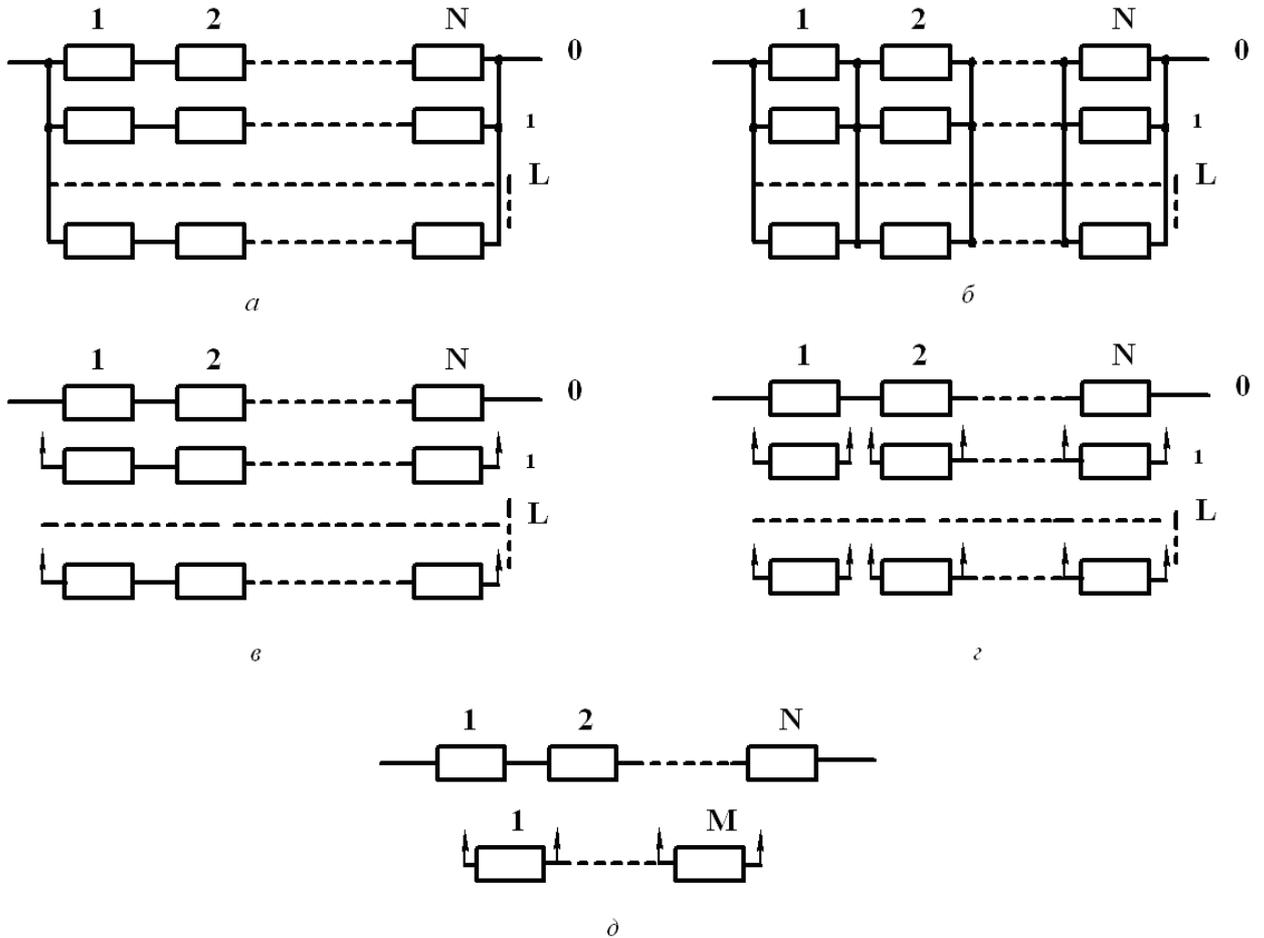


Рис.1. Схема резервування: *а* – загального постійного; *б* – поелементного постійного; *в* – загального заміщувального; *г* – поелементного заміщувального; *д* – ковзного

Залежно від режиму роботи розрізняють такі види резервних елементів:

- **навантажені (теплі)**, коли вони перебувають у полегшених робочих умовах і включаються в робочий режим після відмови працюючого основного елемента;

- **ненавантажені (холодні)**, коли вони не навантажені і включаються в робочий режим після відмови працюючого основного елемента.

У підсистемах АСК ТП застосовуються всі розглянуті схеми резервування. У системах автоматичного керування процесами харчової технології здебільшого застосовують здебільшого поелементне резервування заміщенням і ненавантаженим резервом.

Кратність резервування

Співвідношення між кількістю резервних і основних елементів називають **кратністю резервування**:

$$k = (n - r) / r, \quad (1)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 30

де n – кількість однотипних елементів; r – кількість необхідних для функціонування системи працюючих елементів.

Зменшення k може бути цілим, якщо $r=1$, та дробовим, якщо $r>1$. В останньому випадку, яким би не вийшов дріб, скорочувати його не можна. Якщо, наприклад, $k=4/2$, то це означає, що застосовано резервування з дробовою кратністю, причому для нормальної роботи об'єкта потрібно не менш як два елементи, а резервних – дорівнює чотири. Якщо скоротити цей дріб і записати, що $k = 2$, то це означатиме, що реалізовано резервування з цілою кратністю. Причому резервних елементи – два, а загальна кількість елементів з'єднання – три. Очевидно, що скорочення дробу змінило сутність резервування.

Структурне резервування пов'язане з додатковими витратами на резервні елементи. Вони мають окупатися за рахунок збільшення надійності об'єкта і зниження на його технічне обслуговування.

Найпростіші показники ефективності резервування такі:

$$B_m = T_{p.c}/T; B_{p.c} = P_{p.c}/P; BQ = Q/Q_{p.c},$$

(2)

де B_m – коефіцієнт підвищення середнього напрацювання до відмови резервованої системи $T_{p.c}$ порівняно з напрацюванням нерезервованої T ; B_p , BQ – відповідно коефіцієнти підвищення ймовірності безвідмовної роботи P і зменшення ймовірності відмови Q .

Резервування буде ефективним за умови, що B_m і B_p будуть більшими, а BQ – меншим за одиницю.

Надійність послідовних систем

У техніці більшість становлять послідовні системи. Прикладом такої системи може бути привід будь-якого засобу механізації (рис. 2).



Рис. 2. Приклад системи (послідовна система): 1 – двигун; 2 – муфта; 3 – редуктор; 4 – запобіжна муфта; 5 – i -й елемент системи; 6 – кінцевий (виконавчий) елемент системи

У послідовних системах відмова будь-якого зі складових елементів призводить до відмови всієї системи, а тому ймовірність безвідмовної роботи системи в цьому разі визначається множенням ймовірностей безвідмовної роботи складових елементів:

$$P(t) = P_1(t) \dots P_2(t) P_i(t) \dots P_n(t). \quad (3)$$

Якщо ймовірність безвідмовної роботи всіх елементів є однаковою, то

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 31

$$P(t) = P_i^n(t). \quad (4)$$

Отже, чим більше складових елементів, тим нижчою є надійність такої системи. Наприклад, система з 10 послідовних елементів, імовірність безвідмовної роботи кожного з яких становить 0,9, має загальну ймовірність безвідмовної роботи $P(t) = P_i^n(t) = 0,9^{10} = 0,35$, тобто дуже низьку.

Найчастіше ймовірність безвідмовної роботи елементів досить висока, а тому простіше визначати її через імовірність відмов, використовуючи методи наближених обчислень:

$$P(t) = [1 - F_1(t)][1 - F_2(t)] \dots [1 - F_i(t)] \dots [1 - F_n(t)] \approx 1 - \sum_{i=1}^n F_i(t), \quad (5)$$

оскільки добутком двох малих величин можна знехтувати.

Надійність паралельних систем

Для підвищення надійності складних відповідальних систем, де цього не вдається досягти за рахунок надійності складових елементів, застосовують резервування. Резервування як метод підвищення надійності часто застосовують на практиці, особливо в системах, які гарантують безпеку людей (наприклад, на транспорті, в енергетиці), або в системах, що працюють у безперервному режимі і відмова яких може призвести до відчутних втрат за рахунок якості та кількості вироблених продуктів чи товарів, оброблюваної сировини або за рахунок побічних негативних ефектів. Можна навести й інші показові приклади: використання в літаках 2 – 4 двигунів, кожний з яких здатний самостійно забезпечити політ, якщо інші двигуни не працюють; дво- і багатократне резервування системи гальмування транспортних засобів тощо. Використання запасних вузлів і деталей технічних об'єктів також можна розглядати як засіб резервування. Воно дає змогу зменшити кількість відмов, але для того, щоб визначити якою мірою, потрібно вміти виконувати спеціальні розрахунки. За допомогою таких розрахунків можна не тільки визначити ступінь підвищення надійності, а й обґрунтувати рівень (кратність) резервування.

При постійному резервуванні з навантаженням («гарячим») резервом резервні елементи або ланцюги елементів підключають паралельно до основних (рис. 3). Імовірність відмови всієї системи визначають за теоремою множення ймовірностей:

$$F(t) = F_1(t)F_2(t)\dots F_i(t)\dots F(t)\dots F(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t), \quad (6)$$

де $F_i(t)$ - ймовірність відмови i -го елемента.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 32

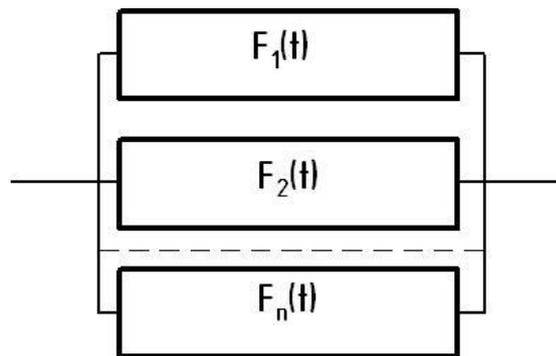


Рис. 3. Система з резервуванням

Тоді ймовірність безвідмовної роботи системи:

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \prod_1^n F_i(t). \quad (7)$$

Якщо елементи системи рівнозначні, то

$$F(t) = F_i^n(t); \quad P(t) = 1 - F_i^n(t) \quad (8)$$

Ці залежності у загальному вигляді характеризують гаряче резервування. Наприклад, якщо при гарячому резервуванні $P_i(t) = 0,9$ і $n = 2$, то $P(t) = 1 - F_i^n(t) = 1 - 0,1^2 = 0,99$, а отже, безвідмовність системи підвищується.

Інші види резервування мають свої особливості, які впливають на розрахунки. При холодному резервуванні, тобто резервуванні заміщенням, резервні елементи вступають у дію тільки після відмови основних. Резервні елементи можуть включатися в дію автоматично або вручну, а ті елементи, що відмовили, відновлюються або замінюються. У цьому разі для основного експоненційного закону розподілу відмов (за високої надійності складових елементів) імовірність відмови системи становить:

$$F(t) \approx \frac{\prod_1^n F_i(t)}{n!} \approx \frac{\prod_1^n \lambda_i t}{n!} = Q(t). \quad (9)$$

Для рівнозначних елементів

$$F(t) \approx \frac{F_i^n(t)}{n!} \approx \frac{(\lambda t)^n}{n!}. \quad (10)$$

Формули (9), і (10) справедливі за умови, що надійність включення резерву гарантується повністю.

Розглянемо надійність системи з резервуванням у період відновлення елемента, що відмовив. Такі періоди характерні й часто трапляються в роботі технологічних ліній, особливо тих, які працюють у безперервному режимі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 33

За інтенсивності відмов основного λ і резервного λ_p елементів та середньої тривалості ремонту \bar{t}_p імовірність безвідмовної роботи системи можна розрахувати так:

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_0}},$$

$$\text{де } T_0 = \frac{1}{\lambda} \left[1 + \frac{1}{(\lambda + \lambda_p) \cdot t_p} \right]. \quad (11)$$

У технологічних лініях за резерв беруть також накопичувачі, які розділяють ці лінії на ділянки. Робота ліній на накопичувачі, або за їхній рахунок, дає змогу за період накопичення, тобто за час використання резерву, ліквідувати відмову на ділянках між накопичувачами. Безвідмовна робота лінії повністю забезпечується, якщо місткості накопичувачів вистачає на період відновлення дієздатності ділянки, де відбулася відмова.

Надійність паралельних систем при «теплому» резервуванні

Прикладом такої системи може бути багатократне резервування, коли кілька елементів не повністю завантажені («тепле» резервування) і включаються в роботу тільки після руйнування деякої кількості робочих елементів.

Наведений нижче розрахунок застосовують для резервування високонадійними елементами з експоненційним розподілом імовірності безвідмовної роботи.

Якщо інтенсивність відмови основного λ і резервного, що працює в полегшеному режимі, λ_p елементів, то ймовірність безвідмовної роботи системи становить:

при однократному резерві

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_p)}{2!} t; \quad (12)$$

при двократному

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_p)(\lambda + 2\lambda_p)}{3!} t; \quad (13)$$

при n -кратному

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_p) \dots (\lambda + n\lambda_p)}{(n+1)!} t. \quad (14)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 34

Надійність комбінованих систем

Комбіновані системи охоплюють ділянки з послідовно і паралельно діючими складовими елементами. Якщо в системі a елементів не дубльовані і b елементів дубльовані (рис. 5), то ймовірність безвідмовної роботи системи визначають за формулою

$$P(t) = P_a(t)P_b(t), \quad (15)$$

де $P_a(t)$, $P_b(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи ділянок відповідно з послідовно і паралельно діючими елементами.

При послідовному з'єднанні елементів

$$P_a(t) = \prod_{i=1}^a P_i(t) . \quad (16)$$

Для повного гарячого резервування

$$P_b(t) = 1 - \prod_{j=1}^b F_j(t) \quad (17)$$

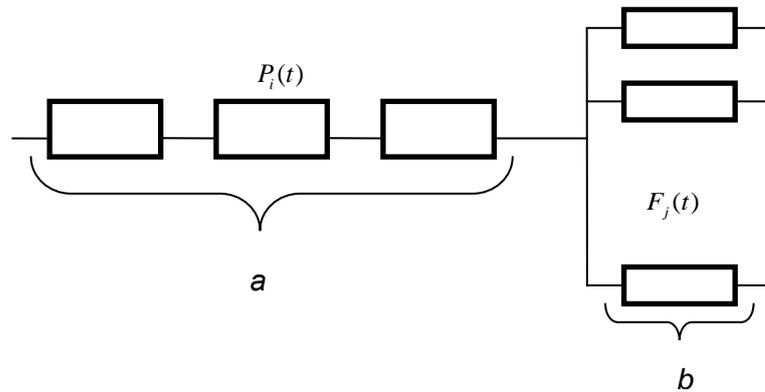


Рис. 5. Комбінована система з послідовним і паралельним з'єднанням елементів

Для інших видів резервування надійність ділянок з паралельно діючими елементами b розраховують методами, викладеними раніше.

Часто застосовують комбіновані системи, які не можуть належати ні до послідовних, ні до паралельних (складні комбіновані системи). Основна система (рис. 6) із елементів A, A_1 здубльована системою з елементів B, B_1 , для яких передбачений елемент C , що резервує елементи A і B .

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 35

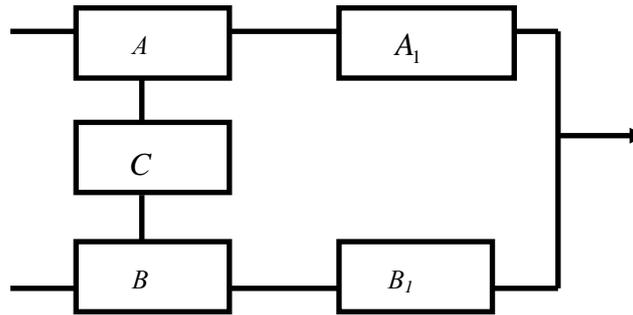


Рис. 6. Складна комбінована система

У розрахунках подібних складних систем використовують теорему Байєса, яку для визначення надійності формулюють так: імовірність відмови системи $F = F(C \text{ дієздатний}) P_C + F(C \text{ недієздатний}) F_C$, де P_C і F_C - імовірності відповідно безвідмовної роботи і відмови резерву C .

