



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА



ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Конспект лекцій
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за спеціальністю 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Електронний ресурс



УДК 621.7(075.8)

Я 44

Рецензенти:

Бровко К. Ю. – к. т. н., доцент, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна;

Єгорова О. Ю. – к. т. н., доцент, доцент кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту».

*Затверджено до розміщення в мережі Інтернет рішенням Науково-методичної ради
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
(протокол № 9 від 23 квітня 2025 року)*

Я 44 **Якість** електричної енергії : конспект лекцій для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» [Електронний ресурс] / укладач Ю. С. Олійник. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025. – (PDF 112 с.)

Конспект лекцій розроблено відповідно до програми дисципліни «Якість електричної енергії», яка є однією з важливих у циклі підготовки студентів третього курсу бакалаврата спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми «Електричні станції, мережі та системи». Мета дисципліни – забезпечити студентів глибокими знаннями про параметри, що визначають якість електричної енергії, методи їх оцінки та заходи, які дозволяють покращити якість електропостачання.

УДК 339.9(477)(075.8)

© Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, 2025

© Олійник Ю. С., уклад., 2025

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	4
ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ	5
СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ	7
ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ	8
ТЕМИ І ЗМІСТ ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ	13
Розділ 1. Якість електричної енергії	13
Тема 1. Вступ	13
Тема 2. Основні показники якості електричної енергії	26
Тема 3. Фактори, що впливають на якість електричної енергії.	39
Методи контролю та аналізу якості електричної енергії	
Тема 4. Методи забезпечення та підвищення якості електричної енергії. Практичні аспекти забезпечення якості електричної енергії	53
Тема 5. Аналіз економічних аспектів якості електричної енергії	92
Розділ 2. Компенсація реактивної потужності	99
Тема 1. Поняття реактивної потужності. Компенсація реактивної потужності	99
РЕКОМЕНДОВНА ЛІТЕРАТУРА	110

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Забезпечення високої якості електроенергії сприяє підвищенню ефективності роботи електроприймачів та стабільності енергосистем. Розв'язання питань, пов'язаних із якістю електроенергії, має ґрунтуватися на збалансованому технічному та економічному аналізі ефекту від заходів із її покращення та додаткових витрат, які вони спричиняють.

Якість електроенергії оцінюється за техніко-економічними показниками, що враховують шкоду від її неналежного рівня. Серед наслідків низької якості електроенергії можна виділити:

Техногенні збитки, зокрема втрати продуктивності, збої у технологічних процесах споживачів електроенергії та пошкодження обладнання систем електропостачання.

Електромагнітні збитки, які проявляються у збільшенні втрат електроенергії, а також виході з ладу електротехнічного обладнання.

Шкода в електроенергетиці, спричинена порушеннями стандартів якості енергії.

Якість електроенергії тісно пов'язана з надійністю енергопостачання. Нормальним режимом вважається такий, за якого споживачі отримують електроенергію стандартизованої якості в необхідному обсязі та безперебійно.

Якість електроенергії — це складний і багатогранний показник, що визначає придатність електричної енергії для використання споживачами. Вона є ключовою умовою безпечної, ефективної та довговічної роботи електрообладнання. В сучасному світі, де електроенергія є основою для функціонування більшості технологічних процесів, якість енергії безпосередньо впливає на економічну, екологічну та соціальну стабільність.

ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Якість електричної енергії є важливим аспектом для забезпечення надійності та ефективності електроенергетичних систем. Розуміння принципів та технічних аспектів якості електричної енергії допомагає інженерам та технікам розробляти, впроваджувати та підтримувати ефективні системи електроживлення. Це включає проектування, управління та підтримку електричних мереж, електронних пристроїв, роботи зі стабілізацією напруги та багато іншого. Знання про якість електричної енергії допомагає забезпечити безпеку для працівників, користувачів та обладнання, оскільки вона допомагає уникати аварійних ситуацій, коротких замикань та перенапруг, що можуть призвести до пошкоджень або навіть пожеж. Розуміння якості електричної енергії дозволяє виявити та усунути проблеми, які можуть призводити до втрати енергії. Це допомагає зменшити енерговитрати та підвищити ефективність використання енергії. Погіршення якості електричної енергії може призвести до збоїв у роботі обладнання, втрати продуктивності та витрат на ремонт або заміну обладнання. Розуміння принципів якості електричної енергії допомагає зменшити ці ризики та збільшити ефективність використання ресурсів.

Вивчення курсу «Якість електричної енергії» є важливим як для фахівців у сфері електроенергетики, так і для широкої громадськості, оскільки воно сприяє ефективному та безпечному використанню електроенергії в різних галузях життя.

Метою вивчення навчальної дисципліни є формування у здобувачів першого (освітньо-наукового) рівня вищої освіти (бакалаврського) є надання здобувачам вищої освіти теоретичні знання і практичні навички, які є необхідні для аналізу, оцінки та забезпечення якості електричної енергії. Це включає вивчення показників якості електричної енергії, методів контролю та управління ними, а також технологій та пристроїв, що забезпечують оптимальні параметри електричної енергії в електричних мережах.

Якість електроенергії — це не лише технічний, але й соціально-економічний аспект, що впливає на комфорт та безпеку людей, ефективність промисловості та розвиток економіки. Удосконалення системи постачання, впровадження сучасних технологій та підвищення енергоефективності допоможуть забезпечити стабільну та якісну енергію для всіх споживачів.

Дисципліна є вибірковою, отже заплановані результати навчання можна представити у наступному вигляді.

Заплановані результати навчання:

- ✓ Володіти основними поняттями та термінами, пов'язаними з якістю електричної енергії.
- ✓ Розуміти нормативні документи і стандарти, що регулюють якість електричної енергії.
- ✓ Знати фактори, що впливають на якість електричної енергії, та їхніх джерел.
- ✓ Вміти аналізувати показники якості електричної енергії.
- ✓ Мати здатність діагностувати проблеми в електричних мережах, пов'язані з якістю енергії.
- ✓ Мати навички оцінки впливу різних факторів на якість електричної енергії.
- ✓ Вміти оцінювати економічних наслідків недостатньої якості електричної енергії.
- ✓ Вміти проводити економічний аналіз витрат та вигод від впровадження заходів з підвищення якості електричної енергії.

СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Назви розділів і тем	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усього	у тому числі					усього	у тому числі				
		л	п	лаб.	інд.	с. р.		л	п	лаб.	інд.	с. р.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Розділ 1. Якість електричної енергії												
Тема 1. Вступ	14	4				10						
Тема 2. Основні показники якості електричної енергії	31	6	10			15						
Тема 3. Фактори, що впливають на якість електричної енергії. Методи контролю та аналізу якості електричної енергії	31	6	10			15						
Тема 4. Методи забезпечення та підвищення якості електричної енергії. Практичні аспекти забезпечення якості електричної енергії	31	6	10			15						
Тема 5. Аналіз економічних аспектів якості електричної енергії	27	2	10			15						
Разом за розділом 1	134	24	40			70						
Розділ 2. Компенсація реактивної потужності												
Тема 1. Поняття реактивної потужності. Компенсація реактивної потужності.	46	6	20			20						
Разом за розділом 2	46	6	20			20						
Усього годин	180	30	60			90						

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Розділ 1. Якість електричної енергії

Тема 1. Вступ. Якість електричної енергії визначається як сукупність характеристик електричного струму, напруги та частоти, які забезпечують стабільну та надійну роботу електричних пристроїв. Від неї залежить стабільність електропостачання та ефективність роботи електрообладнання. Нормативні документи та стандарти в галузі якості електричної енергії. Основні нормативні документи та стандартів, які регулюють якість електричної енергії. Вплив якості електричної енергії на роботу електрообладнання та електронних пристроїв. Низька якість електричної енергії може спричинити кілька проблем: перенапруги та короткі замикання: можуть пошкодити електрообладнання та зменшити його термін експлуатації; перешкоди та шум: впливають на роботу електронних пристроїв, особливо чутливих до змін напруги та частоти. Енергетичні втрати: низька якість електроенергії може збільшити енергетичні втрати, що призводить до підвищених витрат на електропостачання.

Тема 2. Основні показники якості електричної енергії. Основні показники якості електричної енергії: частота напруги - це кількість коливань змінного струму за секунду. У більшості країн стандартна частота електромережі становить 50 або 60 Гц. Відхилення від цієї частоти можуть спричинити неправильну роботу електрообладнання. Амплітуда напруги - це максимальне значення напруги в електричному циклі. Зазвичай вона повинна бути постійною і відповідати номінальному значенню (наприклад, 220 В або 110 В). Відхилення амплітуди можуть призвести до перегрівання або зниження ефективності роботи пристроїв. Спотворення форми напруги та струму (гармонічні складові). Гармонічні складові - це спотворення синусоїдальної форми напруги або струму, що виникають через нелінійні навантаження. Вони можуть викликати додаткові втрати енергії, нагрівання обладнання та погіршення роботи електронних пристроїв. Асиметрія напруги - це нерівномірний розподіл напруги між фазами в трифазній електромережі. Це може призвести до перевантаження та перегріву обладнання, а також до нерівномірної роботи електродвигунів. Провали та перенапруги. Провали напруги - це короточасні зниження напруги, які можуть спричинити вимкнення або неправильну роботу електронних пристроїв. Перенапруги - це

короткочасні підвищення напруги, які можуть пошкодити ізоляцію, спричинити збої в роботі обладнання або навіть його поломку.

Тема 3. Фактори, що впливають на якість електричної енергії. Методи контролю та аналізу якості електричної енергії

Фактори, що впливають на якість електричної енергії та методи контролю та аналізу. Нерівномірний розподіл навантаження між фазами в мережі може призвести до асиметрії напруги та погіршення якості електроенергії. Це виникає, коли одна або більше фаз навантажуються більше, ніж інші, що викликає нерівномірний розподіл потужності. Перехідні процеси в електричних мережах. Перехідні процеси включають короткочасні збурення напруги та струму, які виникають при комутації, включенні або вимкненні обладнання, аваріях у мережі тощо. Вони можуть спричинити спалахи напруги, провали напруги та інші тимчасові збурення. Гармонічні спотворення, створені нелінійними навантаженнями. Нелінійні навантаження, такі як випрямлячі, інвертори та деякі види освітлювальних приладів, можуть створювати гармонічні складові, що спотворюють форму хвилі напруги та струму. Це знижує ефективність роботи обладнання та може спричинити додаткові втрати. Електромагнітні завади. Електромагнітні завади можуть бути викликані різними джерелами, включаючи радіочастотні випромінювання, комутаційні імпульси та інше обладнання. Вони можуть впливати на якість сигналу та роботу чутливих електронних пристроїв. Методи контролю та аналізу якості електричної енергії. Вимірювальні прилади та пристрої для оцінки якості електричної енергії. Для оцінки якості електричної енергії використовуються різноманітні вимірювальні прилади, такі як аналізатори якості електроенергії, осцилографи, мультиметри та інші спеціалізовані інструменти. Вони дозволяють вимірювати та аналізувати параметри напруги, струму, частоти, гармонічних спотворень та інші характеристики. Методи спектрального аналізу для виявлення гармонічних складових. Спектральний аналіз дозволяє виявляти та оцінювати гармонічні складові напруги та струму. Це допомагає ідентифікувати джерела нелінійних спотворень та оцінити їхній вплив на якість електричної енергії. Моніторинг параметрів якості електричної енергії в реальному часі. Системи моніторингу в реальному часі дозволяють постійно контролювати параметри якості електричної енергії та швидко реагувати на будь-які відхилення або проблеми. Це допомагає забезпечити стабільність електропостачання та запобігти можливим збоям в роботі обладнання.

Тема 4. Методи забезпечення та підвищення якості електричної енергії. Практичні аспекти забезпечення якості електричної енергії

- Використання компенсаційних пристроїв (конденсаторні установки, фільтри гармонік).
- Системи автоматичного регулювання напруги.
- Пристрої безперебійного живлення (UPS) та стабілізатори напруги.
- Резервування та дублювання електроживлення.
- Розрахунки та моделювання електричних мереж з урахуванням показників якості.
- Реальні кейси та приклади з промислової практики.
- Впровадження новітніх технологій для покращення якості електричної енергії.

Тема 5. Аналіз економічних аспектів якості електричної енергії.

Методи забезпечення та підвищення якості електричної енергії. Використання компенсаційних пристроїв (конденсаторні установки, фільтри гармонік). Конденсаторні установки використовуються для компенсації реактивної потужності, зменшуючи втрати енергії та покращуючи стабільність напруги. Фільтри гармонік встановлюються для зменшення гармонічних спотворень, що виникають через нелінійні навантаження, забезпечуючи більш чисту форму синусоїдальної хвилі. Системи автоматичного регулювання напруги (AVR) забезпечують постійну стабільність напруги в мережі, регулюючи її в залежності від зміни навантаження. Це допомагає уникати перенапруг та провалів, забезпечуючи стабільну роботу електрообладнання. Пристрої безперебійного живлення (UPS) використовуються для захисту критичного обладнання від переривань в електропостачанні, забезпечуючи резервне живлення на короткий час. Стабілізатори напруги допомагають підтримувати постійну напругу, захищаючи електроніку від перепадів. Резервування та дублювання електроживлення полягає у використанні додаткових джерел енергії або дублюючих ліній електропередачі для забезпечення надійності електропостачання. Це дозволяє уникнути простоїв обладнання при аварійних ситуаціях. Практичні аспекти забезпечення якості електричної енергії. Розрахунки та моделювання електричних мереж з урахуванням показників якості. Використання спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання електричних мереж дозволяє прогнозувати якість електроенергії

та оптимізувати роботу системи. Це допомагає виявляти потенційні проблеми та розробляти заходи для їх запобігання. Реальні кейси та приклади з промислової практики Вивчення реальних кейсів допомагає розуміти, які заходи були ефективними для забезпечення якості електроенергії в різних умовах. Приклади з промисловості можуть включати впровадження нових технологій, модернізацію обладнання та інші заходи. Впровадження новітніх технологій для покращення якості електричної енергії. Сучасні технології такі як розумні мережі (Smart Grids), інтернет речей (IoT) та великі дані (Big Data) дозволяють більш точно контролювати та аналізувати якість електричної енергії. Це допомагає вчасно виявляти проблеми та впроваджувати ефективні рішення для їх усунення.