Імовірність відмови системи при дієздатному резерві C визначають як добуток імовірностей відмови елементів A_1 і B_1 :

$$F(C \text{ дієздатний}) = F_{A_1} F_{B_1} = (1 - P_{A_1})(1 - P_{B_1}). \quad (18)$$

Імовірність відмови системи при недієздатному резерві C :

$$F(C \text{ недієздатний}) = F_{AA_1} F_{BB_1} = (1 - P_A P_{A_1})(1 - P_B P_{B_1}). \quad (19)$$

Тоді у загальному вигляді ймовірність відмови такої складної системи можна розрахувати за формулою:

$$F = (1 - P_{A_1})(1 - P_{B_1})P_C + (1 - P_A P_{A_1})(1 - P_B P_{B_1})F_C. \quad (20)$$

Цей метод дає змогу обчислювати надійність комбінованих ділянок, які в складних системах можуть повторюватися багатократно.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 36

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2

Аналіз, забезпечення й оптимізація надійності

ТЕМА 5. Аналіз, забезпечення й оптимізація надійності електричних мереж

Аварійні та намірені вимикання окремих елементів ЕМ, випадкові збіги відмов, накладання відмов одних елементів на планові простої інших, аварії, що супроводжуються вимиканням трьох і більше елементів, змінюють схему мережі та її режими і можуть призвести до припинення чи обмеження живлення частини споживачів.

У мережі, схема якої зображена на рис. 1, споживач H_4 тратить живлення в усіх випадках аварійних і планових вимикань лінії W_5 , а також під час відмов і планових простоїв будь-якого з її вимикачів та систем шин, до яких ці вимикачі приєднані. Вимикання лінії W_2 може спричинити обмеження в електропостачанні споживача H_4 , якщо пропускна здатність ліній W_1 , W_4 , W_3 за струмом або рівень напруги на шини H_4 виявляться недостатніми для передачі необхідної споживачеві H_4 потужності.

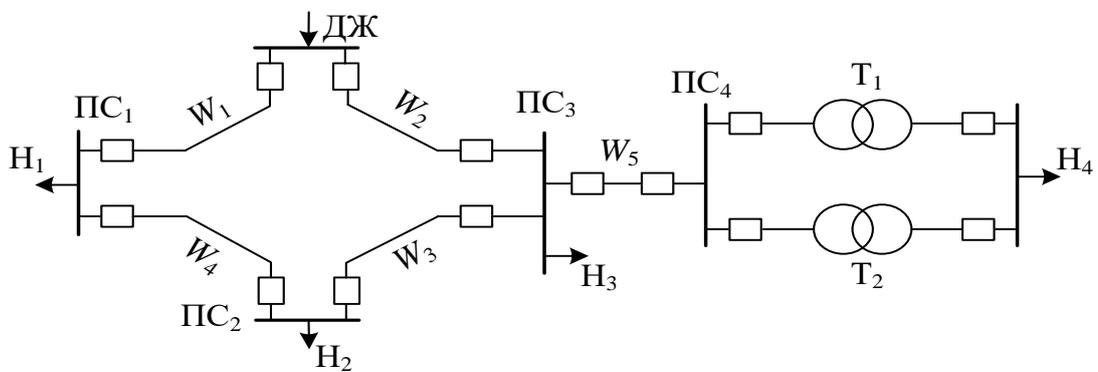


Рис. 1. Принципова схема мережі

Збіги простоїв ліній W_1 та W_2 , лінії W_1 та шин PC_3 , лінії W_2 та шин PC_1 призводять до втрати живлення всіх споживачів. Збіги простоїв інших пар елементів ЕМ спричиняють перерву електропостачання лише частини споживачів:

збіги	W_1W_3	W_1PC_1	W_1PC_2	W_2W_4	T_1T_2	W_2PC_2	W_2W_3	W_2PC_3	W_3W_4
простоїв									
втрата живлення	H_1H_2	H_1	H_1H_2	$H_2H_3H_4$	H_4	$H_2H_3H_4$	H_3H_4	H_3H_4	H_2

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 37

У мережі можуть збігатися простої також трьох і більше елементів.

Якщо виявити всі можливі випадки перерв та обмежень електропостачання споживачів під час простоїв елементів ЕМ, оцінити ймовірність їх виникання, величину недовідпущеної в кожному випадку електроенергії, то можна встановити обсяги недовідпущеної споживачам електроенергії та заподіяні їм збитки за рік чи інший заданий проміжок часу, які є узагальненими показниками надійності мережі.

Надійність електропостачання споживачів і надійність ЕМ, від якої вони живляться, поняття кількісно та якісно нееквівалентні, бо перерви електропостачання споживачів наступають не тільки з вини ЕМ. Тому, розглядаючи надійність роботи конкретної мережі, джерела її живлення слід вважати абсолютно надійними, щоб не деформувати реальні показники надійності досліджуваної мережі за рахунок показників надійності мережі вищого рівня чи ЕЕС.

Для аналізу надійності роботи ЕМ вимагаються докладні відомості про схему мережі та її експлуатаційні режими. Потрібна вичерпна інформація про показники надійності всіх елементів структури мережі та про основні характеристики навантаження стосовно споживання електроенергії та збитків від її недовідпусків. Необхідно також для заданих умов експлуатації мережі чи для її проектного варіанта за принциповою схемою розробити розрахункову схему надійності.

Розрахункова схема надійності ЕМ – це схема, в якій відображено структуру мережі та задіяно подані відповідними показниками елементи мережі, що підлягають врахуванню згідно з поставленими вимогами.

Елементи схеми мережі в розрахунковій схемі надійності задають показниками надійності та планових простоїв. До показників надійності елементів схеми мережі належать:

ω_B - параметр потоку відмов (середня частота відмов), 1/рік;

T_B - середній час вимушеного простою (відновлення), годин;

T - середній час роботи між відмовами

$$T = 8760/\omega_B - T_B \approx 8760/\omega_B \text{ [годин]} \text{ або } T = 1/\omega_B - T_B \approx 1/\omega_B \text{ [років]}; \quad (1)$$

q_B, K_B - імовірність (коефіцієнт) вимушеного простою, відн. од.,

$$q_B = K_B = T_B / (T + T_B) = \omega_B T_B / (\omega_B T + \omega_B T_B) = \omega_B T_B / 8760; \quad (2)$$

K_T - коефіцієнт готовності, відн. од.,

$$K_T = T / (T + T_B) = 1 - K_B. \quad (3)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 38

Показники планових простоїв елементів мережі аналогічні показникам їх надійності:

ω_{Π} - середня частота виводів у плановий ремонт, рік⁻¹;

T_{Π} - середня тривалість планового простою, годин;

q_{Π} , K_{Π} - імовірність (коефіцієнт) планового простою, відн. од.,

$$q_{\Pi} = K_{\Pi} = \omega_{\Pi} T_{\Pi} / 8760; \quad (4)$$

$T_{\text{м.р}}$ - середня тривалість міжремонтного періоду, років,

$$T_{\text{м.р}} = 1 / \omega_{\Pi}. \quad (5)$$

Використовують також сумарні показники простоїв:

q - сумарна імовірність простою, відн. од.,

$$q = q_{\text{в}} + q_{\Pi}; \quad (6)$$

p - імовірність робочого стану, відн. од.,

$$p = 1 - q. \quad (7)$$

Планові ремонти, зменшуючи число аварійних вимикань, підвищують надійність електроустановок, а отже, і надійність мережі. Проте в періоди їх проведення послаблюються структурні зв'язки ланок мережі і надійність схеми знижується. Тому терміни виведення елементів мережі у плановий ремонт вибирають такими, щоб зниження надійності електропостачання, спричинюване вимиканням елемента, було найменшим. Наприклад, капітальний ремонт генераторів проводять у період мінімальних літніх навантажень системи. Повітряні лінії недоцільно виводити в ремонт, коли прогнозується погана погода. У разі відмови елемента мережі заплановане виведення в ремонт резервуючого відкладають. Під час врахування впливу планових простоїв на надійність електропостачання споживачів усі ці обставини беруть до уваги.

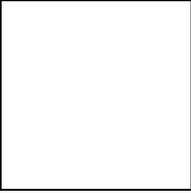
В електроенергосистемах не завжди дотримуються запланованих термінів виведення електроустановок у ремонт або планують ремонти з малою завчасністю, що утруднює їх врахування. Після різких погіршень технічного стану електроустановки виводять у позаплановий ремонт. Їх можуть вимикати також з метою оцінки технічного стану, для ліквідації виявлених під час оглядів несправностей, у разі оперативних перемикачів тощо. Тому загальнішим слід вважати поділ вимикань на аварійні та намірені, а не аварійні та планові. Використовуваний термін «показники планових простоїв» з цієї причини неточний.

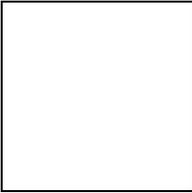
Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 39

Аналіз надійності простих схем ЕМ зручно виконувати методом структурних схем (блок-схем). Цей метод універсальний, враховує всі основні чинники, що визначають надійність схеми мережі, дозволяє вести ручний розрахунок.

У методі структурних схем аналізують надійність електропостачання кожного споживача (вузла навантаження) індивідуально. Тут для кожного споживача розглядають окрему розрахункову схему надійності, де враховують тільки ті елементи мережі, які зв'язують даний споживач з джерелами живлення. Самі джерела вважають абсолютно надійними, потужність їх необмежена, їх зосереджують в одному вузлі. Лінії, трансформатори, вимикачі, шини або їх сукупності заміщають умовними блоками і задають показниками $\omega_v, T_v, \omega_{\Pi}, T_{\Pi}$. Враховують елементи, що формують і вітки, і вузли схеми мережі.

Для споживача H_2 у схемі мережі рис. 2,а розрахункова схема надійності має вигляд, як на рис. 2,б. Одноколові лінії заміщені блоками, номери яких відповідають номерам ліній, і задані показниками $\omega_v, T_v, \omega_{\Pi}, T_{\Pi}$, взятими з табл..

Двоколова лінія W_5 заміщена трьома блоками. Блоки  враховують вимикання одного кола і задаються показниками $\omega'_v, T'_v, \omega'_{\Pi}, T'_{\Pi}$, взятими з табл.

Блок  враховує вимикання двох кіл і задається показниками $\omega''_v, T''_v, \omega''_{\Pi}, T''_{\Pi}$, взятими з табл.. Вузли a, b, c заміщені відповідно пронумерованими блоками. Вони враховують збірні шини розподільних установок та зв'язані з ними комутаційні апарати.

Суть методу полягає у поступовому спрощенні розрахункової схеми шляхом еквівалентування послідовно і паралельно сполучених блоків, як на рис. 3.3,в,г,д,е,є,ж, а також на основі використання інших перетворень, що зводять складну структуру до паралельно-послідовної. Обчислення показників надійності еквівалентних блоків виконують за певними розглянутими нижче правилами. Процес перетворень доводиться до результуючого еквівалентного блока, показники надійності якого $\omega_{vi}, T_{vi}, \omega_{\Pi i}, T_{\Pi i}$ є показниками надійності електропостачання i -го споживача, для якого складалася розрахункова схема.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 40

Прості схеми ЕМ розглядають переважно на стадії проектування розвитку ЕЕС, оскільки тоді аналізується надійність окремих фрагментів мережі. Під час проектування визначають показники надійності ЕМ за річний період часу. Середньорічні збитки під час перерв електропостачання i -го споживача розраховують за формулою

$$\begin{aligned}
 H_i &= H_{0i}W_{ni} = H_{0i}t_{\Sigma i}P_{\max i}T_{\max i}/8760 = \\
 &= H_{0i}(\omega_{vi}T_{vi} + \omega_{pi}T_{pi})P_{\max i}T_{\max i}/8760 = \\
 &= H_{0i}(q_{vi} + q_{pi})P_{\max i}T_{\max i},
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

де H_{0i} - питомі збитки, грн/(кВт·год), під час перерв живлення i -го споживача; W_{ni} - недовідпущена i -му споживачеві протягом року електроенергія; $t_{\Sigma i}$ - сумарний час перерв електропостачання i -го споживача; $P_{\max i}$, $T_{\max i}$ - максимальне навантаження і час його використання; q_{vi} , q_{pi} - імовірності вимушених і планових перерв електропостачання.

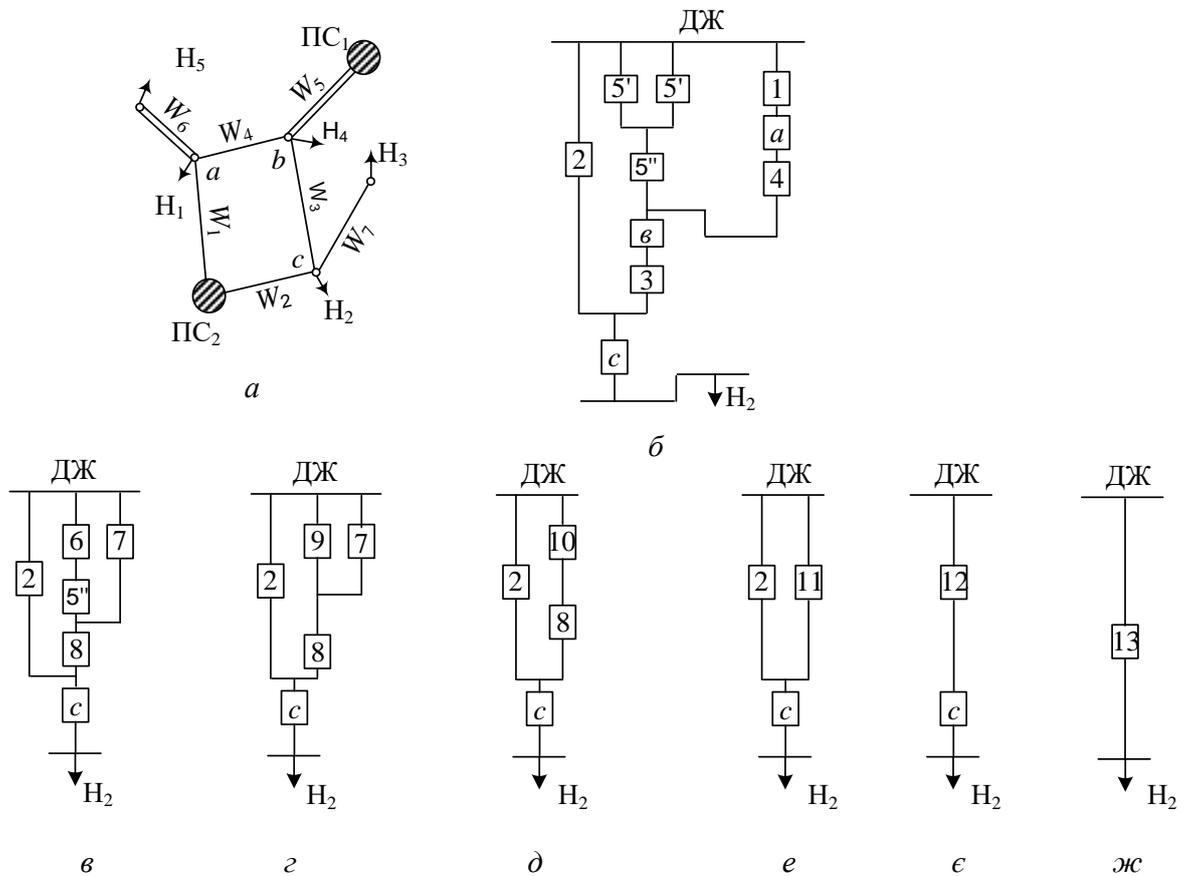


Рис. 2. Складання та етапи перетворення розрахункової схеми надійності

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 41

Показники надійності мережі з n споживачами отримують шляхом підсумовування показників усіх споживачів

$$W_H = \sum_{i=1}^n W_{Hi} = \sum_{i=1}^n (q_{Vi} + q_{Pi}) P_{\max i} T_{\max i}; \quad (9)$$

$$H = \sum_{i=1}^n H_i = \sum_{i=1}^n H_{0i} W_{Hi}.$$

Розглянута методика вимагає деталізації щодо еквівалентування послідовно та паралельно сполучених блоків і зведення складних структур до паралельно-послідовних.

Аналіз структурної надійності складних схем електричних мереж

Для аналізу надійності складних схем ЕМ найчастіше застосовують структурні методи, які дозволяють складні структури звести до послідовно-паралельних чи паралельно-послідовних і встановити показники надійності електропостачання споживачів подібно до того, як вони встановлювалися для електроустановок під час побудови моделей надійності на базі основних теорем теорії ймовірностей за умови, що функції надійності $P_i(t)$ поставлена у відповідність імовірність p_i робочого стану, а функції ненадійності $Q_i(t)$ - імовірність q_i неробочого стану кожного елемента схеми.

Структуру схеми ЕМ можна перетворити, дослідивши її граф. Методи структурного аналізу дозволяють виявити всі шляхи між двома будь-якими вершинами графа. З погляду аналізу надійності ЕМ інтерес являють тільки шляхи між джерелами живлення та споживачем.

Шлях схеми ЕМ - це та мінімальна сукупність її елементів, робочий стан яких забезпечує передачу електроенергії від джерела живлення до споживача.

На рис. 3,б зображені шляхи схеми рис. 3,а, які в сукупності утворюють еквівалентну послідовно-паралельну схему.