Розділ 2. Компенсація реактивної потужності

Тема 1. Поняття реактивної потужності. Компенсація реактивної потужності.

Поняття реактивної потужності. Компенсація реактивної потужності. Вступ. Реактивна потужність (Q) - це складова електричної потужності, яка не перетворюється в корисну роботу, а створюється і поглинається електричними та магнітними полями. Вона відіграє важливу роль у функціонуванні електричних систем, забезпечуючи магнітне поле для роботи індуктивних навантажень. Проблеми, пов'язані з реактивною потужністю. Реактивна потужність спричиняє кілька проблем в електричних системах: збільшення втрат енергії через нагрівання проводів та обладнання, зменшення пропускної здатності ліній електропередавання, зниження коефіцієнта потужності ($\cos \phi$), що призводить до менш ефективного використання електричної енергії, необхідність збільшення розмірів обладнання для підтримання достатнього рівня напруги. Компенсація реактивної потужності. Компенсація реактивної потужності - це процес зменшення або усунення негативного впливу реактивної потужності на електричну систему. Це досягається шляхом встановлення спеціальних пристроїв, які генерують або поглинають реактивну потужність. Методи компенсації реактивної потужності. Конденсаторні батареї: використовуються для генерації реактивної потужності та компенсації індуктивних навантажень. Синхронні компенсатори: синхронні машини, що працюють в холостому режимі, генерують або поглинають реактивну потужність в залежності від режиму роботи. Статичні вар-компенсатори (SVC): використовують тиристорні регулятори для керування потоком

реактивної потужності. Фільтри гармонік: використовуються для усунення гармонічних спотворень та компенсації реактивної потужності.

Приклади використання та розрахунки. Приклади використання компенсації реактивної потужності включають промислові підприємства, електростанції та розподільчі мережі. Розрахунки включають визначення необхідної ємності конденсаторів або потужності компенсаторів для досягнення бажаного коефіцієнта потужності. Технічні та економічні аспекти компенсації. Технічні аспекти компенсації включають правильний вибір та встановлення обладнання, забезпечення стабільної роботи електричної системи та зменшення втрат енергії. Економічні аспекти включають зниження витрат на електроенергію, зменшення плати за реактивну потужність та підвищення ефективності роботи електричних систем.

ТЕМИ І ЗМІСТ ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

РОЗДІЛ 1. ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Тема 1. Вступ

- Визначення та значення якості електричної енергії.
- Нормативні документи та стандарти в галузі якості електричної енергії.
- Вплив якості електричної енергії на роботу електрообладнання та електронних пристроїв.

Визначення та значення якості електричної енергії

Важливість якості електроенергії обумовлена багатьма факторами.

Для споживачів - електрообладнання, зокрема побутові прилади, офісна техніка, промислові установки та високоточне електронне обладнання, розраховані на певні параметри електроенергії. Якщо ці параметри виходять за допустимі межі, це може спричинити збої, скорочення терміну служби пристроїв або навіть їх вихід із ладу. Наприклад, перепади напруги можуть пошкодити чутливу електроніку чи викликати її відключення.

Для промисловості - в промислових масштабах якість електроенергії впливає на стабільність технологічних процесів, продуктивність та економічність. Нестабільна напруга або частота може призвести до зупинки виробництва, втрати продукції або виходу з ладу дорогого обладнання.

Для енергосистеми - електроенергетична система — це комплекс генерації, передачі, розподілу та споживання електроенергії. Погана якість енергії може створювати перевантаження в мережі, викликати аварії, знижувати ефективність передачі та спричиняти небажані втрати.

Розрізняють чотири основні типи режимів постачання електричної енергії:

1. **Нормальні режими:** параметри якості електроенергії залишаються в межах багаторічно встановлених допустимих відхилень від номінальних значень.

2. **Тимчасово допустимі режими:** характеризуються явищами, такими як струмові перевантаження або відхилення напруги, які враховуються в проектних розрахунках (наприклад, перевантаження під час добових пікових навантажень) або допускаються на обмежений період без значної шкоди для мережі та підключених споживачів.

3. **Аварійні режими:** виникають через надструми або інші критичні явища, небезпечні для елементів мережі. Такі режими, зазвичай, пов'язані з пошкодженнями, наприклад, порушенням ізоляції чи обривом проводів, і мають перехідний, нестабільний характер.

4. **Післяаварійні режими:** включають перехідні процеси, що виникають при ручному чи автоматичному відновленні електропостачання (наприклад, через одночасний запуск великої кількості електроприймачів), а також стаціонарні режими в нових або обмежених умовах енергопостачання.

Для кожного типу режиму встановлюються стандартизовані показники якості електроенергії або допустимі значення цих показників щодо їх величини та тривалості.

Основні показники якості електричної енергії визначені у пунктах 11.4.7 – 11.4.12 глави 11.4 розділу XI Кодексу систем розподілу [3].

Стандартна номінальна напруга U_n для мереж низької напруги загального призначення має значення 220 В між фазним і нульовим проводом або між фазними проводами: - для трифазних чотирипровідних мереж: $U_n = 220$ В між фазним та нульовим проводом; - для трифазних трипровідних мереж: $U_n = 220$ В між фазними проводами. Зміна напруги не повинна перевищувати $\pm 10 \%$ від величини номінальної напруги [4].

Частота напруги електропостачання для мереж низької напруги має бути в межах [4]:

1) для систем, які синхронно приєднані до ОЕС України - $50 \text{ Гц} \pm 1 \%$ протягом 99,5 % часу за рік та $50 \text{ Гц} + 4 \%$ (- 6 %) протягом 100 % часу;

2) для систем без синхронного приєднання до ОЕС України - $50 \text{ Гц} \pm 2 \%$ протягом 99,5 % часу за рік та $50 \text{ Гц} \pm 15 \%$ протягом 100 % часу.

Показник довготривалого флікера (мерехтіння), спричиненого коливанням напруги, для мереж низької напруги має бути меншим або рівним 1 для 95 % часу спостереження. 95 % середньоквадратичних значень складника зворотної послідовності напруги електропостачання, усереднених на 10-хвилинному проміжку, для мереж низької напруги мають бути в межах від 0 % до 2 % від складника напруги прямої послідовності. 95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених на 10-хвилинному проміжку, для мереж низької напруги мають бути меншими або рівними наступним значенням [4]:

Таблиця 1.1. – гармонійні складові

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
не кратні 3		кратні 4		порядок	відносна амплітуда
порядок	відносна амплітуда	порядок	відносна амплітуда		
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	1,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги електропостачання, ураховуючи всі гармоніки до 40-ї включно, для мереж низької напруги має бути меншим чи рівним 8 % [4].

Основні показники якості електроенергії

1. **Напруга (величина та стабільність)** - відхилення напруги від номінального значення можуть бути як короточасними, так і довготривалими. Наприклад, для побутових споживачів в Україні стандартне значення напруги становить 220 В ($\pm 10\%$). Постійні перевищення або зниження цього рівня (наприклад, до 190 В чи понад 240 В) створюють загрозу для роботи електроприладів.

2. **Частота струму** - в більшості країн, включаючи Україну, стандартна частота змінного струму становить 50 Гц. Відхилення частоти (наприклад, до 49,8 Гц або 50,2 Гц) можуть негативно вплинути на синхронну роботу обладнання. У критичних випадках це може викликати аварії, особливо в енергомістких процесах.

3. **Форма електричного сигналу** - ідеальна форма сигналу змінного струму має бути синусоїдальною. Проте в реальних умовах у хвилю можуть вноситись спотворення у вигляді гармонійних коливань. Це спричиняється наявністю нелінійних навантажень, таких як інвертори, електродвигуни чи джерела безперебійного живлення.

4. **Симетрія фаз** - в трифазній системі напруги у фазах повинні бути рівними. Порушення симетрії може спричинити нерівномірний розподіл

струмів і перевантаження окремих елементів системи, таких як трансформатори чи лінії електропередачі.

5. **Перешкоди та імпульсні збої** - короточасні явища, такі як провали напруги, імпульсні перенапруги чи повне зникнення напруги, можуть стати причиною аварій. Такі перешкоди можуть бути наслідком природних явищ (блискавки), технічних несправностей чи впливу стороннього обладнання.

Чинники, що впливають на якість електроенергії:

1. **Технічний стан електромережі** - застарілі мережі, перевантажені трансформаторні підстанції, несправність обладнання — усе це може спричинити зниження якості енергії.

2. **Вплив нелінійних споживачів** - зростання використання енергоощадного обладнання, інверторів, світлодіодних ламп та іншої електроніки створює навантаження на мережу, що викликає спотворення сигналу та втрати енергії.

3. **Вплив зовнішніх факторів** - природні явища, такі як грози, сильний вітер, обледеніння, можуть порушувати стабільність енергопостачання.

4. **Поведінка споживачів** - нерівномірний графік споживання електроенергії, раптові включення або відключення великих споживачів також впливають на якість електроенергії.

Методи покращення якості електроенергії:

1. **Стабілізатори напруги** - допомагають уникнути перепадів напруги та захищають обладнання.

2. **Фільтри гармонійних коливань** - використовуються для зменшення спотворень синусоїдальної хвилі.

3. **Джерела безперебійного живлення (ДБЖ)** - захищають обладнання від короточасних перебоїв та провалів напруги.

4. **Модернізація енергосистем** - заміна застарілого обладнання, автоматизація мереж, використання смарт-систем для моніторингу та керування якістю енергії.

5. **Раціональне споживання** - вирівнювання графіків споживання, уникнення пікових навантажень сприяє зменшенню негативного впливу на енергосистему.

Якість електричної енергії — це сукупність характеристик електричної мережі, які визначають її здатність забезпечувати споживачів електроенергією, придатною для нормального функціонування їхнього обладнання. Ці характеристики включають показники напруги, частоти, симетрії фаз, рівня гармонійних спотворень тощо.

Якість електричної енергії - це ступінь відповідності фактичних значень параметрів електричної енергії встановленим ДСТ значенням, основні з яких наведено нижче у таблиці 1.2. [6]:

Таблиця 1.2. – Показники якості електричної енергії

Найменування показника	Допустиме значення показника	
	нормальне	граничне
Відхилення напруги	$\pm 5^*$	$\pm 10^*$
Доза флікера, відн. од.: короткочасна тривала		1,38 1,00
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, %, не більше	8	12
Коефіцієнт гармонійної складової напруги непарного *парного) порядку, %, не більше	5 (2)	7,5 (3)
Несиметрія напруги, %	2	4
Тривалість провалу напруги, с		30
Відхилення частоти, Гц	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$

Основні неполадки живлення, які становлять небезпеку для роботи електрообладнання відповідно наведеної класифікації (у дужках наведені найбільш поширені англомовні еквіваленти) відображає вимоги міжнародного стандарту ГОСТ 13109-97, термінологічних стандартів ГОСТ 30372-95 та ДСТУ 3466-96 [6]:

1. Зникнення напруги (Power Failure, Loss of Voltage) - відсутність напруги в електромережі протягом більше двох періодів (40 мс). Наслідками зникнення напруги можуть бути: втрата, пошкодження даних на серверах і поточної інформації на робочих станціях, пошкодження файлової системи, порушення технологічного процесу, вихід з ладу апаратури.

2. Провал напруги (Power Sag, Voltage Dip) - раптове зниження напруги в електричній мережі нижче величини 90% від номінального значення, за яким слідує відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня за проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд. Причиною провалу напруги можуть бути: включення енергоємного обладнання, запуск потужних електродвигунів, робота зварювальних апаратів тощо. Можливі наслідки: скидання оперативної пам'яті; виникнення помилок, вихід з ладу апаратури, мерехтіння освітлення.

3. Перенапруга (Power Surge, Over Voltage) - раптове підвищення напруги в електричній мережі вище величини 110% від номінального значення, за яким слід відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня за проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд. Причиною

виникнення перенапруг може бути відключення енергоємного обладнання. Можливі наслідки: скидання оперативної пам'яті; виникнення помилок, вихід з ладу апаратури, мерехтіння освітлення.

4. Відхилення напруги (Brownout, Voltage Deviation) - відхилення (зниження / підвищення) напруги в мережі від допустимих стандартом значень на тривалий час (більше десятків секунд). Виникає зазвичай через зростання споживання електроенергії в певні періоди часу при обмеженій потужності джерела електроенергії або довгих лініях електроживлення. Можливі негативні наслідки: додаткові втрати потужності в стабілізаторах, скорочення терміну служби блоків живлення, збої у виконанні програм.

5. Електромагнітна перешкода (Electrical Line Noise) - виникнення у мережі високочастотних імпульсів, що накладаються на синусоїдальну форму напруги. Основними причинами виникнення електромагнітних перешкод є робота потужних електродвигунів, перемикання релейної апаратури і силової комутаційної електроніки, мовлення суміжних станцій, магнітні бурі. Можливі наслідки - виникнення помилок, скидання оперативної пам'яті, "зависання" операційної системи, вихід з ладу накопичувачів на жорстких дисках.

6. Імпульс напруги (High Voltage Spikes, Voltage Impulse) - це короткочасне перевищення напруги вище 110% від номінального значення тривалістю 10-50 мкс (з часом фронту імпульсу 1-10 мкс). При цьому, амплітуда імпульсів перенапруги може досягати величин 6000 В. Причиною їх появи можуть бути удари блискавок, розряди статичної електрики. Такі високовольтні імпульси з дуже крутим переднім фронтом без перешкод минають захисні фільтри блоків живлення ПЕОМ і потрапляючи в ланки системних плат, викликають скидання оперативної пам'яті і вихід з ладу мікросхем.

7. Відхилення частоти (Frequency Variations, Frequency Deviation) - відхилення частоти на величину більше 0,2 Гц від номінального значення (50 Гц). Причиною появи можуть бути: нестабільність джерела електроенергії, нестабільність частоти обертання ротора дизель-генератора. Можливі наслідки: перегрів і вихід з ладу блоків живлення, «зависання» операційної системи, програмні збої, втрата даних.

8. Тимчасове перенапруга (Switching Transient) - це короткочасне перевищення напруги вище 110% від номінального значення тривалістю 1000-5000 мкс. При цьому, амплітуда імпульсів перенапруги може досягати величин 4500 В. Причиною їх появи є комутаційні процеси потужнострумових

ланцюгів електропостачання, іскріння комутаційних апаратів. Можливі наслідки: скидання оперативної пам'яті і вихід з ладу мікросхем.