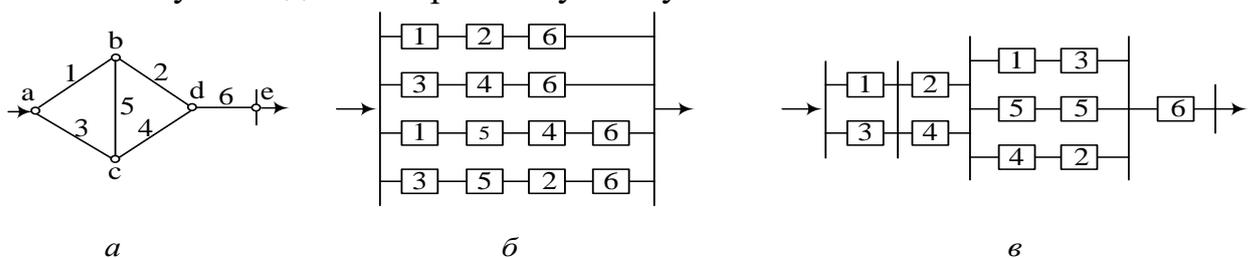


Рис. 3. Схема мережі (а) та її еквівалентні розрахункові схеми надійності (б,в)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 42

Еквівалентну паралельно-послідовну схему можна отримати, виявивши мінімальні перерізи мережі.

Мінімальний переріз схеми ЕМ - це та мінімальна сукупність її елементів, одночасний неробочий стан яких спричинює перерву електропостачання споживача.

На рис. 3,в зображені мінімальні перерізи схеми рис. 3,а. Переріз 1, 5, 2, 6 не мінімальний, бо має зайві елементи. Такі перерізи не розглядаються.

Незважаючи на те, що методи структурного аналізу дозволяють виявляти шляхи та формувати еквівалентну послідовно-паралельну схему, надійність ЕМ розраховують переважно за схемою мінімальних перерізів через її високу інформативність. Ця схема чітко показує вплив на рівень надійності електропостачання споживачів окремих елементів схеми ЕМ та їх поєднань. Схему мінімальних перерізів можна отримати двома різними способами: зі схеми шляхів; безпосередньо зі схеми ЕМ. За першим способом спочатку

формують матрицю шляхів $\overset{\vee}{\text{Ш}}$, підпорядковуючи стовпці елементам послідовно-паралельної схеми, а рядки - її віткам, тобто шляхам. Для схеми рис. 3.9,б ця матриця має такий вигляд

$$\overset{\vee}{\text{Ш}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 1 & 1 & & & & 1 \\ & & 1 & 1 & & 1 \\ 1 & & & 1 & 1 & 1 \\ & 1 & 1 & & 1 & 1 \end{array} \\ \begin{array}{l} \text{ш}_1 \\ \text{ш}_2 \\ \text{ш}_3 \\ \text{ш}_4 \end{array} \end{array}$$

Якщо деякий елемент, наприклад 6, входить в усі шляхи, то він утворює одноелементний переріз, бо відмова цього елемента обриває всі зв'язки споживача з джерелом живлення. Якщо в кожному зі шляхів перебуває хоча б один з двох елементів, наприклад 1 і 3, то вони утворюють двоелементний переріз, бо їх одночасний неробочий стан також призводить до обриву всіх зв'язків споживача з джерелом живлення.

Формалізувати пошук мінімальних перерізів дозволяє операція логічного

додавання. Мінімальні перерізи утворюють ті стовпці матриці $\overset{\vee}{\text{Ш}}$, у результаті логічного додавання яких формується одиничний стовпець. Перед виконанням

операцій логічного додавання стовпців з матриці $\overset{\vee}{\text{Ш}}$ слід усунути всі одиничні стовпці, бо вони утворюють одноелементні перерізи. Двоелементні перерізи можна виявити шляхом логічного додавання всіх стовпців попарно, а триелементні - шляхом логічного додавання всіх стовпців по три і т.д. Поєднання стовпців, які утворили мінімальний переріз в подальших операціях

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 43

додавання брати участі не повинні, бо вони будуть формувати немінімальні перерізи.

Метод прямого обчислення показників структурної надійності схем електричних мереж

Розглянуті структурні аналітичні методи аналізу надійності схем ЕМ передбачають складання та перетворення еквівалентних розрахункових схем надійності. Ці схеми складають і перетворюють для кожного споживача ЕМ окремо. Будь-яка зміна схеми ЕМ (наприклад, під час переходу мережі в режим мінімального навантаження) вимагає нового складання та перетворення еквівалентних розрахункових схем надійності, тобто виконання нових розрахунків. Ці недоліки істотно ускладнюють програмування задач аналізу структурної надійності ЕМ та користування розробленими програмами.

Метод прямого обчислення показників структурної надійності ЕМ не передбачає складання та перетворення будь-яких розрахункових схем. Його розрахунковий процес будується на базі методу простору станів і формується за допомогою матриці, яка відображає повну структуру мережі та фіксує всі можливі зв'язки споживачів з джерелами живлення. Такою матрицею може бути перша матриця інцидентій (матриця сполучень), але з її допомогою важко прослідкувати зв'язки споживачів з джерелами живлення, що ускладнює програмування задачі аналізу надійності. Доцільніше використовувати матрицю, рядки та стовпці якої підпорядковані вузлам схеми мережі. Таку матрицю назвемо матрицею вузлів і позначимо її символом $\overset{\vee}{M}$.

На рис. 4,а зображена схема електричної мережі, в якій позначено джерела живлення (ДЖ₁, ДЖ₂), вузли схеми, від яких живляться споживачі Н_і та вітки, що з'єднують вузли. Вузли пронумеровані числами натурального ряду, а вітки – подвійними числами, які відповідають номерам з'єднаних вузлів. Джерела живлення мають необмежену потужність, абсолютну надійність і тому об'єднані в один нульовий вузол. Вузли мережі враховують системи шин та інші елементи підстанцій, відмови яких спричиняють перерви електропостачання споживачів. Вітки схеми враховують ЛЕП та елементи підстанцій, відмови яких призводять до втрати зв'язків між вузлами.

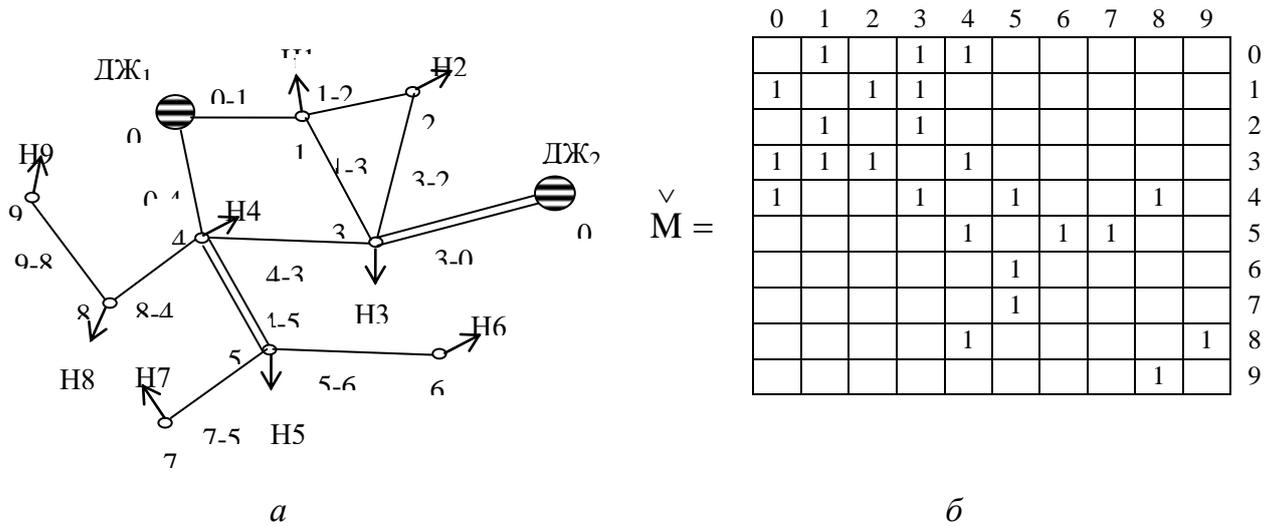


Рис. 4. Схема електричної мережі (а) та її матриця вузлів (б)

Схемі мережі (рис. 4,а) відповідає деяка матриця $\overset{\vee}{M}$ (рис. 4,б), заповнена одиницями, які ставлять на перетині рядка і стовпця та стовпця і рядка в разі наявності між двома відповідними вузлами з'єднувальної вітки. Наприклад, наявність вітки між четвертим і третім вузлами відображена двома одиницями на перетинах четвертого рядка і третього стовпця та третього рядка і четвертого стовпця. За цією матрицею легко прослідковують зв'язки споживачів з джерелами живлення. Наприклад, споживач N_5 , що безпосередньо зв'язаний з п'ятим вузлом, через відповідні вітки (одиниці в рядках і стовпцях) має зв'язок з вузлами 4, 6, 7, один з яких (четвертий) виходить на нульовий вузол, тобто на джерело живлення.

У поточні моменти часу деякі вітки та вузли мережі можуть переходити в неробочий стан і порушувати зв'язки споживачів з джерелами живлення, викликаючи цим перерви електропостачання. Відмову вітки можна зафіксувати

в матриці $\overset{\vee}{M}$ викресленням двох одиниць, які належать з'єднуванню цією віткою вузлам. Відмову вузла можна зафіксувати викресленням пар одиниць усіх віток, які належать вказаному вузлові, оскільки відмова вузла супроводжується втратою його зв'язків з усіма іншими вузлами. При цьому в рядку і стовпці даного вузла зникають всі одиниці, що є ознакою втрати живлення відповідним споживачем. Відмови деяких вузлів можуть мати складніші наслідки. Наприклад, відмова вузла 4 супроводжується зниканням одиниць у четвертому рядку та стовпці, тобто знеструмленням четвертого споживача, а також посередньою втратою зв'язків з джерелами живлення споживачами N_5, N_6, N_7, N_8, N_9 . Можливі поєднання відмов віток, вузлів та віток і вузлів. Наприклад, якщо одночасно відмовлять вітки 1-2 і 3-2, то всі

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 45

одиниці зникнуть у другому рядку та стовпці, тобто втратить живлення споживач H_2 .

Матриця M відіграє в розробленому методі ключову роль. Вона дає змогу автоматизувати перебір станів електричної мережі та формалізувати за рахунок такої автоматизації відомий метод простору станів. Такі можливості цієї матриці зумовлені тим, що з її допомогою для кожного стану електричної мережі (відмова будь-яких вузлів, віток та їх комбінацій) за допомогою реалізованого на комп'ютері алгоритму контролюють зв'язки споживачів з джерелами живлення.

Наближений аналіз функціональної надійності електричних мереж

Функціональна надійність ЕМ пов'язана з повною сукупністю їх аварійних режимів, після виникання яких втрачається або цілеспрямовано вимикається навантаження. Аварійні режими ЕМ, їх формування, шляхи виходу з них зображені на рис. 5.

Аналіз функціональної надійності ЕМ - завдання надзвичайно складне. Врахувати всі чинники, які визначають надійність особливо у початковій стадії формування аварій, неможливо. Результативним розрахункам піддаються тільки стаціонарні післяаварійні режими, які формуються після виникання одиничних відмов або випадкових збігів відмов елементів мережі.



Рис. 5. Аварійні режими електричних мереж та їх ліквідація

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 46

Наближений аналіз функціональної надійності простих схем ЕМ. Спрощені розрахунки функціональної надійності простих схем ЕМ можна виконувати в рамках розглянутого вище методу структурних схем. При цьому спочатку визначають недовідпуски електроенергії та збитки від перерв електропостачання споживачів, а далі ці ж величини обчислюють для випадків обмежень живлення у післяаварійних режимах і визначають їх сумарні значення.

Обмеження живлення споживачів різне в різних режимах навантаження мережі. Найбільші недовідпуски потужності спостерігаються під час аварійних вимикань у години максимальних навантажень, а найменші - в години мінімальних навантажень.

Добові зміни режиму навантаження можна не враховувати з таких причин. На надійність мереж найбільше впливають ЛЕП, бо вони визначають структуру мережі, а їх коефіцієнти вимушених K_B та планових $K_{П}$ простоїв на порядок вищі від аналогічних коефіцієнтів підстанційного устаткування. Відмови ЛЕП, що пов'язані з діяльністю людини, намірені вимикання ЛЕП, які ослаблюють схему мережі, припадають на денні години доби. Якщо аварійне вимикання наступило вночі, то післяаварійний ремонт виконують протягом дня. У більшості випадків пошкодження на ЛЕП ліквідують за один світловий день. Усі ці факти разом взяті підтверджують, що під час аналізу функціональної надійності ЕМ до уваги слід брати режим денного (максимального чи усередненого) навантаження та враховувати його зміну тільки в розрізі року.

Забезпечення надійності електричних мереж на стадії проектування

Під час проектування ЕМ розробляють їх схеми, здатні забезпечувати надійні структурні зв'язки споживачів з джерелами живлення, а також формують ефективні системи керування режимами.

Загальний підхід до створення надійних схем ЕМ. Схеми ЕМ розробляють на перспективу 5-10 років. При цьому визначають місця розташування ПС, утворюють надійні зв'язки між ними та джерелами живлення ЕЕС, вибирають схеми головних з'єднань ПС.

Щоб забезпечити необхідний рівень надійності електропостачання споживачів, вибирають схеми з достатньою кількістю зв'язків між ними та джерелами живлення, тобто з достатньою кількістю каналів передачі електроенергії. Мінімальна кількість зв'язків регламентується категоріями

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 47

споживачів мережі. Так споживачі першої категорії повинні отримувати живлення не менше ніж від двох незалежних джерел.

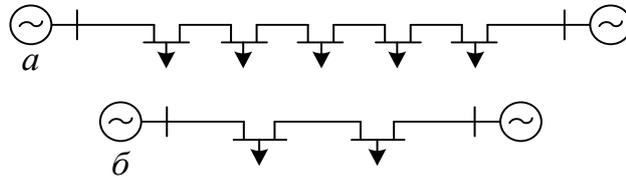


Рис. 6. Однотипні схеми з різним ступенем надійності

Надійність схеми ЕМ визначається не тільки кількістю каналів передачі електроенергії, а й віддаленістю джерел живлення від споживачів. Наприклад, надійність схеми рис. 6,а приблизно у два рази нижча порівняно з надійністю схеми рис. 6,б, хоча кількість каналів передачі енергії в них однакова. Розробка схеми ЕМ з необхідним рівнем надійності передбачає всебічний аналіз умов електропостачання споживачів для мінімально необхідної кількості зв'язків з наступним посиленням структури мережі.

Надійність схеми рис. 1, наприклад, відносно низька. У ній часто виникають перерви електропостачання споживачів, а під час вимикання лінії W_2 та примикаючих до неї елементів ПС може спостерігатися глибоке обмеження живлення споживачів H_3 і H_4 . Надійність цієї схеми можна істотно підвищити, якщо між джерелом живлення та ПС₂ спорудити ЛЕП W_6 (рис. 7).

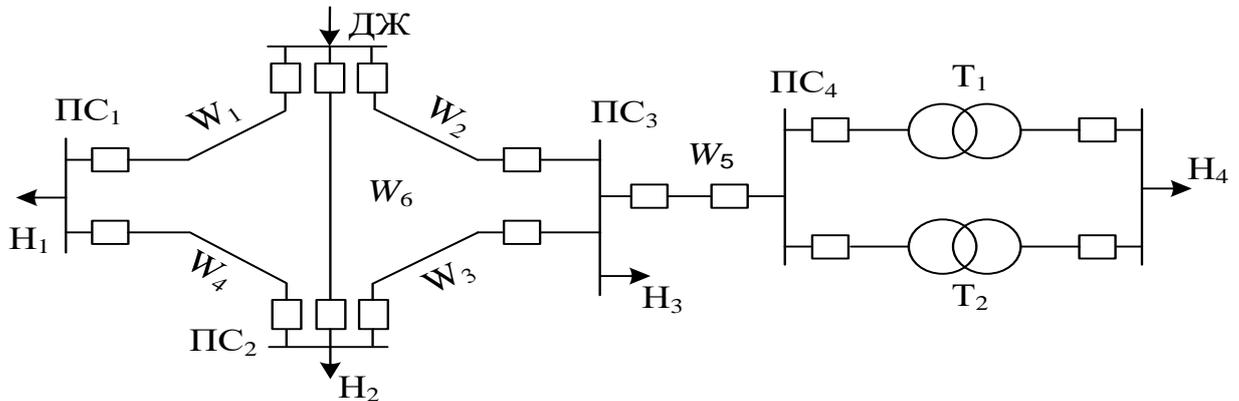


Рис. 7. Варіант посилення схеми мережі

У новій схемі жоден зі споживачів не буде обмежуватися у живленні за відмови будь-якого елемента мережі. Втрата електропостачання всіма споживачами настає лише в разі відмови джерела живлення або трьох елементів мережі, що малоймовірно. Істотно поліпшуються умови електропостачання кожного споживача. Якщо у вихідній схемі (рис. 1)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 48

споживач H_1 , наприклад, втрачає живлення, коли збігаються відмови W_1W_4 , W_1PC_2 , W_1W_3 , W_1PC_3 , W_1W_2 , то в новій схемі (рис. 7) він втрачає живлення лише, коли збігаються відмови W_1W_4 , W_1PC_2 . Споживач H_2 у новій схемі живлення практично не втрачає. Мало змінилися умови електропостачання тільки споживача H_4 . Якщо він відповідальний, то доцільно дублювати лінію W_5 .