9. Несинусоїдальність напруги (Harmonic Distortion) - характеризується двома основними показниками:

а) коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги (струму) - відношення діючих значень суми вищих гармонік напруг (струмів) до діючого значення напруги (струму) основної гармоніки або у спрощеному варіанті до номінальної напруги (струму);

б) коефіцієнтом гармоніки напруги (струму) - відношення діючого значення аналізованої гармоніки напруги (струму) до діючого значення змінної напруги (струму) або у спрощеному варіанті до номінальної напруги (струму).

Крім перерахованих використовуються такі показники якості електроенергії, як: коефіцієнти форми і амплітуди кривих змінної напруги (струму), гармоніка напруги (струму), джерело гармонік напруги, струму (Source of Harmonic Voltage, Current), гармонійний резонанс (Harmonic Resonance). Небезпеку для електрообладнання представляють спотворення синусоїдальності кривої напруги більше 8% або наявність в кривій напруги гармонійних складових напруги непарного (парного) порядку, з коефіцієнтом гармонік більше 5% [6].

Основні аспекти якості електричної енергії

1. **Частота електричного струму** - номінальна частота в більшості країн становить 50 Гц або 60 Гц. Відхилення від цієї частоти впливають на роботу електричного обладнання, наприклад, двигунів, генераторів і трансформаторів.

2. **Напруга** - напруга в електромережі має відповідати номінальному рівню (наприклад, 220 В в Україні для однофазного струму). Відхилення можуть бути:

- **Провалами напруги** — короткочасні зниження рівня напруги.
- **Перенапруги** — підвищення напруги вище допустимого рівня.
- **Флуктуації напруги** — швидкі зміни амплітуди напруги.

3. **Симетрія фаз** - в трифазних мережах напруги фаз повинні бути симетричними. Асинхронія фаз може призвести до перегрівання обладнання, зниження його ефективності або навіть виходу з ладу.

4. **Гармонійні спотворення** - електрична напруга та струм повинні мати синусоїдальну форму. Наявність гармонік (сигналів із частотами, кратними основній частоті) призводить до нагрівання обладнання, зниження ефективності роботи електроприладів і навіть їхнього пошкодження.

5. **Перехідні процеси** - це короткочасні імпульсні явища, спричинені комутаціями в мережі, грозовими розрядами або аваріями. Вони можуть створювати небезпеку для чутливих пристроїв.

Чому важлива якість електричної енергії?

1. **Надійність роботи обладнання** - погана якість електроенергії може спричинити передчасний знос або пошкодження електроприладів. Наприклад, перенапруга може зруйнувати ізоляцію, а провали напруги — зупинити виробничі процеси.

2. **Енергоефективність** - гармонійні спотворення й асиметрія фаз призводять до збільшення споживання енергії обладнанням, що знижує загальну енергоефективність.

3. **Безпека** - перехідні процеси та перенапруги можуть створювати ризики для персоналу, наприклад, у вигляді електричних дуг або пожеж.

4. **Економічні втрати** - низька якість електричної енергії викликає додаткові витрати на ремонт і заміну обладнання, простій виробництва та підвищене споживання електроенергії.

Методи забезпечення високої якості електроенергії

1. **Стабілізатори напруги** - використовуються для підтримання напруги на постійному рівні незалежно від коливань у мережі.

2. **Фільтри гармонік** - спеціальні пристрої для зменшення гармонійних спотворень у мережі.

3. **Джерела безперебійного живлення (UPS)** - забезпечують живлення чутливих пристроїв у разі провалів або повного зникнення напруги.

4. **Моніторинг якості енергії** - використання спеціальних приладів для постійного вимірювання параметрів мережі та оперативного виявлення проблем.

5. **Розподілення навантаження** - забезпечує рівномірний розподіл електричних навантажень у мережі, що зменшує асиметрію фаз і втрати.

Отже, якість електричної енергії — це не лише технічна, а й економічна та безпекова складова сучасної енергетичної системи. Забезпечення високої якості енергії дозволяє мінімізувати ризики, зменшити витрати та покращити ефективність роботи всієї інфраструктури.

Нормативні документи та стандарти в галузі якості електричної енергії

Забезпечення якості електричної енергії регулюється нормативними документами та стандартами, які встановлюють допустимі параметри електричних мереж. В Україні ця галузь базується на міжнародних стандартах, адаптованих до національних умов.

Основні нормативні документи та стандарти:

✓ Державні стандарти України (ДСТУ):

❖ ДСТУ EN 50160:2014 — "Характеристики напруги в електричних мережах загального призначення" - встановлює основні параметри якості електричної енергії, такі як частота, напруга, симетрія фаз і рівень гармонійних спотворень.

❖ ДСТУ IEC 61000 (серія стандартів) — «Електромагнітна сумісність (ЕМС)» - включає вимоги до рівня електромагнітних завад, які можуть впливати на якість енергії.

❖ ДСТУ EN 61000-2-2:2006 — Вимоги до гармонійних спотворень і провалів напруги в низьковольтних мережах.

✓ Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС) - встановлюють порядок експлуатації електроустановок, включаючи контроль якості електроенергії та відповідність її параметрів нормативним вимогам.

✓ Кодекс системи розподілу (КСР) - офіційно затверджений документ, який регулює відносини між операторами систем розподілу (ОСР) і споживачами. Містить вимоги щодо параметрів напруги, симетрії фаз і перехідних процесів.

✓ Кодекс системи передачі (КСП) - регулює технічні аспекти передачі електроенергії високовольтними мережами, включаючи контроль частоти й напруги.

✓ Міжнародні стандарти ISO та IEC:

❖ ISO 50001:2018 - «Системи енергоменеджменту» - допомагає впроваджувати системи управління енергоспоживанням із врахуванням вимог до якості електроенергії.

❖ IEC 61000 (загальна серія) - Розробляє вимоги до енергосистем для забезпечення електромагнітної сумісності.

Основні параметри, регульовані стандартами:

1. Частота електричного струму - номінальна частота - 50 Гц (допустимі відхилення: $\pm 1\%$ для основної мережі). У разі аварійних ситуацій допускається короткочасне відхилення до $\pm 4\%$.

2. Напруга - допустимі відхилення: $\pm 10\%$ від номінального значення (наприклад, 220 В у побутових мережах).

3. Гармонійні спотворення - загальний коефіцієнт гармонік (THD) для напруги не повинен перевищувати 8% у мережах низької напруги.

4. Провали напруги - тривалість і амплітуда провалів регулюються залежно від типу мережі.

5. Асиметрія фаз - для трифазних систем коефіцієнт асиметрії за напругою не повинен перевищувати 2%.

Контроль та відповідальність:

✓ Моніторинг якості енергії:

❖ Оператори систем розподілу (ОСР) та передачі здійснюють регулярний контроль якості електроенергії за допомогою спеціалізованих приладів.

❖ Споживачі також мають право замовляти перевірку якості електроенергії в разі підозри на невідповідність нормативам.

✓ Відповідальність за відхилення:

❖ У разі порушення стандартів оператори зобов'язані усунути проблему в узгоджені терміни.