Забезпечення надійності електричних мереж в умовах експлуатації

Надійна робота функціонуючих ЕМ забезпечується раціональним керуванням режимами та ефективними організаційно-технічними заходами з технічної експлуатації.

Забезпечення надійності роботи ЕМ під час керування режимами. У ході керування режимами робота щодо запобігання порушень електропостачання споживачів починається на етапі планування режимів. Найважливішим питанням цього етапу з погляду забезпечення надійності ЕМ є розробка нормальних і ремонтних оперативних схем. Ці схеми повинні забезпечувати:

- достатню кількість зв'язків між споживачами та джерелами живлення;
- відповідність струмів КЗ допустимим для устаткування ПС значенням;
- можливість локалізації аварій з найменшими за обсягом вимиканнями споживачів.

Нормальна оперативна схема для максимального режиму навантажень містить практично всі елементи мережі за винятком резервних. У мінімальному режимі навантажень, з метою нормалізації рівнів напруг або зниження втрат електроенергії в ЕМ частина ЛЕП та устаткування ПС може виводитися з роботи. Послаблення структури мережі при цьому не повинно призводити до зниження надійності електропостачання споживачів. Вимикання будь-якого з елементів мережі повинно обґрунтовуватися.

Особливу увагу звертають на забезпечення надійності під час розробки ремонтних схем. У практиці експлуатації відомі випадки відмов ЛЕП та устаткування ПС у ремонтних режимах мережі, що супроводжувалися значними недовідпусками електроенергії. Спостерігалися також повні знеструмлення ПС. Тому згідно з планами капітальних ремонтів і капітального будівництва на початку кожного календарного року основні служби ПЕМ розглядають передбачувані ремонтні схеми та розробляють організаційно-технічні заходи щодо їх посилення.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 49

Під час розробки ремонтної схеми обов'язково аналізують аварійні режими, які можуть в ній виникати внаслідок ослаблення структури мережі. Аналіз прогнозних аварійних режимів оформляється документально у вигляді конкретних оперативних заходів, які повинен вжити диспетчер у разі виникнення аварії, щоб ліквідувати її оптимальним способом. Враховуючи ту обставину, що аналізуються найбільш імовірні режими, розробка таких документів надзвичайно важлива для оперативної роботи диспетчера.

Питання забезпечення надійності ЕМ розглядають і на часовому рівні оперативного керування. Під час оперативного керування нормальними режимами ЕМ необхідно неперервно підтримувати параметри режиму в області їх допустимих значень. Струми в елементах мережі не повинні перевищувати допустимих значень з умов термічної стійкості проводів ЛЕП та устаткування ПС; напруги у вузлах мережі не повинні перевищувати значень, допустимих за умовами роботи ізоляції, і не повинні бути нижчими від значень, допустимих за умовами роботи електроприймачів. Допустимість параметрів режиму ефективно контролюється за допомогою технічних засобів ОІК.

У нормальному режимі до несення навантаження, а також до тимчасових допустимих перевантажень повинні бути готові всі елементи мережі і в тому числі резервні. Тому все резервне устаткування, а також автоматичні пристрої, які уводять його в роботу, потрібно періодично перевіряти й опробувати.

У процесі ліквідації аварій в ЕМ оперативно-диспетчерський персонал повинен запобігати їх розвиткові, усувати небезпеку для життя людей та руйнування устаткування, відновлювати у найкоротші терміни живлення споживачів, створювати в післяаварійних режимах надійні схеми електропостачання. Всі ці дії персоналу безпосередньо пов'язані з забезпеченням надійності роботи ЕМ і є успішними лише в ефективній системі оперативно-диспетчерського управління, яка передбачає:

- чітку організацію роботи персоналу під час ліквідації аварій;
- строгу регламентованість дій персоналу згідно з чинними документами;
- достатню оснащеність диспетчерських пунктів необхідними технічними засобами;
- високу кваліфікацію та виробничу дисципліну всього оперативно-диспетчерського персоналу.

Ліквідація аварій вимагає централізованого керівництва, безумовного виконання розпоряджень керівника підпорядкованим оперативним персоналом, чіткого розподілу функцій між оперативним персоналом усіх

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 50

ступенів управління, негайного інформування керівника про виконані операції та роботу систем автоматики. Такі організаційні вимоги сприяють узгодженості дій персоналу, зменшенню кількості помилкових рішень та дій, пришвидшенню процесу ліквідації аварії і, як наслідок, зменшенню заподіяних збитків.

Дії оперативного персоналу під час ліквідації аварії повинні бути строго регламентовані Правилами техніки безпеки, Правилами технічної експлуатації, Правилами улаштування електроустановок, приписами місцевих інструкцій. Така регламентація разом з набутими знаннями, виробничим досвідом та дисципліною забезпечує безпомилковість дій та високу ефективність роботи персоналу.

Технічна оснащеність диспетчерських пунктів засобами зв'язку та відображення інформації, телемеханіки та обчислювальної техніки повинна бути такого рівня, щоб забезпечити повну інформаційну обізнаність персоналу з ходом ліквідації аварії, поточним станом мережі та проаналізованими ЕОМ можливостями впливу на неї.

Оптимізаційні задачі надійності електричних мереж

Оптимізувати надійність ЕМ - це значить довести її до такого рівня, переходити за який економічно не вигідно. Загальна задача оптимізації надійності ЕМ розпадається на значне число часткових оптимізаційних задач, кожна з яких можна віднести до однієї з наступних груп:

- оптимізація надійності схеми мережі;
- оптимізація системи технічного обслуговування та ремонтів (ТОР);
- оптимізація системи керування режимами.

Оптимізації надійності схеми ЕМ досягають вибором такої структури мережі та забезпеченням таких показників надійності її елементів, коли затрати на ці заходи компенсуються зниженням збитків споживачів з максимальним надлишком, тобто коли економічна ефективність мережі стає найвищою.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 51

ТЕМА 6. Аналіз і забезпечення надійності електростанцій та підстанцій

Відмови генерувальних агрегатів, устаткування розподільних установок (РУ) і власних потреб ЕС заподіюють значні збитки внаслідок порушення графіків видачі потужності в систему, перевитрат палива, затрат на відновлювальні роботи. Відмови силових трансформаторів та устаткування РУ ПС спричиняють перерви чи обмеження електропостачання споживачів. Аварії на ЕС, особливо атомних, мають важкі техніко-економічні, екологічні та соціальні наслідки.

Надійність ЕС і ПС як енергетичних об'єктів визначається сукупною надійністю таких їх основних підсистем: головної схеми електричних з'єднань і, насамперед, її устаткування; схеми живлення власних потреб та основного устаткування системи власних потреб; схеми РУ та її устаткування і шин.

ЕС повинні забезпечити надійне покриття заданих графіків навантаження, чого досягають не лише надійною роботою самої станції, а й високим ступенем надійності схеми видачі потужності. Основна функція цієї схеми - передавання необхідної потужності від ЕС до опорних вузлів ЕЕС у різних експлуатаційних режимах (нормальних, ремонтних, післяаварійних).

Схема видачі потужності ЕС є складовою системою мережі, і тому надійність її роботи можна всебічно проаналізувати, розглядаючи надійність роботи ЕЕС загалом. Відокремлено від ЕЕС надійність схеми видачі потужності можна оцінити лише приблизно, як надійність роботи сукупності ЛЕП, що відходять від ЕС.

Надійність покриття електростанцією заданого графіка навантаження

Надійність покриття електростанцією заданого графіка навантаження доцільно оцінювати для того, щоб характеризувати роботу ЕС як енергетичного об'єкта і як елемента ЕЕС.

Основний показник надійності покриття графіка - це абсолютний R_d або відносний (відносно максимуму навантаження станції) R_d/P_{max} дефіцит потужності ЕС усереднений на проміжку часу тривалості графіка. Для ЕС він показує реальність виконання плану виробництва електроенергії, а для ЕЕС - виявляє ймовірних порушників балансу потужності системи. Станції з високим значенням відносного дефіциту потужності підвищують імовірність виникання та розвитку системних аварій. Мінімальним ризик буде, якщо для всіх потужних станцій ЕЕС показник R_d/P_{max} є приблизно однаковим. Цю обставину слід враховувати під час розроблення графіків навантажень ЕС на етапі планування режимів.

Для визначення показників надійності покриття електростанцією графіка навантаження необхідно мати дані про надійність роботи силового

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 52

устаткування (котлів, турбін, генераторів, трансформаторів), устаткування РУ і власних потреб, ЛЕП схеми видачі потужності, а також відомості про головну схему електричних з'єднань ЕС і схему власних потреб.

Рівень експлуатаційної надійності генерувальних агрегатів ЕС відображає існуюча статистика їх пошкоджуваності. У табл. 1 наведено показники надійності та планових ремонтів енергоблоків з паротурбінними установками (котлоагрегат, турбіна, турбогенератор). Блочні трансформатори до складу блока не входять. У дужках з метою порівняння окремо наведено дані лише для турбогенераторів блоків.

Таблиця 1

Показники надійності та планових ремонтів енергоблоків з паротурбінними установками

Устаткування	$P_{\text{НОМ}}$ МВт	Z'_n агрегаторік ⁻¹	T_B годин	n агрегаторік ⁻¹	T'_n годин
Енергоблок (турбогенератор)	150–165	5,68 (0,55)	48,8 (91)	19	1559
	180–210	8,67 (0,87)	45 (58)	16	1139
	250–300	8,26 (0,59)	45 (83)	15	1007
	500	21,36 (4,48)	70 (136)	24	911
	800	12,08 (0,89)	74 (179)	16	1086

Статистичні показники, наведені у табл. 1, зафіксовані в реальних умовах роботи енергоблоків: статистичний параметр потоку відмов Z_B ; середній час відновлення T_B ; питома кількість зупинок блока n ; середній за рік час планових простоїв T'_n . До кількості зупинок блока n вводять усі свідомі (планові) й аварійні (непланові) зупинки. Середній час планових простоїв T'_n - це сумарний за рік час перебування блока у плановому ремонті, у резерві, на випробуваннях.

Показники Z'_B і n фіксують у періоди роботи агрегату, тобто протягом часу, названого тривалістю агрегатороку

$$T_{\text{а.р}} = 8760 - T'_n - Z'_n T_B. \quad (1)$$

Розрахункові показники надійності та планових простоїв, які використовують для аналізу рівня надійності ЕС та ЕЕС, зводять до календарної тривалості року й обчислюють за формулами

$$Z_B = Z'_n 8760 / T_{\text{а.р}}; Z_n = (n - Z'_n) 8760 / T_{\text{а.р}}; T_n = T'_n / (n - Z'_n) \quad (2)$$

де Z_B - параметр потоку відмов блока, рік⁻¹; Z_n - частота планових простоїв, рік⁻¹; T_n - середня тривалість одного планового простою, годин.

Надійність блоків 500 і 800 МВт значно нижча від інших. Серед ймовірних причин зниженої надійності можна назвати: роботу з високими параметрами

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 53

теплової та електричної енергії; низькі запаси електричної та механічної міцності; конструктивну складність забезпечувальних систем. Крім цього, експлуатаційні показники надійності блоків 500 і 800 МВт дещо завищені, оскільки статистичний матеріал збирався у початковий період експлуатації цих блоків, коли ще не всі конструктивні недоліки було виявлено та усунено.

Для агрегатів ГЕС коефіцієнт вимушеного простою K_v дорівнює приблизно 0,005, тобто їх надійність на порядок вища порівняно з блоками КЕС. Для агрегатів ТЕС з поперечними зв'язками по парі цей показник дорівнює приблизно 0,02.

Відносний дефіцит потужності ЕС розраховують для періоду часу, визначеного графіком навантаження. Це може бути доба, рік або проміжні періоди часу. Під час оперативного керування режимами ЕЕС оцінювати відносний дефіцит потужності можна для годинних інтервалів.

Методика оцінки надійності покриття електростанцією заданого графіка навантаження повинна враховувати також вплив схеми видачі потужності. Цю схему проектують так, щоб забезпечити видачу від ЕС всієї потужності під час роботи всіх ЛЕП, що відходять від станції, а також під час планових чи аварійних вимикань однієї з них. У разі одночасного вимикання двох ЛЕП допускається обмеження у видачі потужності до такого рівня, коли не обов'язково зупиняти окремі енергоблоки. Вимикання трьох ліній малоімовірне і не враховується.

В умовах експлуатації норми проектування можуть бути порушені, тому під час оцінювання впливу схем видачі потужності на надійність покриття станцією графіка навантаження слід врахувати вимикання окремих ліній та випадки попарного їх вимикання.

Нехай під час вимикання однієї або двох ліній внаслідок збігу їх відмов чи накладання відмови однієї лінії на плановий ремонт іншої пропускна здатність схеми видачі потужності знижується і в межах μ -го ступеня графіка навантаження в результаті цього виникає дефіцит потужності величиною kP_v . Такої ж величини дефіцит може виникнути і через відмови енергоблоків. Тому ймовірність для кожного μ -го ступеня графіка навантаження визначають з урахуванням цих двох впливів

$$P_{\Sigma}^{kP_0} = C_n^m p^m q^{n-m} (1 - \sum_{v=1}^W q_{v,ев}) + C_n^n p^n q^0 \sum_{v=1}^W q_{v,ев} \quad (3)$$

де $q_{v,ев}$ - імовірність вимушеного простою v -ї лінії або еквівалентна ймовірність вимушеного простою двох ЛЕП для v -го випадку поєднання (v -ї пари) ліній; W - загальна кількість ліній або можливих пар ЛЕП.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 54

Аналіз надійності схем розподільних установок електростанцій та підстанцій

Надійність схеми РУ визначається частотою та середньою тривалістю вимикань приєднаних до РУ елементів станції та мережі (енергоблоків, генераторів, трансформаторів, ліній) і поділів РУ на електрично не зв'язані частини внаслідок відмов вимикачів.

Визначально впливають на надійність РУ раптові відмови вимикачів. Фактично під час аналізу надійності РУ враховують відмови типу КЗ. За таких відмов автоматично вимикаються суміжні вимикачі і різко змінюється схема РУ.

Коефіцієнт, що характеризує частку раптових відмов від загальної кількості відмов вимикачів, дорівнює приблизно 0,6. Поняття «вимикач» охоплює все устаткування, що належить комірці РУ: сам вимикач, роз'єднувачі, ділянки збірних шин, захисну та вимірну апаратуру тощо.

Вихідними даними для розрахунків надійності РУ є: схема РУ, показники надійності та планових простоїв комірок вимикачів Z_v , T_v , Z_n , T_n , а також час T_0 , необхідний для виявлення пошкодженого вимикача, і час T проведення операції вимикання чи вмикання роз'єднувача. Для ЕС і ПС з обслуговувальним персоналом $T_0 = 0.1 \pm 0.3$ год ; $T_r = 0,1$ год.

Розглядають нормальний (усі вимикачі РУ увімкнені) та планові ремонтні режими. Кількість ремонтних режимів визначається кількістю n вимикачів. Імовірність ремонтного режиму дорівнює ймовірності планового простою вимикача q_n , тобто $Z_n T_n / 8760$. Імовірність нормального режиму розраховують за формулою

$$q_0 = 1 - n \cdot q_n \quad (4)$$

Для оцінювання надійності РУ почергово розглядають відмови вимикачів у нормальному та ремонтних режимах, виявляючи їхні наслідки, тобто встановлюючи, які приєднання вимикаються і на які електрично не зв'язані частини поділяються РУ. При цьому встановлюють частоту і тривалість вимикань приєднань та поділів РУ. Групуючи випадки вимикань конкретних приєднань, обчислюють середнє значення частоти і тривалості порушень їх роботи.