❖ У разі пошкодження обладнання через низьку якість електроенергії споживач може подати претензію оператору.

✓ Значення стандартів для споживачів:

❖ Захист обладнання - дотримання нормативів запобігає пошкодженню електроприладів через коливання напруги чи спотворення сигналу.

❖ Економія енергії - чітке регулювання гармонійних спотворень і симетрії фаз зменшує втрати енергії.

❖ Стабільність роботи систем - висока якість електроенергії забезпечує ефективну роботу як побутових, так і промислових установок.

Вплив якості електричної енергії на роботу електрообладнання та електронних пристроїв

Якість електричної енергії безпосередньо впливає на надійність, ефективність і довговічність роботи електрообладнання та електронних пристроїв. Низька якість електроенергії може призвести до зниження продуктивності, пошкодження техніки чи навіть виходу її з ладу.

Основні проблеми якості електроенергії та їхній вплив на обладнання:

Провали напруги:

Провали напруги — це короткочасні зниження рівня напруги в мережі, які можуть бути причиною зупинки або неправильної роботи електропристроїв, таких як двигуни, компресори, насоси. Також можливе перезавантаження або зупинка електронного обладнання (комп'ютери, сервери, системи автоматизації). Можливі збої в роботі освітлення та систем управління.

Перенапруга - це підвищення напруги в мережі вище допустимих значень, наслідки якого можуть бути наступні:

- ✓ Перегрів елементів обладнання (трансформаторів, електродвигунів).
- ✓ Прискорений знос ізоляції проводів і електричних компонентів.
- ✓ Вихід із ладу чутливих електронних пристроїв (телевізори, системи зв'язку, комп'ютери).

Гармонійні спотворення - це відхилення напруги або струму від синусоїдальної форми через вплив нелінійних навантажень (наприклад, джерел живлення, частотних перетворювачів). Вплив на роботу електрообладнання:

- ✓ Надмірне нагрівання трансформаторів, двигунів і кабелів.
- ✓ Зниження ефективності роботи пристроїв через підвищене споживання енергії.
- ✓ Нестабільність роботи обладнання, особливо електроніки.

Асиметрія фаз - в трифазних системах напруга та струми повинні бути симетричними. Відхилення між фазами викликають асиметрію. Вплив:

- ✓ Перегрів трифазних двигунів і трансформаторів через надлишкове навантаження на одну з фаз.
- ✓ Зниження ефективності роботи електрообладнання.
- ✓ Вібрації та механічні пошкодження двигунів.

Частотні відхилення - номінальна частота в мережі (50 Гц в Україні) може змінюватися через нестабільність генерації або перевантаження. Вплив:

- ✓ Неправильна робота синхронних двигунів та генераторів.
- ✓ Збільшення втрат енергії та зменшення продуктивності обладнання.
- ✓ Порушення роботи систем керування часом (наприклад, годинників, прив'язаних до частоти мережі).

Перехідні процеси (імпульсні перенапруги) - виникають через комутації, блискавки або короткі замикання. Вплив:

- ✓ Вихід з ладу чутливих компонентів електроніки (мікросхем, процесорів).
- ✓ Пошкодження ізоляції електрообладнання.
- ✓ Ризик втрати даних у комп'ютерах та інших системах зберігання інформації.

Флуктуації напруги (мерехтіння) - це швидкі коливання рівня напруги. Вплив:

- ✓ Мерехтіння освітлення, що викликає дискомфорт для користувачів.

- ✓ Зниження продуктивності систем освітлення та обладнання.
- ✓ Негативний вплив на точність роботи чутливих систем (наприклад, лабораторного обладнання).

Наслідки невідповідної стандартам якості електроенергії виражаються в наступному:

- ✓ Зниження продуктивності обладнання - втрати потужності, нагрівання елементів і збої в роботі впливають на ефективність систем.
- ✓ Пошкодження обладнання - наприклад, імпульсні перенапруги можуть пошкодити силову електроніку, а асиметрія фаз — електродвигуни.
- ✓ Підвищення енергоспоживання - гармонійні спотворення та асиметрія фаз збільшують втрати енергії в кабелях і трансформаторах.
- ✓ Економічні збитки - несправність обладнання, необхідність ремонту або заміни та зупинка виробничих процесів можуть спричинити значні фінансові втрати.
- ✓ Зниження надійності систем - часті збої в роботі обладнання через погану якість енергії підривають довіру до енергопостачання.

Як запобігти впливу низької якості електроенергії:

1. Використання стабілізаторів напруги - захищають обладнання від провалів і перенапруг.
2. Фільтри гармонік - зменшують рівень гармонійних спотворень у мережі.
3. Джерела безперебійного живлення (UPS) - забезпечують живлення чутливих пристроїв під час провалів напруги чи коротких відключень.
4. Моніторинг параметрів мережі - регулярне вимірювання напруги, частоти та інших характеристик допомагає вчасно виявляти та усувати проблеми.
5. Вибір якісного обладнання - сучасні пристрої мають кращий захист від перепадів напруги та інших проблем мережі.

Забезпечення високої якості електроенергії — це інвестиція в ефективну, безпечну й довговічну роботу всіх електричних і електронних систем.

Висновки:

Якість електричної енергії є важливим аспектом електропостачання, що впливає на надійність та ефективність роботи електричних систем і обладнання. Ось декілька ключових висновків про якість електричної енергії:

1. Визначення якості електричної енергії. Якість електричної енергії визначається рядом параметрів, включаючи стабільність напруги, частоти, гармонійні спотворення, флікери, перехідні процеси та інші фактори. Висока

якість електроенергії забезпечує стабільну та надійну роботу електрообладнання.

2. Вплив якості електроенергії на обладнання. Низька якість електричної енергії може спричиняти передчасний знос, перегрів, зниження ефективності та вихід з ладу електричних пристроїв та систем. Це може призвести до додаткових витрат на обслуговування та ремонт обладнання.

3. Економічні наслідки. Низька якість електроенергії може призводити до значних економічних витрат для підприємств і споживачів. Це включає збільшення витрат на електроенергію, зниження продуктивності, витрати на ремонт та обслуговування обладнання, а також можливі штрафи за неякісне електропостачання.

4. Методи покращення якості електроенергії. Існує багато методів, які дозволяють покращити якість електричної енергії. Серед них використання стабілізаторів напруги, фільтрів гармонійних спотворень, конденсаторів для компенсації реактивної потужності, а також систем автоматичного регулювання напруги. Впровадження цих методів допомагає забезпечити стабільне та надійне електропостачання.

5. Моніторинг та аналіз. Постійний моніторинг і аналіз параметрів електричної енергії дозволяє вчасно виявляти та усувати проблеми, що виникають у мережі, забезпечуючи стабільну роботу споживачів. Використання сучасних технологій для моніторингу якості електроенергії допомагає знижувати ризики і підвищувати ефективність роботи електричних систем.

6. Роль стандартів. Існує багато національних та міжнародних стандартів, що регулюють вимоги до якості електричної енергії. Дотримання цих стандартів є важливим для забезпечення стабільного і надійного енергопостачання. Стандарти встановлюють вимоги до таких параметрів, як рівень гармонік, стабільність напруги, частота та інші аспекти, що впливають на якість електроенергії.