Параметр потоку (частота) Z_{ij} вимикань комутованих у РУ приєднань, а також частота поділів РУ на електрично не зв'язані частини у разі відмови i -го вимикача у нормальному чи j -му ремонтному режимі обчислюється за формулою

$$Z_{ij} = Z_i (q_0 \vee q_{nj}), \quad (5)$$

де Z_i - параметр потоку (частота) раптових відмов i -го вимикача; \vee - знак диз'юнкції (логічного додавання); q_{nj} - імовірність j -го ремонтного режиму.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 55

Середня тривалість T_{ij} вимикань комутованих у РУ приєднань, а також середня тривалість поділів РУ на електрично не зв'язані частини визначається по-різному, залежно від схемних та режимних умов. Якщо приєднання після його вимикання вводиться в роботу шляхом перемикачів в РУ, то T_{ij} визначають з виразу

$$T = T_0 + n T_p, \quad (6)$$

де n - кількість роз'єднувачів, які перемикають для відновлення схеми РУ.

7.2. Аналіз надійності живлення власних потреб електростанцій та підстанцій

На ЕС, особливо на ТЕС і АЕС, технологічний процес пов'язаний з роботою великої кількості механізмів власних потреб, сумарна потужність яких значна, на КЕС вона сягає 6-8 % від встановленої потужності станції, на ТЕЦ - 8-14 %, на АЕС - 5-8 %. Надійність системи власних потреб ЕС має бути високою, бо відмови в ній спричиняють порушення технологічного процесу виробництва електроенергії, зупинку генерувальних агрегатів, а за певних умов - зупинку всієї станції. Слід розрізняти надійність роботи механізмів власних потреб ЕС і надійність їх живлення. До надійності системи живлення механізмів власних потреб ставлять особливо високі вимоги. Система живлення має бути високорезервованою, оснащеною високонадійними комутаційними апаратами та пристроями автоматики. Поєднання високої надійності механізмів власних потреб з високою надійністю електропостачання їх приводів забезпечує безперебійну роботу системи власних потреб і неперервність процесу виробництва електроенергії. Такі самі високі вимоги ставлять і до надійності власних потреб ПС.

Під час проектування систем власних потреб ЕС та ПС і в період експлуатації необхідно оцінювати ступінь їх надійності. Враховуючи багатократне резервування, надійність схеми живлення власних потреб є доволі високою.

Основним методом аналізу надійності, який дає змогу ефективно враховувати всі особливості резервування живлення, є логіко-ймовірнісний метод на основі дерева відмов. За цим методом формулюють умови відмов системи, будують дерево відмов, записують логічну функцію відмови системи й обчислюють показники надійності електропостачання.

Умови \bar{Y} відмов системи електропостачання власних потреб ЕС і ПС можна записати у такому загальному вигляді

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 56

$$\bar{Y} = \bigvee_{k=1}^N M_k; \quad M_k = \bigwedge_{i \in I_k} x_i \bigwedge_{j \in J_k} y_j \bigwedge_{s \in S_k} z_s, \quad (7)$$

де M_k - мінімальна сукупність станів та подій системи, яка призводить до її відмови k -го виду; V - диз'юнкція (об'єднання) N мінімальних сукупностей станів та подій системи; x_i - подія відмови i -го елемента системи; y_j - працездатний j -й стан системи; z_s - подія відмови у спрацюванні s -го засобу керування (пристрою РЗА, комутаційного апарата); I_k - множина відмов, здатних спричинити k -ту відмову системи; J_k - множина станів системи, в яких може виникати відмова системи k -го виду; S_k - множина подій спрацювання та відмов у спрацюванні засобів керування, в результаті яких може виникати відмова системи k -го виду; \wedge - знак кон'юнкції (збігу) ряду подій і станів.

Умови \bar{Y} та події і стани x_i, y_j, z_s формулюють на основі аналізу процесу функціонування конкретної системи електропостачання під час виникнення різних станів (режимів) системи та відмов її елементів і засобів керування. Враховують всі події та стани, які окремо або в поєднанні між собою спричиняють кінцеву подію - відмову системи.

Принципи аналізу надійності систем блискавкозахисту розподільних установок

Електроустаткування РУ ЕС і ПС захищають від прямих ударів блискавки та від хвиль перенапруг грозового походження, що набігають з ЛЕП. Система блискавкозахисту ЕС і ПС розробляється під час їх проектування і може бути предметом аналізу та модернізації в умовах експлуатації цих енергооб'єктів.

Захист від прямих ударів блискавки. Прямий удар блискавки у струмопровідні елементи РУ може спричинити перекриття зовнішньої або пробиття внутрішньої ізоляції апаратів на корпус, перекриття гірлянд ізоляторів на портали. Захист від прямих ударів виконують блискавковідводами, які приймають на себе розряди блискавки та пропускають її на контур заземлення РУ.

Кожен блискавковідвід має зону захисту. Для одиничного стрижневого блискавковідводу вона утворюється простором, обмеженим поверхнею обертання у вигляді шатра. Устаткування заввишки k має розташовуватися на віддалі, не більшій за r_x від осі блискавковідводу заввишки k . Зв'язок між величинами r_x, h_x, h задається емпіричною формулою

$$\bar{Y} = \bigvee_{k=1}^N M_k; \quad M_k = \bigwedge_{i \in I_k} x_i \bigwedge_{j \in J_k} y_j \bigwedge_{s \in S_k} z_s, \quad (8)$$

де коефіцієнт $K^{\wedge} = 1,0$ для $h < 30$ м і $K = 5,5 \sqrt{h}$ для $h = 30 \dots 100$ м.

Висоту, кількість та місця встановлення блискавковідводів вибирають такими, щоб зони захисту охоплювали всі струмопровідні елементи РУ.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 57

В окремих випадках блискавка проривається через зони захисту блискавок - ковідводів і вражає устаткування РУ. Досвід експлуатації та експерименти на моделях показали, що ймовірність прориву мала і становить приблизно 10^{-3} . Для кількості ударів у блискавковідводи однієї ПС 0,05...0,3 на рік, річна кількість проривів дорівнює 0,5...3,0 10^{-4} , тобто один прорив припадає на 3300...20000 років. Тому з небезпекою проривів не рахуються і фактичну частоту проривів блискавки повз блискавковідводи не розраховують.

Для РУ з великими значеннями опору γ контура заземлення небезпеку становлять навіть удари в блискавковідводи в разі невеликих значень амплітуди I та крутизни a хвилі струму блискавки.

На блискавковідводі під час кожного розряду блискавки формується потенціал, який цілком або частково переноситься на заземлені корпуси біля розташованих апаратів і може спричинити зворотне перекриття або пробиття ізоляції між корпусом та струмопровідними частинами. Можливі зворотні перекриття гірлянд ізоляторів на порталах, де встановлено блискавковідводи.

Імовірність зворотного перекриття розраховують за формулою як для удару блискавки в опору повітряної ЛЕП. Розміщення межі області небезпечних параметрів I , а залежить від значення опору контуру заземлення ПС та імпульсної міцності зовнішньої та внутрішньої ізоляції електричних апаратів РУ. У більшості випадків імовірність зворотного перекриття мала і становить приблизно 10^{-2} , що на порядок вище від імовірності прориву. Зворотні перекриття на ПС з нормованим опором контуру заземлення виникають рідко (1 раз на 500 років), що дає змогу також не зважати і на ці удари блискавки. Проте в разі великого питомого опору ґрунту важко добитися малого опору заземлення, і нехтувати зворотними перекриттями в цьому випадку неприпустимо. Це стосується насамперед ПС напругою 35 кВ, які займають малу територію. Такі ПС треба захищати від прямих ударів блискавки блискавковідводами з окремими заземлювачами, електрично не зв'язаними з контуром заземлення ПС.

Забезпечення надійності електричної частини електростанцій та знижувальних підстанцій

Надійність роботи ЕС і ПС забезпечують на стадіях їх проектування, спорудження та експлуатації. На стадії проектування важливе значення має розроблення надійних головних схем електричних з'єднань, схем видачі потужності та живлення власних потреб. Під час спорудження ЕС та ПС повинна бути забезпечена висока якість усіх будівельно-монтажних робіт. На стадії експлуатації однаковою мірою важливі раціональне керування режимами та досконалість системи ТОР.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 58

Забезпечення надійності головних схем електричних з'єднань електричних станцій і підстанцій. Головні схеми електричних з'єднань мають проектуватися так, щоб забезпечити високу надійність функціонування ЕС (ПС) у нормальних, ремонтних та післяаварійних експлуатаційних режимах. У нормальних режимах головна схема має забезпечувати виконання станцією (підстанцією) всіх покладених на неї функцій, а в ремонтних та післяаварійних режимах схема має забезпечувати збереження:

- необхідної кількості електричних зв'язків для видачі електроенергії від ЕС до ЕЕС та від ПС до споживачів;
- усіх транзитів потужності на шинах вищої та середньої напруги ПС.

Необхідного рівня надійності головних схем електричних з'єднань ЕС (ПС) на стадії проектування досягають, вибираючи відповідну структуру самої схеми; типів, параметрів та кількості силового устаткування; схем РУ вищої, середньої та нижчої напруги; засобів системної та технологічної автоматики.

Значно впливає на надійність головних схем рівень надійності силового устаткування. Генератори ЕС, трансформатори й автотрансформатори ЕС та ПС необхідно конструювати так, щоб забезпечувати безаварійність роботи в нормальних умовах, під час перевантажень, під час гроз, у пускових та спеціальних режимах тощо.

Експлуатація також володіє певними можливостями для підвищення надійності роботи силового електроустаткування. Насамперед в умовах експлуатації необхідно дотримуватися всіх норм і приписів системи ТОР та постійно вдосконалювати цю систему, а також неухильно дотримуватися режимних вимог.

Під час планових ремонтів силових агрегатів ліквідують виявлені під час оглядів і випробувань дефекти та несправності, щоб вони не розвинулися в пошкодження, замінюють зношені деталі для відновлення ресурсу, модернізують конструктивно недосконалі та малонадійні вузли і системи. Підвищення ефективності ТОР досягають впровадженням передових технологій ремонтних робіт та сучасних систем діагностики.

Діагностування технічного стану надзвичайно важливе для генерувальних агрегатів і силових трансформаторів. Неперервне чи навіть періодичне (під час режимних і планових зупинок та вимикань) діагностичне спостереження за характером зміни стану основних вузлів та елементів агрегату дає змогу запобігати пошкодженням і аваріям. Діагностування сприяє виробленню рекомендацій для проведення ремонтів за технічним станом, які забезпечують істотно вищу надійність роботи силового устаткування ЕС і ПС порівняно з періодичними ремонтами в системі ППР.

Режимні вимоги до силового електроустаткування доволі жорсткі. Для трансформаторів і автотрансформаторів не можна перевищувати допустимих норм систематичних навантажень і аварійних перевантажень. Для генераторів

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 59

ЕС нормовано режими перевантажень за струмом статора та ротора, пускові та спеціальні режими, до яких належать: режим недозбудження, режим синхронного компенсатора, асинхронний режим та режим несиметричного навантаження. Для енергоблоків важливо не перевищувати нормованої кількості пусків та зупинок. Порушувати режимні вимоги недопустимо, оскільки їх кінцевим наслідком є передчасні відмови та зниження ресурсу устаткування.

Забезпечення надійності розподільних установок електричних станцій і підстанцій.

Надійність РУ визначається надійністю їх схем, надійністю електроустаткування і насамперед комутаційної апаратури, надійністю контактних з'єднань та ізоляції, надійністю грозозахисту. Надійність РУ має бути високою. Така вимога зумовлена важкими наслідками пошкоджень у них, особливо на системах шин, які часто призводять до важких системних аварій.

Схеми РУ вибирають на стадії проектування ЕС і ПС. Досвід експлуатації, техніко-економічні показники, розрахунки ступеня надійності дали змогу розробити нормативні вимоги щодо використання конкретних схем РУ залежно від номінальної напруги, кількості приєднань, типу ЕС та ПС. Такі нормативні вимоги даються в Нормам технологічного проектування та відповідній довідковій літературі, наприклад [24]. Дотримання цих вимог забезпечує рівень надійності вибраних схем РУ, близький до оптимального. Лише в особливих випадках виникає потреба розраховувати показники надійності та уточнювати загальні нормативні вимоги щодо вибору схем РУ.

На стадії проектування ЕС і ПС вирішують також питання забезпечення блискавкозахисту РУ. Ефективність захисту РУ від прямих ударів блискавки забезпечується правильним вибором висоти, кількості та місць встановлення громовідводів, а також спорудженням контуру заземлення з опором не вищим від нормованого значення. Ефективність захисту РУ від набігаючих з повітряних ЛЕП хвиль грозового походження забезпечується обмеженням імпульсного струму через вентиляльні розрядники (до 5-14 кА залежно від типу розрядника) та віддалей між розрядниками і захищуваним устаткуванням до нормованого значення зон захисту.

Для обмеження струму через вентиляльний розрядник, необхідно запобігти прямим ударам блискавки у проводи ПЛ поблизу РУ або різко зменшити ймовірність таких ударів. Для цього ділянки безтросових ліній завдовжки 1-3 км (підходи до ПС) захищають тросами. Якщо ж лінія захищена тросом по всій довжині, то на підходах до РУ ретельно виконують додаткові вимоги: опір заземлення кожної опори не повинен перевищувати 10 Ом; кут захисту проводів тросом не повинен перевищувати 30°.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 60

Під час спорудження РУ особливу увагу необхідно звертати на монтаж контактних з'єднань. Враховуючи їх велику кількість у межах території кожного РУ, можливі епізодичні порушення окремих з'єднань, що істотно впливає на показники надійності РУ. Тому під час виконання монтажних робіт намагаються забезпечити достатню щільність контакту та механічну міцність кожного з'єднання. Якість монтажних робіт перевіряють під час здавання РУ в експлуатацію, одним з етапів якої є комплексне випробування устаткування під навантаженням протягом 72 годин.

На цьому етапі контролюють температурний режим усіх контактних з'єднань. Контактні з'єднання, температура яких перевищила допустиму, відбраковують і монтують повторно.

В умовах експлуатації надійність РУ забезпечують такими заходами:

- догляд і нагляд за устаткуванням і приміщеннями;
- періодичні огляди устаткування та конструкцій;
- температурний контроль устаткування та контактних з'єднань;
- профілактичні випробовування ізоляції;
- діагностування стану силового устаткування;
- спеціальні випробовування конструктивних елементів;
- планово-попереджувальні та післяаварійні ремонти устаткування та систем шин.

Для РУ важливого значення набуває забезпечення надійності роботи зовнішньої ізоляції, особливо в місцевостях з забрудненою атмосферою. Для цього ізоляцію чистять, миють, покривають гідрофобними пастами і, за потреби, посилюють. Періодичне сухе чи вологе чищення ізоляції (2-3 рази на рік) є основним засобом боротьби з її забрудненням. Ізолятори відкритих РУ напругою 35-750 кВ найефективніше очищуються через обливання переривчастим чи неперервним струменем води під тиском.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 61

ТЕМА 7. Розрахунки показників надійності об'єктів електроенергетичних систем. Основні напрями аналізу надійності електроенергетичних систем та енергооб'єднань

Таблично-логічний метод розрахунку показників надійності головних схем електричних з'єднань електростанцій та підстанцій

Відповідно до таблично-логічного методу розрахунку по чергово розглядають відмови елементів електроустановки, виявляють їх наслідки в нормальному та ремонтному станах. Розрахунок виконують у табличній формі: по вертикалі фіксують ряд елементів, що враховуються (і-й ряд) у процесі визначення надійності, а по горизонталі - ряд розрахункових режимів (/ - й ряд).

До елементів установки належать приєднання (генератори, трансформатори, лінії), вимикачі, збірні шини.

За розрахункові елементи, для яких визначають показники надійності, беруть:

- генерувальні приєднання (генератори або трансформатори енергоблоків та зв'язків);
- лінії, якщо їх аварійне відключення викликає обмеження видачі електроенергії в систему або місцевому споживачу.

Вихідними даними є частота відмов, середній час відновлення, частота та тривалість планових ремонтів елементів електроустановки.

За допомогою таблиці розрахункових зв'язків фіксують наслідки відмов варіативних елементів, а потім визначають частоту та середню тривалість таких розрахункових аварійних ситуацій за рік: аварійних знижень генерувальної потужності та аварійних перерв у електропостачанні споживачів.

Проектування схеми електричних з'єднань має такі етапи: розроблення структурної схеми та обрання електричної схеми РП різних напруг.

Розрахунок показників надійності схем розподільних пристроїв.

Під час вибору електричної схеми РП варіативними елементами є вимикачі та збірні шини. На початковому етапі, коли кількість елементів велика, потрібно скласти таблицю розрахункових зв'язків. Підвищувальні трансформатори та автотрансформатори, а також генератори, залишаються незмінними, тому в усіх варіантах схем РП цих елементів у таблиці розрахункових зв'язків не вводять.