Підсумовуючи, якість електричної енергії є критично важливим фактором для забезпечення надійної та ефективної роботи електричних систем і обладнання. Впровадження методів покращення якості та дотримання стандартів допомагає знизити витрати, підвищити продуктивність та забезпечити стабільну роботу електропостачання.

Тема 2. Основні показники якості електричної енергії

- Частота напруги.
- Амплітуда напруги.
- Спотворення форми напруги та струму (гармонічні складові).
- Асиметрія напруги.
- Провали та перенапруги.

Основні показники якості електроенергії:

- відхилення частоти (Δf);
- відхилення встановленої напруги (δU_y);
- розмах зміни напруги;
- доза флікеру (P_t);
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги;
- коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги;
- коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності;
- коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю;
- тривалість провалу напруги;
- імпульсна напруга;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги.

Відхилення частоти (Δf)

Відхилення частоти напруги змінного струму електричних мережах характеризується показником відхилення частоти (Δf). Відхилення частоти від номінальної дорівнює різниці фактичного та номінального значень частоти.

Усереднене значення частоти - обчислюється як результат усереднення - спостережень (число спостережень має бути не менше 15) на інтервалі часу, що дорівнює 20 с, за формулою

$$f_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i \quad (1.1.)$$

Відхилення частоти Δf визначається за формулою:

$$\Delta f = f_y - f_{\text{ном}} \quad (1.2.)$$

де $f_{\text{ном}}$ – номінальне значення частоти, Гц;

У нормальних режимах допустимі значення відхилення частоти дорівнюють 0,2 Гц і максимально допустимі 0,4 Гц. В післяаварійних режимах роботи електричної мережі допускається відхилення частоти від +0,5 до -1 Гц загальної тривалістю за часом трохи більше 90 год.

Якість електричної енергії з відхилення частоти вважають відповідним вимогам ДСТ, якщо максимальне з усіх виміряних і усереднених за кожні 20 с протягом 24 год значень відхилення частоти не перевищує гранично

допустимих значень, а значення усередненого з ймовірністю 95 % не перевищує 90 годин.

При відхиленнях від номінальної частоти погіршується робота як джерел, так і споживачів електроенергії.

Відхилення встановленої напруги (δU_y)

Одним із параметрів якості електроенергії є відхилення напруги.

Відхилення напруги - це відхилення напруги від його номінального значення в режимі роботи електричних мереж, усереднений за розрахунковий інтервал.

Нормально і гранично допустимі значення відхилення напруги на висновках приймачів електроенергії складають, відповідно ДСТ, відповідно ± 5 і ± 10 % від номінальної напруги електричної мережі.

Відхилення напруги δU_y від номінального у визначається у відсотках від номінального $U_{\text{ном}}$:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% \quad (1.3.)$$

де U_y – встановлене діюче значення напруги.

Під дійсним значенням напруги розуміється:

- ✓ діюче значення основної частоти без урахування вищих гармонік, $U_{(1)}$ у мережах однофазного струму;
- ✓ діюче значення кожної фазної (міжфазної) напруги основної частоти $U_{(1)}$ або діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти $U_{1(1)}$ в мережах трифазного струму

При підвищенні напруги:

- ✓ виникає небезпека перегріву статорів асинхронних двигунів;
- ✓ зменшується термін служби ламп розжарювання (у 5 разів при збільшенні напруги на 10%);
- ✓ збільшується струм холостого ходу трансформаторів, що призводить до перегріву сердечників трансформаторів;
- ✓ збільшується споживання реактивної потужності вентильними перетворювачами (на 1...1,5 % при підвищенні напруги на 1 %).

При зниженні напруги:

- ✓ зменшуються крутні моменти асинхронних двигунів (на 19 % при зниженні напруги на 10%);
- ✓ можливе перегрів роторів асинхронних двигунів, зменшення їх пускових і перекидальних моментів, що може спричинити порушення технологічного процесу електроприймачів;

✓ зменшується світловий потік ламп розжарювання (на 30 % за зниження напруги на 10%;

✓ виникає перевитрата електроенергії та погіршується технологічний процес електропечей (в 1,5 рази при зниженні напруги на 7%).

Відхилення напруги визначається значенням відхилення напруги. Для значення відхилення напруги встановлені нижченаведені норми:

нормально допустимі і гранично допустимі значення відхилення напруги на висновках приймачів електроенергії рівні відповідно +5 і +10% від номінального напруги електричної мережі.

Значення відхилення напруги визначається за тривалості процесу більше однієї хвилини. Нормально допустимим відхиленням напруги вважається діапазон 5%, тобто: $\pm 5\%$ (від 209 В до 231 В). Гранично допустимим відхиленням напруги вважається діапазон 10%, тобто: $\pm 10\%$ (від 198 до 242 В).

Для певних вище показників якості електроенергії діють такі нормативи: позитивні та негативні відхилення напруги в точці передачі електричної енергії не повинні перевищувати 10% номінального або узгодженого значення напруги протягом 100% часу інтервалу протягом одного тижня.



Рисунок 1.1. – Відхилення напруги

Коливання напруги

Одним із параметрів якості електроенергії є коливання напруги.

Коливання напруги характеризуються такими показниками:

➤ розмахом зміни напруги;

➤ дозою флікера.

Значення коливання напруги мають ті самі норми, що й відхилення напруги з єдиною відмінністю: тривалість процесу менше однієї хвилини. Нормально допустимим коливанням напруги вважається діапазон 5%, тобто: $\pm 5\%$ (від 209 В до 231 В). Гранично допустимим коливанням напруги вважається діапазон 10%, тобто: $\pm 10\%$ (від 198 до 242 В).



Рисунок 1.2. – Коливання напруги

Доза флікеру

Доза флікера є новим параметром якості електроенергії, характеризує коливання напруги. Флікер - це суб'єктивне сприйняття людиною коливань світлового потоку штучних джерел освітлення, викликаних коливаннями напруги в електричній мережі. Доза флікера визначає міру сприйнятливості людини до впливу флікера за певний проміжок часу і є інтегральною характеристикою коливань напруги.

Дозу флікера вимірюють спеціальним приладом - флікерметром, а при його відсутності дозу коливань напруги визначають за кривими, показаними на рис. 1.2, залежно від розмаху та частоти зміни напруги

Несинусоїдальність напруги

Несинусоїдальність напруги, згідно з ДСТ, характеризується двома показниками: коефіцієнтом спотворення синусоїдальності на напруги і коефіцієнтом n -й гармонійної складової напруги.

Коефіцієнт n -й гармонійної складової напруги

Коефіцієнт гармонійної складової n напруги $K_{U(n)}$ визначається як результат усереднення значень $K_{U(n)i}$ у замірі i на інтервалі часу в 3 с. Кількість спостережень N повинна бути не менше 9:

$$K_{U(n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (K_{U(n)i})^2}{N}} \quad (1.4)$$

де $K_{U(n)i}$ знаходиться по результатам заміру i у відсотках по формулі:

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{(1)i}} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

У виразі (1.5) $K_{U(n)i}$ - діюче значення гармонійної складової напруги. Вимірювання коефіцієнта гармонійної складової - проводиться для фазних або міжфазних напруг.