Обирають таку модель вимикача: власні відмови вимикачів враховують сумарною частотою відмов у статичному стані та під час оперативних перемикачів, а відмови під час автоматичних відключень - відносною частотою відмов $a_{в.авт}$. Для спрощення розрахунків вважають:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 62

- усі пошкодження вимикача призводять до втрати обох елементів, які він з'єднує;
- параметр потоку (частоту) відмов вимикачів визначають залежно від їх розміщення у схемі;
- послідовні відмови двох вимикачів не розглядають через малу ймовірність накладання цих двох подій;
- відмови у разі автоматичних відключень вимикачів ураховують лише за пошкоджень на лініях у нормальному стані схеми.

Відмову у разі автоматичних відключень не розглядають через малу ймовірність таких аварійних ситуацій. Винятком є схеми з двома системами збірних шин, з одним вимикачем на приєднання.

У нормальному стані працюють обидві системи шин, а в разі ремонту однієї з них всі приєднання підключають до іншої шини, і тоді відмова будь-якого вимикача під час автоматичного відключення зумовлює знеструмлення всього РП, тобто призводить до дуже тяжких наслідків.

Алгоритм визначення показників надійності розподільних пристроїв для електростанцій.

1. Будують ряд урахованих елементів схеми та визначають параметр потоку (частоту) відмов Z_i для вимикачів, а для ліній - добуток питомої частоти відмов (на 100 км довжини лінії) на довжину. Визначаючи кількість операцій для вимикача, частотою відмов трансформаторів та збірних шин можна нехтувати.

Ураховуваними називають елементи, відмова яких у нормальному або ремонтному стані схеми спричиняє аварійне відключення розрахункових елементів. Самі розрахункові елементи немає потреби заносити у вертикальний ряд, адже їх відмова зазвичай не пов'язана з надійністю схеми РП. Отже, вертикальний ряд містить вимикачі, лінії та збірні шини. Автотрансформатори зв'язку як високонадійні до враховуваних елементів можна не вносити.

2. Будують ряд ремонтних (планових та відновних) станів (горизонтальний ряд таблиці) та розраховують згідно з виразом (1) їх імовірність (відносна тривалість) упродовж року.

$$q_{p.б} = \frac{ZT_v + \mu T_p}{8760}, \quad (1)$$

Для маневрених електростанцій у ряд станів слід уводити, крім ремонтів, ще й режимні відключення елементів. До режимного ряду заносять лише ті елементи, відключення яких для планового ремонту або з режимних міркувань суттєво знижує надійність розрахункових елементів. Так, наприклад, у схемах із комутацією приєднань через один вимикач до режимного ряду заносять вимикачі та збірні шини, у схемах із комутацією приєднань через два вимикача - лише вимикачі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 63

3. Визначають імовірність нормального стану схеми:

$$q_0 = 1 - \sum q_j \quad (2)$$

4. Виконують аналіз відмов елементів за нормального та ремонтного станів схеми. Фіксують у таблиці аварійні ситуації, які призводять до зниження генерувальної потужності: записують у відповідній графі таблиці втрачену генерувальну потужність ΔP_r та середній час відновлення нормальної роботи генератора після аварії T_{ij} .

Заповнюючи таблицю, можна розглядати лише ті аварійні ситуації, які спричиняють недовидачу електроенергії в систему (споживачам), а саме:

- відмови вимикачів розрахункових приєднань за всіх станів схеми;
- відмови враховуваних елементів у таких ремонтних режимах схеми, в яких розрахункові приєднання на тривалий час відключаються від РП;
- стійкі КЗ на повітряних лініях;
- аварії із відключенням двох та більше розрахункових елементів.

Розрахунок показників надійності електростанцій, теплових мереж та енергокомпаній

Відмова (ІВІДМ) - це технологічне порушення, яке полягає у втраті об'єктом спроможності виконувати потрібну функцію, тобто порушення його працездатного стану. Показники надійності відмови розраховують за фактичними даними відповідно до актів розслідування технологічних порушень.

Загальну кількість відмов для електростанцій І теплових мереж визначають підсумовуванням відмов їх енергоустановок або елементів, а для енергокомпаній - відмов електричних станцій І теплових мереж, які входять до їх складу.

Середнє напрацювання на відмову $T_{\text{відм}}^{\text{сер}}$ - це напрацювання устаткування до першої відмови або між відмовами, тобто перебування у робочому стані, яке обчислюють за формулою, год:

$$T_{\text{відм}}^{\text{сер}} = \frac{\sum T_{\text{роб}}}{\sum n_{\text{відм}}}, \quad (3)$$

де $\sum T_{\text{роб}}$ - сумарне напрацювання устаткування або групи устаткування за заданий період в годинах, згідно з ГОСТ 27625 (цей період має бути не менше двох років). У разі визначення середнього напрацювання за квартал або рік, якщо немає відмов, середнє напрацювання не розраховують; $\sum n_{\text{відм}}$ - сумарна кількість відмов устаткування за такий самий період.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 64

Параметр потоку (частоту) відмов Z в одиницях на 1000 год, що залежить від кількості відмов устаткування на 1000 год роботи, визначають за формулою

$$Z = \frac{\sum n_{\text{відм}}}{\sum T_{\text{роб}}} \cdot 10^3, \quad (4)$$

де $\sum n_{\text{відм}}$ - сумарна кількість відмов устаткування за певний період, який розглядають; $\sum T_{\text{роб}}$ - сумарне напрацювання устаткування за такий самий період у годинах.

Логіко-аналітичний метод розрахунку надійності схем електричних з'єднань знижувальних підстанцій

Логіко-аналітичний метод (ЛАМ) використовують для визначення показників надійності схем електричних з'єднань знижувальних підстанцій із застосуванням функцій алгебри логіки (ФАЛ). Головну схему та її елементи подають у вигляді деяких функцій працездатності (ФП) або функцій непрацездатності (ФНП). Функції працездатності використовують для порівняно простих схем підстанцій, функції непрацездатності - для більш складних.

За структурою логіко-аналітичний метод можна умовно поділити на такі етапи розрахунку:

1. Попереднє спрощення початкової схеми електричних з'єднань знижувальної підстанції шляхом еквівалентування однотипних елементів.
2. Перетворення еквівалентної схеми на заступну схему і розрахунок еквівалентних параметрів з використанням ФАЛ.
3. Обчислення кількісних показників надійності для еквівалентної схеми, зокрема функції працездатності Y та ймовірнісних поліномів \mathcal{Y} .
4. Розрахунок числових значень кількісних показників надійності головних схем підстанцій, наприклад, часу напрацювання головної схеми до відмови.

Логіко-аналітичний метод розрахунку надійності з використанням дерева відмов є дедуктивним методом і застосовується тоді, якщо кількість різних видів відмов системи невелика, а відмови системи полягають у погасанні одного або декількох вузлів живлення (зокрема секцій, шин).

Для отримання виразу логічної функції подій погасань вузлів потрібно побудувати дерево відмов, яке графічно відображає логічний зв'язок простих подій і станів з кінцевою подією через проміжні події за допомогою знаків логічного додавання і множення. Дерево відмов будують, починаючи від кінцевої події - погасання певного вузла або групи вузлів. Потім, залежно від того, яке погасання (довготривале чи короткочасне), формулюють і

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 65

Таблиця

перераховують елементарні події, які призводять до цього погасання.

До **тривалих** погашень зазвичай призводять відмови самих вузлів і комутаційних апаратів, а також елементів, між якими і вузлом немає роз'єднувачів або рубильників; до **короткочасних** погашень - відмови комутаційних апаратів живильних ліній та елементів, які можуть бути від'єднані від вузла за допомогою рубильників і роз'єднувачів (за умови, що живлення може бути відновлене за рахунок ручних перемикань у схемі).

Крім елементарних подій відмов, погасання спричиняють також складні події - кон'юнкції елементарних подій і станів, а саме: відмова комутаційного апарата у відключеному елементі, що відмовив, або у включеному резервному, відмова одного елемента під час аварійного ремонту іншого тощо. Тривалість такого погасання визначається схемою і можливістю перемикань.

Оцінки частоти виникнення подій $\lambda(x)$ і середньої тривалості станів $\tau(\bar{x})$ окремих елементів електричних схем наведено в табл. 1.

Складні події або стани погашень, що є кон'юнкцією або диз'юнкцією елементарних подій, позначають цифровим кодом і укладають їх у трикутник. Якщо їх уводять в іншу логічну діаграму (інше дерево), то там уже їх вважають первинними подіями.

Будують дерево відмов зверху донизу через проміжні до елементарних подій і станів доти, доки на всіх рівнях дерева не залишаться тільки елементарні й первинні події (стани), дерево відмов для яких слід побудувати під час розгляду джерел живлення вузлів вищого рівня.

Змінюють устаткування на об'єкті відповідно до складеного графіка проведення попереджувальних ремонтів. Уводячи устаткування в роботу або виводячи його в ремонт чи в резерв, черговий персонал виконує оперативні перемикання за допомогою як вимикачів, так і роз'єднувачів. Усі операції включення робочих кіл на напругу і відключення робочих ланок, що перебувають під напругою, мають виконуватися виключно вимикачами; операції з роз'єднувачами - тільки у знеструмлених колах або в колах зі струмом неробочого ходу трансформаторів і ліній, якщо це допускають чинні нормативні документи.

Для проведення ремонтів відповідну ділянку або елемент відключають, відділяють від робочої частини електроустановки роз'єднувачами і заземлюють. Якщо схемою електричних з'єднань це передбачено, збирають обхідне коло, що дає змогу ремонтувати вимикачі і шини, не перериваючи функціонування ліній, трансформаторів чи генераторів.

Головна схема електричних з'єднань у ремонтних режимах має нижчу надійність з огляду на порушення принципу секціонування збірних шин і зниження ремонтпридатності. Під час ремонту секційного вимикача споживачі двох секцій збираються на одній секції. У разі ремонту лінійного вимикача обхідний вимикач зайнятий у ремонтній схемі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ			Ф-20.10-
	ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»			05.01/141.00.1/Б/
	Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 66

Таблиця 1

Оцінки частоти виникнення подій $\lambda(x)$ і середньої тривалості станів $\tau(\bar{x})$ окремих елементів електричних схем

Елемент схеми електричних з'єднань	$\lambda(x)$, рік ⁻¹	$\tau(x)$, рік
Акумуляторна батарея	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$
Автоматичний вимикач 0,4 кВ	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$
Кабельна лінія	$(5 \pm 2) \cdot 10^{-3}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$
Випрямляючий пристрій 0,4/0,22 кВ	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$	$(0,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$
Секція збірних шин 6 кВ	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$
Дизель-генератор 6 кВ	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$
Генератор	$1 \pm 0,5$	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$
Вимикач 6 кВ	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(1 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$
Тиристорний ключ	$(5 \pm 4) \cdot 10^{-3}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$
Високовольтний двигун	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-3}$
Низьковольтний двигун	$(5 \pm 2) \cdot 10^{-3}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$
Перемикач, рубильник	$(5 \pm 4) \cdot 10^{-5}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$
Тиристорний перетворювач	$(5 \pm 4) \cdot 10^{-2}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$
Автомат постійного струму	$(0,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$
Робочий трансформатор ВП	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 2) \cdot 10^{-3}$
Блочний трансформатор 330 – 750 кВ	$(5 \pm 2) \cdot 10^{-2}$	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$
Резервний трансформатор ВП	$(5 \pm 4) \cdot 10^{-4}$	$(1 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$
Трансформатор 6/0,4 кВ	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-3}$
Струмообмежуючий реактор	$(1 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$	$(6 \pm 3) \cdot 10^{-3}$

У ремонтному режимі КЗ на одному з елементів схеми призводить до відключення більшої ніж у нормальному режимі кількості приєднань аж до повного погасання РП.

Відмови пристроїв релейного захисту виявляються у вигляді хибних спрацювань, якщо не відбувається КЗ, або зайвих спрацювань у зоні дії, а також у вигляді відмов спрацювання під час КЗ у зоні, що захищається.

Перші два види відмови пристроїв релейного захисту виявляють так само, як відмови елементів, тобто як автоматичні відключення. Аналогічно

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 67

виявляють відмови вимикачів у відключенні КЗ на приєднанні. Відмова повітряного вимикача зазвичай супроводжується коротким замиканням, яке має відключатися резервним захистом. Відмова цього захисту призводить до аварії з погашенням великої кількості приєднань аж до повного погашення підстанції. Відмова відключеного вимикача під час включення аналогічна до відмови пристрою АВР, що зазвичай спричиняє погашення секції шин. Відмова пристрою АПВ аналогічна за наслідками до стійких КЗ на лінії. Відмова пристрою резервування вимикача, що відмовив, аналогічна відмові пристрою резервного захисту, для якого елементом, що захищається, є вимикач, що відмовив.

Надійність ЕЕС загалом (як єдиного об'єкта функціонування) визначають їх основні структурні підсистеми (генерувальна частина та системотвірна мережа), а також система керування режимами та система ресурсного забезпечення. Тому єдину задачу аналізу надійності ЕЕС, декомпонують на такі основні напрями:

- аналіз балансової надійності електроенергетичних систем та енергооб'єднань;
- аналіз режимної надійності системотвірної мережі;
- аналіз перехідної надійності ЕЕС;
- аналіз надійності ресурсного забезпечення ЕЕС.

Необхідність такої декомпозиції зумовлена складністю процесів функціонування ЕЕС та енергооб'єднань.

Відмови елементів структурних підсистем спричиняють виникнення дефіцитів потужності в ЕЕС, погіршення умов пересилання потужності від джерел генерування до вузлів навантаження, порушення узгодженої роботи різних частин ЕЕС, виникнення системних аварій. Недосконалість засобів керування режимами зумовлює низьку ефективність ліквідації аварій. Помилкові дії оперативно-диспетчерського персоналу та хибна робота засобів автоматики спричиняють розвиток аварій та їх переходи у важкі форми.

Об'єднання ЕЕС, маючи істотні переваги в економічному плані, відзначаються погіршеними характеристиками надійності порівняно з ізольовано працюючими ЕЕС. В об'єднанні посилюється взаємовплив режимів окремих його частин, поширюються збурення на великі території, ускладнюється характер перехідних процесів, зростає частота ланцюжкових аварій з важкими порушеннями живлення споживачів.

Щоб виконувати аналіз надійності ЕЕС та енергооб'єднань у таких складних умовах їх функціонування, необхідно розробляти еквівалентні спрощені моделі режимів та структури підсистем ЕЕС. Такі еквівалентування, забезпечуючи можливість математичного опису процесів і явищ з позицій теорії надійності, не повинні спотворювати результатів аналізу. Тому їх в

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміна 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 68

межах кожного зазначеного вище напрямку аналізу надійності відповідно обґрунтовують.

Аналіз балансової надійності концентрованих енергосистем

Аналіз балансової надійності ЕЕС в загальному випадку передбачає врахування системи генерування потужності, системотвірної мережі та характеристик навантаження. Якщо система концентрована, тобто пропускна здатність її зв'язків у всіх усталених режимах, враховуючи ремонтні та післяаварійні, не обмежує використання потужності ЕС у будь-якому вузлі споживання для всіх можливих значень навантажень, то під час аналізу балансової надійності енергосистеми враховують тільки її генерувальну частину та навантаження.

Балансову надійність ЕЕС оцінюють рядом показників, до яких належать:

- імовірність p_n непокриття навантаження системи або очікувана в році кількість днів пн непокритого навантаження;
- імовірність p_n стану відмови системи та середній параметр потоку відмов T_c (відмова системи - це подія, за якої виникає дефіцит потужності);
- усереднений за розрахунковий період T дефіцит потужності P_3 та недовідпущена споживачам електроенергія $N_{он}$.

Розрахунки показників балансової надійності виконують аналітичними методами на рівні випадкових подій, аналітичними методами на рівні випадкових процесів або методами статистичного моделювання. Аналітичні методи на рівні випадкових процесів достатньо розроблені та дають змогу визначати всі показники балансової надійності, тому зосередимо основну увагу на них.

Аналіз балансової надійності неконцентрованих електроенергетичних систем та енергооб'єднань

У неконцентрованих ЕЕС та електроенергетичних об'єднаннях пересилання потужності від ЕС до споживачів може обмежуватися через відмови структурних елементів схем видачі потужності ЕС, внутрішньосистемних міжвузлових зв'язків, а також через відмови та недостатню пропускну здатність міжсистемних електропередач. Дефіцити потужності у цих випадках, які виникають, є штучними, але їх наслідки такі самі, як і наслідки дефіцитів потужності, спричинюваних відмовами генерувальних агрегатів.

Особливості аналізу балансової надійності неконцентрованих ЕЕС

У неконцентрованих електроенергосистемах необхідно враховувати відмови генерувальних агрегатів та елементів системотвірної мережі. Відмови цих двох груп елементів структури ЕЕС незалежні й утворюють єдиний випадковий процес відмов.

Такий факт дає змогу сумісно розглядати елементарні стани генерувальної частини ЕЕС та її системотвірної мережі та на їх основі формувати об'єднані стани ЕЕС. Зрозуміло, що елементарні стани системотвірної мережі подають

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 69

значеннями використовуваних в ЕЕС потужностей, які менші від наявних потужностей ЕС на величину обмежень, зумовлених зміною структури мережі після відмов її елементів. Отже, для неконцентрованих електроенергосистем замість моделі системи генерування потужності будують модель використовуваних потужностей. Якщо таку модель побудовано, то показники балансової надійності неконцентрованої електроенергосистеми обчислюють так само, як і концентрованої (

Особливості аналізу перехідної надійності електроенергетичних систем

В ЕЕС виникають різні за характером аварії внаслідок широкого спектра первинних збурень, різноманітності схем та вихідних режимів. Можливі шляхи розвитку та припинення аварійних режимів зображено на рис. 1. Нехай первинні збурення спричинили вимикання елементів схеми ЕЕС. Найімовірніші наслідки вимикань - це втрата зв'язків між окремими споживачами та джерелами живлення, зниження напруги на шинах ПС, перевантаження ЛЕП або зниження пропускної здатності зв'язків, порушення балансу активної потужності та зниження частоти в системі.



Рис. 1. Шляхи розвитку та припинення аварійних режимів ЕЕС

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 70

Кожен з цих негативних наслідків вимикань усувається оперативно-диспетчерським персоналом або засобами автоматики шляхом реалізації вказаних на рис. 9.20 діянь на ЕЕС або шляхом вимикання навантаження.

Складні або важкі первинні збурення спричиняють втрату стійкості та виникнення асинхронного режиму, який ліквідується діяннями на ЕЕС і на споживачів. В особливих випадках можливі аварійні режими з дуже важкими для ЕЕС наслідками (нижня частина схеми рис. 9.20).

Звертає на себе увагу той факт, що ліквідація аварій майже завжди супроводжується вимиканням навантаження, тобто майже завжди порушується функціонування ЕЕС, і споживачам не додається електроенергії. Випадкові вимикання навантаження виникають тільки після втрати зв'язків між споживачами та джерелами живлення.

В усіх інших випадках навантаження вимикається цілеспрямовано оперативно-диспетчерським персоналом або засобами автоматики з метою припинення розвитку аварій. Обсяги недовідпущеної під час ліквідації аварій електроенергії визначають рівень перехідної надійності ЕЕС.

Оперативно-диспетчерський персонал вимикає навантаження, вводячи в дію графіки обмежень та вимикань живлення. До таких графіків належать:

- графіки обмежень споживання електроенергії, які вводяться під час ремонтів, дефіцитів енергоресурсів, тривалих дефіцитів потужності в ЕЕС;
- графіки вимикань живлення (аварійних та екстрених), що вводяться у передаварійних та аварійних ситуаціях;
- графіки місцевого розвантаження в електроенергорайоні, що вводяться під час аварійних виділень району на ізолювану від ЕЕС роботу.

Автоматично навантаження вимикається пристроями різного призначення, найважливішими серед яких є АЧР і спеціальна автоматика вимикання навантаження (САВН). САВН запобігає втраті стійкості. Ефект її роботи полягає у швидкому розвантаженні зв'язків у перші секунди аварійного процесу. Навантаження вимикається чергами в дефіцитній частині ЕЕС. САВН запускається під час виникнення конкретної ситуації, яка визначає початок електромеханічного перехідного процесу. До таких ситуацій належать:

- небезпечне зниження напруги у вузлах навантаження;
- вимикання лінії міжсистемного чи внутрішньосистемного зв'язків;
- накидання потужності на лінії зв'язків чи перерізів.

Аварійні режими ліквідують керівними діяннями на ЕЕС. Як тільки виникли первинні збурення, в роботу вступають засоби РЗА та диспетчер, які відокремлюють від ЕЕС пошкоджені елементи та виконують керівні діяння, щоб припинити розвиток аварійного режиму й обмежити коло його поширення, тобто локалізувати режим у часі та в просторі. Далі під час простих і складних відмов виконується ВРДО - введення режиму в допустиму область, тобто переведення аварійного в допустимий за параметрами післяаварійний

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 71

режим, який підлягає подальшій нормалізації.

Локалізація, ВРДО, нормалізація режиму - це стадії процесу ліквідації аварій, які в різних аварійних режимах проявляються по -різному. Якщо вони супроводжуються диспетчерськими чи автоматичними вимиканнями споживачів, то це відмови ЕЕС. За умови вибору для конкретного процесу ліквідації аварії оптимального складу і доз керівних діянь недовідпуски електроенергії споживачам будуть мінімальними.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 72

ТЕМА 8. Забезпечення надійності електроенергетичних систем та енергооб'єднань на стадії керування розвитком

Стадія керування розвитком надзвичайно важлива для ЕЕС з погляду поліпшення всього комплексу їх техніко-економічних показників. Спорудження нових ЕС, ПС, ЛЕП, реконструкція існуючих, перебудова схем ЕМ дають змогу удосконалити структуру та режими ЕЕС і забезпечити їх ефективніше функціонування.

Що стосується безпосередньо надійності, то на стадії керування розвитком приймають такі рішення щодо структури та режимів системи та розробляють такі технічні заходи, які сприяють зниженню аварійності на електроенергооб'єктах, забезпеченню високих рівнів живучості, стійкоздатності та режимної керованості ЕЕС.

На етапах планування розвитку та проектування має бути сформовано раціональну структуру генерувальної частини та системотвірної мережі ЕЕС, закладено необхідні резерви активної потужності, забезпечено достатню пропускну здатність міжсистемних та важливих внутрішньосистемних зв'язків, доведено до необхідного рівня маневреність генерувальних агрегатів ЕС, підвищено рівень структурного резервування у схемах живильних та розподільних мереж, удосконалено структуру головних схем електричних з'єднань ЕС і ПС.

З розвитком ЕЕС в них зростає кількість надпотужних ЛЕП, агрегатів ЕС, трансформаторів ПС, аварійні пошкодження яких різко збуджують режими ЕЕС, що сприяє подальшому розвитку аварій. Ця обставина змушує розробляти для ЕЕС ефективні системи керування режимами, які здатні не допускати розвитку аварій.

На стадії керування розвитком ЕЕС розробляють ефективні системи керування режимами, що є надзвичайно важливим завданням з погляду забезпечення надійності, оскільки досягти високого рівня надійності за рахунок удосконалення тільки структури та режимів ЕЕС неможливо.

Розвиток потужностей системи генерування електроенергії

Розвиток потужностей систем генерування електроенергії ЕЕС (генерувальних потужностей) є складовою розвитку всього паливно - енергетичного комплексу країни. Його визначають такі основні чинники: прогнозовані рівні та режими електроспоживання, розвиток паливної промисловості, технічний прогрес в електроенергетиці, вимоги щодо забезпечення економічності та надійності функціонування ЕЕС. Керування

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 73

розвитком генерувальних потужностей ЕЕС передбачає розв'язання таких завдань:

- визначення сумарної потреби в джерелах енергії;
- встановлення оптимальної структури генерувальних потужностей;
- вибір місця розташування ЕС та потужностей і черговості їх будівництва (реконструкції);
- вибір одиничної потужності агрегатів та головних схем ЕС;
- визначення добових, тижневих, сезонних та річних режимів роботи ЕС;
- визначення потреб у паливі та його видах.

Роботи щодо розвитку потужностей системи генерування електроенергії виконують у два етапи. На першому етапі, враховуючи принцип самобалансування країни чи регіону, виявляють раціональні співвідношення між окремими типами станцій з урахуванням максимального використання власних енергоресурсів (ядерного й органічного палива, води). На другому етапі обґрунтовують склад, розташування та черговість спорудження (реконструкції) ЕС.

Для підвищення надійності функціонування ЕЕС сумарну потребу в джерелах енергії на перспективу визначають, складаючи баланси потужності так, щоб передбачити повне покриття потреб у потужності та повне забезпечення розрахункових резервів.

Баланс потужності складається для годин річного максимуму навантаження ЕЕС і дає змогу встановити розрахункову величину необхідної встановленої потужності ЕС на заданому етапі розвитку системи. Рівняння балансу активної потужності ЕЕС записується у вигляді

$$\begin{aligned} \sum P_{ЕС} - \sum P_{обм} - \sum P_{конс} - \sum R_{р.р} - \sum R_{о.р} = \\ = P_{н\ max} + \sum P_{ВП} + \sum \Delta P_{ЕМ} \pm \sum P_{мс}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\sum P_{ЕС}$ – сумарна встановлена потужність генерувальних агрегатів електричних станцій ЕЕС; $\sum P_{обм}$ – сумарна потужність схемних та експлуатаційних обмежень; $\sum P_{конс}$ – сумарна номінальна потужність устаткування, виведеного в консервацію; $\sum R_{р.р}$, $\sum R_{о.р}$ – сумарні потужності ремонтного та оперативного резерву; $P_{н\ max}$ – прогнозований суміщений максимум навантаження споживачів ЕЕС; $\sum P_{ВП}$ – потужність власних потреб; $\sum \Delta P_{ЕМ}$ – втрати потужності, в ЕМ; $\sum P_{мс}$ – міжсистемне сальдо (перетоки потужності міжсистемними зв'язками).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 74

На формування структури потужностей системи генерування ЕЕС найбільше впливають енергоресурси, які можна буде використовувати для ЕС у плановому періоді. Необхідно передбачити максимально повне використання місцевих енергоресурсів і врахувати екологічні вимоги. Крім цього, слід врахувати вимоги маневреності, оскільки від її рівня залежить повнота покриття пікової зони графіка навантаження, тобто надійність електропостачання споживачів. За неповного покриття піків навантаження диспетчери інколи змушені обмежувати живлення споживачів.

В умовах, коли можливості спорудження ГЕС різко обмежені, тому для розв'язання проблеми покриття змінної частини графіків навантаження слід використовувати різні способи та заходи, основними з яких є підвищення маневреності устаткування діючих ТЕС на органічному паливі та спорудження спеціалізованих маневрених ЕС.

Підвищення маневреності устаткування діючих ТЕС досягається його модернізацією з метою зниження технічного мінімуму навантаження агрегатів та забезпечення щодобових зупинок на нічні години. Розробляють також нові високоманеврені енергоблоки. Підвищенням маневреності ТЕС підвищують частку АЕС у структурі генерувальних потужностей і знижують витрати органічного палива.

Ефективними спеціалізованими маневреними ЕС є ГАЕС та напівпікові КЕС на твердому паливі. ГТЕС можна використовувати обмежено для покриття гостропікових навантажень і як джерело мобільної резервної потужності. Для зменшення нічної западини графіка навантаження доцільно використовувати споживачі-регулятори. Для поліпшення умов роботи устаткування ЕС як у пікові, так і в нічні години слід ефективніше використовувати наявні технічні переваги взаємообміну потужності між

На вибір місць розташування, потужностей ЕС та черговості їх спорудження впливають такі чинники:

- територіальне розташування площадок, де можливе спорудження ЕС;
- місткість охолоджувального водоймища для ТЕС і АЕС;
- місткість водосховища для ГЕС і ГАЕС;
- потреби регіону в електроенергії;
- характеристики навантаження споживачів регіону;
- віддаленість споруджуваних ЕС від споживачів та існуючих ПС;
- віддаленість ТЕС на твердому паливі від вугільних басейнів;
- структура схеми видачі потужності споруджуваної ЕС;
- особливості режимів та потреби ЕЕС у збільшенні потужності ЕС.

Чинник надійності в цьому разі проявляє себе переважно через схеми видачі потужності ЕС та їх ресурсне забезпечення. Надійність видачі

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 75

потужності залежить від структури та довжини зв'язків між ЕС та ПС ЕЕС, а надійність ресурсного забезпечення - від виду палива та можливостей створення його запасів. Своєчасне задоволення потреб ЕЕС у збільшенні потужності генерування (своєчасне введення ЕС в експлуатацію) також позитивно впливає на надійність їх роботи.

Зі збільшенням одиничної потужності агрегатів ЕС зростає економічність роботи станції. Проте потужніші агрегати за інших однакових умов знижують надійність ЕЕС, збільшуючи під час відмов обсяги аварійного недовідпуску електроенергії та збитків. Аналогічні обставини складаються, наприклад, під час вибору кількості агрегатів, приєднаних до одного трансформатора, тобто під час розроблення головних схем ЕС.

Суворе врахування чинника надійності під час вибору одиничної потужності агрегатів та головних схем ЕС вимагає визначення оптимального аварійного резерву та збитків від недовідпуску електроенергії, а на їх основі - зведених затрат для кожного порівнюваного варіанта. Проте такий підхід, незважаючи на його теоретичну правильність, неточний. Суть у наступному.

Якщо порівнюють варіанти різних блоків на одній ЕС у великій ЕЕС, то різниця в резервах, збитках і зведених затратах дуже мала. Вона у багато разів менша від абсолютних значень порівнюваних величин, що і є причиною неточності розрахунків.

Для споруджуваних ЕС на перспективу має бути визначено режим роботи в розрізі доби, тижня, сезону, року. Для АЕС задають режим роботи у базі графіка навантаження з можливим зниженням потужності у вихідні та святкові дні, а також у літній період. Базовий режим задають також для ТЕЦ, якщо не передбачено встановлення на них пікових водогрійних котлів чи редуційно - охолоджувальних установок. Режим КЕС залежно від встановлюваного устаткування може бути базовим, напівбазовим чи напівпіковим. У пікових та напівпікових режимах працюють лише спеціалізовані високоманеврені ЕС. Для ГЕС залежно від об'єму водосховища планується добове, тижневе, сезонне (річне) чи багаторічне регулювання стоку води, а на його основі - відповідні режими роботи.

З перспективними режимами роботи ЕС у добовому, тижневому, сезонному та річному циклах має бути узгоджено структуру та терміни введення в експлуатацію потужностей генерування. При цьому визначають:

- частку маневрених ЕС та ступінь використання встановленої потужності ГЕС (ГАЕС) у загальному балансі потужності;
- вимоги до режимів роботи ГЕС та до перевірки відповідності маневрених властивостей устаткування прогнозованим режимам;
- вимоги до пропускну здатності системотвірних мереж;
- потреби у паливі та його конкретних видах.

Складаючи тепловий баланс, прогнозують відпуск тепла від ТЕЦ і

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 76

визначають сумарну відпущену від ЕС енергію, за якою, врахувавши наявні гідроресурси, визначають потреби ЕЕС у паливі. На вибір виду палива впливає значна кількість чинників, серед яких: ціна, вартість транспортування, екологічні обмеження, режимні вимоги тощо. Неправильні прогнози потреб у паливі та його видах можуть спричинити несвоєчасні поставки та недовиробіток електроенергії на ЕС.

Чинник надійності присутній в усіх задачах, які розв'язують на стадії керування розвитком потужностей системи генерування електроенергії. У частині з цих задач спеціальні розрахунки надійності не виконують, але під час їх розв'язання до уваги беруть нормативні вимоги чи рекомендації щодо забезпечення надійності. В іншій частині задач або розраховують показники надійності, або реалізують процес оптимізації з урахуванням чинника надійності. Правильно враховуючи вимоги надійності на стадії керування розвитком, можна поступово удосконалювати систему генерування електроенергії діючих ЕЕС.

Визначення величини резерву потужності для енергооб'єднання.

Методика визначення величини резерву активної потужності справедлива для концентрованих ізольовано працюючих ЕЕС (РЕС, ОЕС), які не отримують допомоги від інших ЕЕС у разі порушення балансів потужності. Якщо РЕС чи ОЕС отримують в аварійних умовах допомогу потужністю від інших систем, то величина резерву в них може бути знижена. Це одна з основних переваг електроенергооб'єднань. Зниження резерву є наслідком можливостей взаємного резервування об'єднаних систем і відбувається за рахунок зменшення необхідної величини аварійного резерву потужності для малозмінного навантажувального та практично незмінного ремонтного резерву. Тому надалі говоритимемо про зниження лише оперативного резерву. Особливо істотним відносно зниження оперативного резерву є під час об'єднання ЕЕС невеликої потужності.

Повнота реалізації ефекту зниження резерву потужності під час об'єднання ЕЕС залежить від пропускної здатності міжсистемних зв'язків. Для дуже слабких зв'язків оперативний резерв об'єднання дорівнює сумі необхідних резервів ізольовано працюючих систем. За необмеженої пропускної здатності зв'язків резерв об'єднання розраховується як для концентрованих ізольовано працюючих ЕЕС. Максимально можливе зниження резерву - це різниця між сумою резервів ЕЕС у разі їх ізольованої роботи та резервом за умови їх повного об'єднання.

Підвищення живучості енергооб'єднань засобами протиаварійної автоматики

Системи автоматичного протиаварійного вимикання (АПАК) є ефективним засобом відвернення та припинення розвитку аварій, а отже, ефективним засобом забезпечення живучості ЕЕС та енергооб'єднань. На стадії

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 77

керування розвитком ЕЕС велику увагу приділяють розробленню принципів реалізації системи АПАК, вибору конкретних видів ПАА, впровадженню удосконалених засобів на сучасній елементній базі.

Для конкретної ЕЕС система АПАК може бути реалізована в різних варіантах, що відрізняються видами використовуваної автоматики, характером чи дозами керівних діянь на режими та схему ЕЕС.

Керівні діяння засобів АПАК на режими та схеми ЕЕС залежать від характеру порушень у системі. Найширший спектр керівних діянь реалізується засобами ПАА під час порушень балансів потужності в ЕЕС.

У разі виникнення дефіцитів активної потужності засобами ПАА можуть реалізуватися такі керівні діяння:

- мобілізація обертового резерву;
- форсування потужності парових турбін;
- автоматичний пуск резервних гідрогенераторів;
- пуск газотурбінних установок;
- переведення ГАЕС у режим генерування потужності;
- вимикання навантаження пристроями АЧР і САВН;
- форсування режиму передач і вставок постійного струму.

У разі виникнення надлишків активної потужності кількість можливих керівних діянь на режим і схему ЕЕС також достатньо велика. До них належать:

- імпульсне розвантаження турбін;
- обмеження потужності турбін;
- вимикання гідрогенераторів;
- переведення ГАЕС у насосний режим;
- вимикання газотурбінних агрегатів;
- скидання потужності енергоблоків ТЕС до нижньої межі регульовального діапазону;
- вимикання турбогенераторів з переведенням на живлення власних потреб.

Конкретні засоби ПАА реалізують окремі з названих керівних діянь або їх різні поєднання залежно від характеру аварійних режимів у цій ЕЕС, технічної пристосованості агрегатів ЕС до реалізації діянь, характеристик маневреності та мобільності устаткування ЕС, особливостей структури ЕМ тощо.

На стадії керування розвитком аналізують різні варіанти реалізації АПАК. Основна вимога, яка ставиться до них - це ефективність функціонування. Ефективними слід вважати варіанти, які забезпечують результативне відвернення та припинення розвитку аварій та мінімум вимикань споживачів. Впроваджувати необхідно оптимальний варіант. Оптимізується система АПАК за критерієм максимуму ефективності та передбачає знаходження екстремуму деякого функціоналу, який сукупно з іншими чинниками враховує показники

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 78

надійності енергооб'єднання.

Підвищення надійності енергооб'єднань посиленням їх режимної керованості

В енергооб'єднаннях підвищення економічності досягається переважно за рахунок зменшення різних резервів та запасів, інтенсивнішого використання устаткування. Економічно вигідно встановлювати високо економічні енергоблоки 1000 МВт і більше на АЕС, 500 і 800 МВт на КЕС, будувати надпотужні електропередачі 750 кВ, знижувати резерви потужності в електроенергооб'єднаннях, посилюючи взаємообмін потужностей між електроенергосистемами. Проте такий спосіб забезпечення економічності на певному етапі розвитку об'єднання починає суперечити вимогам режимної керованості та надійності.

За таких умов системам керування стає важко протидіяти виходу ЕЕС з нормального режиму під час стаціонарних збурень та виконувати ефективно повернення ЕЕС до нормального режиму від аварійних режимів, що виникли внаслідок різноманітних нестационарних збурень.

Режимну керованість ЕЕС можна трактувати як її властивість за допомогою засобів керування надійно підтримувати нормальні режими в їх повному спектрі, сприяти локалізації аварійних режимів, їх швидкому переведенню у безпечні післяаварійні режими та подальшій нормалізації. Формально режимна керованість ЕЕС - це їх здатність за допомогою засобів керування утримувати свої параметри x в області допустимих значень.

Режимна керованість ЕЕС має бути такою, щоб вихід з нормального режиму в разі стаціонарних збурень, а також ВРДО в разі нестационарних збурень супроводжувалися мінімальними обсягами вимикань навантаження, тобто щоб забезпечувалася достатня надійність роботи електроенергооб'єднання.

Необхідний рівень режимної керованості закладають ще на стадії планування та проектування розвитку ЕЕС, коли встановлюють структуру генерувальної потужності, пропускну здатність ланок системотвірної мережі, величину та мобільність оперативного резерву потужності, розробляють ефективні регульовальні установки та системи керування режимами.

На сучасному ж етапі рівень режимної керованості ОЕС багатьох держав бувшого СРСР, включаючи ОЕС України, недостатній.

Недостатня також пропускну здатність міжсистемних зв'язків ОЕС зазначених країн. Малі значення коефіцієнтів жорсткості міжсистемних зв'язків зумовлюють низький рівень режимної керованості ОЕС, бо не дають змоги після втрати генерувальних агрегатів підтримувати баланси потужності в енергооб'єднаннях без вимкнень навантаження. На режимну керованість енергооб'єднань впливає також пропускну здатність схем видачі потужності від ЕС та внутрішніх зв'язків, паралельних до потужних магістральних ліній

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 79

електропередачі. Ці ланки системотвірної мережі визначально впливають на області допустимих значень режимних параметрів у ремонтних та післяаварійних режимах.

Підвищення рівня режимної керованості ЕЕС за рахунок зміни структури генерувальних потужностей та підвищення пропускної здатності ланок системотвірної мережі вимагає значних коштів. Тому більшу увагу потрібно приділяти маловитратним заходам.

В енергооб'єднаннях слід забезпечувати мобільний і достатній за величиною оперативний резерв потужності, здатний швидко компенсувати дефіцити потужності та звузити траєкторії небалансів. Необхідно впроваджувати регульовані ДРП та інші ефективні регульовальні установки зі збільшеними діапазонами, підвищеною швидкістю зміни та зменшеною дискретністю регульованих параметрів. Потрібно впроваджувати вдосконалені системи керування.

Підвищити рівень режимної керованості ЕЕС можна також впровадженням керованого навантаження. Споживачі, які регулюванням змінності роботи за рахунок складування продукції можуть працювати з обмеженим електроспоживанням у години максимуму, є по суті керованим навантаженням, тобто елементами електроенергосистеми. Вони вирівнюють графік навантаження та створюють кращі умови для керування режимами. Створення керованого навантаження рівнозначне збільшенню резервів потужності ЕЕС, якого досягають за рахунок промислових підприємств.

Узагальнюючи все зазначене, можна сформулювати рекомендації для формування заходів, спрямованих на посилення режимної керованості енергооб'єднань, а тим самим і на підвищення надійності їхньої роботи.

У підсистемі генерування електроенергії можна рекомендувати такі заходи:

- підвищення маневреності генерувального устаткування (збільшення частки ГЕС, ГАЕС, ГТЕС, напівбазових блоків, впровадження накопичувачів електроенергії);
- підвищення мобільності резервів потужності та збільшення частки ввімкненого резерву;
- створення систем автоматичного керування режимами генерування потужності.

У підсистемі передавання електроенергії:

- збільшення пропускної здатності та гнучкості системо твірної мережі;
- збільшення кількості та потужності регульованих ДРП;
- підвищення гнучкості міжсистемних комутаційних пунктів;
- ширше впровадження пристроїв регулювання напруги та перетоків потужності;
- вдосконалення систем керування електроенергії.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 80

У підсистемі приймання електроенергії:

- реалізація принципів керованого навантаження на окремих споживачах електроенергосистем;
- впровадження спеціальних систем керування навантаженням і споживанням електроенергії.

Нормативи надійності в задачах розвитку електроенергетичних систем

На стадії керування розвитком ЕЕС поширене розв'язання оптимізаційних задач надійності. Розв'язання оптимізаційних задач допомагає формувати оптимальну структуру генерувальних потужностей та системотвірних мереж, встановлювати оптимальні резерви активної потужності та розподіляти їх між вузлами системи, виявляти оптимальну пропускну здатність міжсистемних та внутрішньосистемних міжвузлових зв'язків тощо. Підходи до розв'язання таких задач проілюстровано в попередніх параграфах. Проте розв'язання оптимізаційних задач важке і не завжди ефективно та точне внаслідок складності структури системи та процесів її функціонування, низької точності вхідної інформації, суб'єктивності оцінок проєктувальників. Такі обставини змушують використовувати нормативи надійності.

Нормативний підхід на стадії керування розвитком ЕЕС доволі ефективний. Норми встановлюють експертним способом, враховуючи досвід експлуатації ЕЕС, тобто мають під собою обґрунтовану основу. Дотримання встановлених норм гарантує достатній рівень надійності електропостачання споживачів. Поступове вдосконалення норм сприяє наближенню надійності роботи ЕЕС до оптимального рівня.

На етапі проєктування розвитку ЕЕС нормативами надійності охоплюють:

- структуру схеми (схема ЕЕС та її підсистем, пропускну здатність зв'язків);
- засоби забезпечення надійності (величина та структура резервів, характеристики системи керування режимами);
- елементи (електроустановки) системи (показники їх надійності);
- умови живлення споживачів (схеми електропостачання, показники надійності живлення).

Розрізняють два способи нормування надійності:

- пряме нормування значень показників надійності;
- опосередковане нормування надійності у вигляді нормативних вимог до ЕЕС та її підсистем.

Обидва способи нормування мають одну мету - забезпечити рівень надійності електропостачання споживачів, близький до оптимального. Більше використовується опосередковане нормування, яке забезпечує простоту проєктних розрахунків з достатньою точністю.

На стадії керування розвитком ЕЕС враховують нормативні вимоги, що

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 81

зафіксовані у Нормах технологічного проектування енергетичних систем та електричних мереж 35 кВ і вище. Цим документом нормуються резерви активної потужності в ЕЕС, пропускна здатність міжсистемних зв'язків, запаси статичної та динамічної стійкості паралельної роботи частин ЕЕС, умови електропостачання вузлів навантаження ЕЕС, вимоги до схем видачі потужності ЕС тощо. Нормативні вимоги до резервів активної потужності:

- резерв для поточного ремонту - від 4,0 до 5,0 %;
- аварійний резерв - від 4,0 до 5,0 %;
- оперативний резерв - 10 %;
- сумарний розрахунковий резерв - 15 %.

Якщо величину резерву (аварійного) встановлюють на основі оптимізаційних розрахунків, то при цьому згідно [8] слід використовувати такі значення показників надійності (коефіцієнта вимушеного простою) основного устаткування ЕС:

- ГЕС (ГАЕС) - 0,005;
- ТЕС з поперечними зв'язками та ГТЕС - 0,02;
- блоки КЕС потужністю 150-200 МВт - 0,045;
250-300 МВт - 0,055;
800 МВт - 0,07;
- блоки АЕС потужністю 440 МВт - 0,055;
1000 МВт - 0,075.

Нормується мінімальне значення пропускної здатності та максимальне значення балансового перетоку потужності в перерізі між об'єднаними частинами ЕЕС у відсотках від максимуму навантаження меншої з частин.

Під час проектування схем ЕМ враховують нормативні вимоги до електропостачання вузлів навантаження ЕЕС. Рівень розрахункової надійності електропостачання вузла повинен бути не нижчим за 0,996. Необхідно враховувати умови живлення вузлів навантаження ЕЕС під час накладання аварійного вимикання одного елемента мережі на плановий ремонт іншого.

У процесі реалізації ремонтної схеми мережі тимчасово допускається неповне резервування окремих вузлів, дефіцит потужності яких у ремонтному режимі становить не більше 25 % максимуму навантаження вузла і не перевищує 400 МВт для вузла, що живиться від мережі 750 кВ; 250 МВт - 500 кВ; 150 МВт - 330 кВ і 50 МВт - 220 кВ за умови збереження електропостачання відповідальних споживачів.

Схеми ЕМ 35-750 кВ повинні забезпечувати живлення всіх ПС без обмеження навантаження з дотриманням нормативних показників якості електроенергії після вимкнення будь-якої лінії чи трансформатора (критерій $n-1$). Для задоволення вимог критерію ($n-1$) у кожному регіоні електричну мережу доцільно розвивати з резервною структурою, за якої від кожного вузла відходить декілька віток. Така мережа забезпечує надійне електропостачання

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 82

великих вузлів навантаження та міст, а також надійну видачу потужності від джерел живлення ЕС.

Нормативні вимоги до проектування схем ЕМ часто подають в опосередкованій формі у вигляді певних обмежень. Ці обмеження охоплюють, наприклад, кількість електропередач, що проходять по одній трасі; кількість електропередач та кіл, що живлять ПС; кількість ПС, що приєднуються до одно- та двоколових ЛЕП; схеми таких приєднань тощо.

Нормами технологічного проектування електростанцій встановлено нормативні вимоги до схем видачі потужності ЕС. Найжорсткішими є вимоги до надійності схем видачі потужності АЕС. Схема приєднання АЕС до ЕЕС повинна забезпечувати в нормальних режимах на всіх стадіях її спорудження видачу повної потужності АЕС та збереження стійкості паралельної роботи з системою без діяння засобів ПАА після вимкнення будь-якої підхідної лінії чи трансформатора зв'язку. У ремонтних режимах, а також під час відмов вимикачів, пристроїв релейного захисту тощо допускається забезпечення стійкості роботи АЕС за рахунок діянь ПАА на розвантаження АЕС. Для ТЕС і ГЕС ці вимоги менш жорсткі.

Нормування головних схем електричних з'єднань ЕС і ПС значною мірою рекомендаційне. Норми технологічного проектування рекомендують для ЕС:

- кількість номінальних напруг (генераторна, середня, вища);
- кількість генераторів і трансформаторів у блоці (один чи два генератори на один трансформатор);
- кількість автотрансформаторів зв'язку між шинами середньої та вищої номінальних напруг;
- кількість вимикачів у блоці тощо.

Для ПС 35-750 кВ нормують: кількість та потужність трансформаторів та автотрансформаторів; схеми РУ для вузлових, прохідних і тупикових ПС; схеми РУ залежно від номінальної напруги шин тощо.

Надійну роботу ЕЕС серед інших чинників забезпечують також резервами енергоресурсів. На ТЕС і АЕС створюють запаси палива, на ГЕС - запаси води у водосховищах. Так, для ТЕС, які проектують для роботи на кам'яному вугіллі чи сланцях, слід передбачати спорудження складів для палива об'ємом, що дорівнює, як правило, 30 -ти добовим витратам. При цьому не враховується необхідність створення державних запасів.

У відповідних розділах ПУЕ розглядають основні принципові положення, що визначають підходи до нормування надійності електропостачання споживачів та вузлів навантаження, а також конкретизують вимоги до надійності електропостачання.

Принципове значення має введення до ПУЕ вимоги комплексного підходу до проектування систем зовнішнього та внутрішнього електропостачання споживачів. Ця вимога ПУЕ заклала основи дворівневого принципу

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК24-2025
	Випуск 2	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 83 / 83

нормування надійності систем електропостачання, згідно з яким окремо нормується надійність постачання електроприймачів споживачів енергії та надійність електропостачання вузлів навантаження ЕЕС, від яких живляться споживачі.

За цим положенням ПУЕ встановлено нормативні вимоги до надійності електропостачання вузлів навантаження. Як було зазначено вище, рівень розахункової надійності електропостачання вузла має бути не нижчим за 0,996.

Електроприймачі за ступенем їх відповідальності розділено в ПУЕ на три категорії, і для кожної категорії встановлено умови резервування живлення. Крім того, зі складу приймачів першої категорії ПУЕ виділяють особливу групу електроприймачів, безперебійна робота яких необхідна для безаварійної зупинки виробництва з метою відвернення загрози життю людей, вибухів, пожеж та пошкоджень основного устаткування. Постачання електроприймачів особливої групи повинно виконуватися від трьох незалежних джерел живлення.

У ПУЕ визначено поняття незалежного джерела живлення. Незалежним джерелом живлення електроприймача чи групи електроприймачів вважається таке джерело, на якому зберігається напруга в межах, регламентованих для післяаварійного режиму, у разі її зникнення на всіх інших джерелах живлення цих електроприймачів.

ПУЕ вимагають під час вирішення питань резервування систем електропостачання враховувати, крім робочих, ремонтні, аварійні та післяаварійні режими. При цьому припускають, що можливі порушення постачання електроприймачів через накладання аварійних вимикань на ремонтні режими та можливість виникнення післяаварійних режимів, які призводять до порушення електропостачання, будуть враховані, за ймовірністю виникнення таких режимів та їхніх можливих наслідків.

У ПУЕ також сформульовано вимогу враховувати можливість та доцільність технологічного резервування. Воно реалізується шляхом встановлення взаємно резервованих технологічних агрегатів або спеціальних пристроїв безаварійної зупинки технологічного процесу, що діють під час порушень електропостачання. Технологічне резервування має впроваджуватися, якщо резервування електропостачання не забезпечує неперервності технологічного процесу або недоцільне.