Якість електроенергії за коефіцієнтом гармонійної складової n напруги відповідає ДСТ. Вимір коефіцієнта гармонійної складової n відповідає ДСТ, якщо максимальне з усіх вимірних усереднених значень $K_{U(n)i}$ не перевищує гранично допустимих значень, а усереднене значення $K_{U(n)}$ з ймовірністю 95% нормально допустимих значень (таблиця 1.3.)

Таблиця 1.3. - Нормально допустимі значення коефіцієнта n – і гармонійної складової, %

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
не кратні 3		кратні 3			
порядок	відносна амплітуда	порядок	відносна амплітуда	порядок	відносна амплітуда
5	6,0%	3	5,0%	2	2,0%
7	5,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	15	1,5%	6...24	0,5%
13	3,0%	21	0,5%		
17	2,0%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

Несиметрія напруг

Несиметрія напруг, згідно з ДСТ, характеризується двома показниками: коефіцієнтом несиметрії напруг по зворотній послідовності (K_{2U}); коефіцієнтом несиметрії напруг по нульовій послідовності (K_{0U}).

Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності (K_{2U})

Коефіцієнтом несиметрії напруг по зворотній послідовності називається величина, що дорівнює відношенню напруги зворотної послідовності до номінальної напруги.

Значення коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності (K_{2U}) розраховується як результат усереднення N спостерегань (K_{2Ui}) (число спостерегань не менше 9) на інтервалі часу, який дорівнює 3 с, за формулою:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2Ui}^2}{N}} \quad (1.6.)$$

Значення коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю (K_{2Ui}) в кожному m спостереженні визначається у відсотках:

$$K_{2Ui} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100\% \quad (1.7)$$

де $U_{2(1)i}$ - діюче значення напруги зворотної послідовності основний частоти трифазної системи напруг в i - му спостереженні;

$U_{1(1)i}$ - діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти трифазної системи напруг в i - му спостереженні В, кВ.

Якщо коефіцієнт несинусоїдальності (1.13) не перевищує 5 %, то замість діючих значень напруги основної частоти допускається використання діючих значень напруги з урахуванням усіх гармонійних складових.

Нормально і гранично допустимі значення коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності в точках приєднання до електричним мережам рівні відповідно 2 та 4 %.

Якість електричної енергії за коефіцієнтом зворотної послідовності вважають відповідним вимогам ДСТ, якщо максимальне з усіх виміряних і усереднених за кожні 3 с протягом 24 годин значень коефіцієнтів несиметрії напруг за зворотною послідовністю не перевищує гранично допустимого значення, а значення усередненого коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю з ймовірністю 95 % не перевищує нормально допустимого значення.

Зворотна складова напруги виникає в мережах із суттєво несиметричними навантаженнями, наприклад, при живленні від мережі великих однофазних або двофазних електроприймачів. Складова зворотної послідовності напруги наводить у роторах машин змінного струму додаткові струми подвійної частоти. Ці струми призводять до додаткових втрат в обмотках роторів машин, їх перегріву та скорочення терміну служби. Крім того, виникають гальмівні моменти, що обертають, що позначається на роботі механізмів, що приводяться в дію машинами змінного струму.

Коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності (K_{0U})

Коефіцієнтом несиметрії напруг за нульовою послідовністю називається величина, що дорівнює відношенню напруги нульової послідовності до номінальної фазної напруги.

Значення коефіцієнта несиметрії за нульовою послідовністю K_{0U} обчислюється як результат усереднення N спостереження K_{0Ui} (число спостережень повинно бути не менше 9) на інтервалі часу, що дорівнює 3 с, за формулою:

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{0Ui}^2}{N}} \quad (1.8)$$

Значення коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю (K_{0Ui}) в кожному m спостереженні визначається у відсотках:

$$K_{0Ui} = \frac{U_{0(1)i}}{U_{\text{ном.ф.}}} \cdot 100\% \quad (1.9)$$

де $U_{0(1)i}$ - діюче значення напруги зворотної послідовності основний частоти трифазної системи напруг в i -му спостереженні;

$U_{\text{ном.ф.}}$ - діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти трифазної системи напруг в i -му спостереженні В, кВ.

Якщо коефіцієнт несинусоїдальності не перевищує 5 %, то замість діючих значень напруг основної частоти допускається використання діючих значень напруг з урахуванням усіх гармонійних складових.

Нормально і гранично допустимі значення коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю в точках приєднання до чотирьохпровідних електричних мереж з номінальною напругою 0,38 кВ рівні відповідно 2,0 та 4,0 %.

Якість електричної енергії за коефіцієнтом нульової послідовності вважають відповідним вимогам ГОСТ 13109-97, якщо максимальна з усіх виміряних і усереднених за кожні 3 с протягом 24 годин значень коефіцієнтів несиметрії напруг за нульовою послідовністю не перевищує гранично допустимого значення, а значення усередненого коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю з імовірністю 95 % не перевищує нормально допустимого значення.

Напруга нульової послідовності виникає в мережах низьких напруг з нейтральним провідником при суттєво несиметричних навантаженнях, а також у мережах напругою до 35 кВ із незаземленою нейтраллю (або заземленою через заземлюючий реактор) при замиканні на землю. Струм у нейтральному провіднику, рівний триразовому струму нульової послідовності, істотно збільшує навантаження нульового дроту і призводить до підвищених втрат потужності в мережі та значних зниження напруги.

Провал напруги

Одним із параметрів якості електроенергії є провал напруги. Провал напруги визначається показником часу провалу напруги.

Провал напруги - це раптове зниження напруги в точці електричної мережі нижче $0,9 \cdot U_{\text{ном}}$, за яким слідує відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня через проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд.

Провал напруги характеризується показником - тривалістю провалу напруги ($\Delta t_{\text{п}}$), а також глибиною ($\Delta U_{\text{п}}$) і частотою появи провалів напруги (рис. 1.4).

Гранично допустиме значення тривалості провалу напруги в електромережах напругою до 20 000 В включно дорівнює 30 секунд. Тривалість автоматичного усунення провалу напруги в будь-якій точці приєднання до електричних мереж визначається витримками часу релейного захисту та часом спрацювання автоматики.

Провал напруги визначається, коли напруга знижується до значення $0,9U$ і характеризується тривалістю процесу. Гранично допустима тривалість – 30 секунд. Глибина провалу іноді може сягати і 100%.

Тривалість провалу напруги - це інтервал часу між початковим моментом провалу напруги і моментом відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня.

Глибина провалу напруги дорівнює різниці між номінальним значенням напруги та мінімальним середньоквадратичним значенням напруги протягом провалу напруги.

Частота появи провалів напруги це кількість провалів напруги певної глибини та тривалості за певний проміжок часу.

Тривалість автоматичного усунення провалу напруги в будь-якій точці приєднання до електричних мереж, згідно з ДСТ, напругою до 110 кВ включно не повинна перевищувати гранично допустимого значення, що дорівнює 30 с.

Основними причинами виникнення провалів напруги є короткі замикання в мережі, що призводять до відключення елементів мережі, які можуть знову автоматично включитися. Напруга відновлюється або після відключення к. з. або після автоматичного відновлення живлення пристроями АПВ або АВР.

■ Падіння напруги нижче $0,9 \cdot U_{\text{НОМ}}$

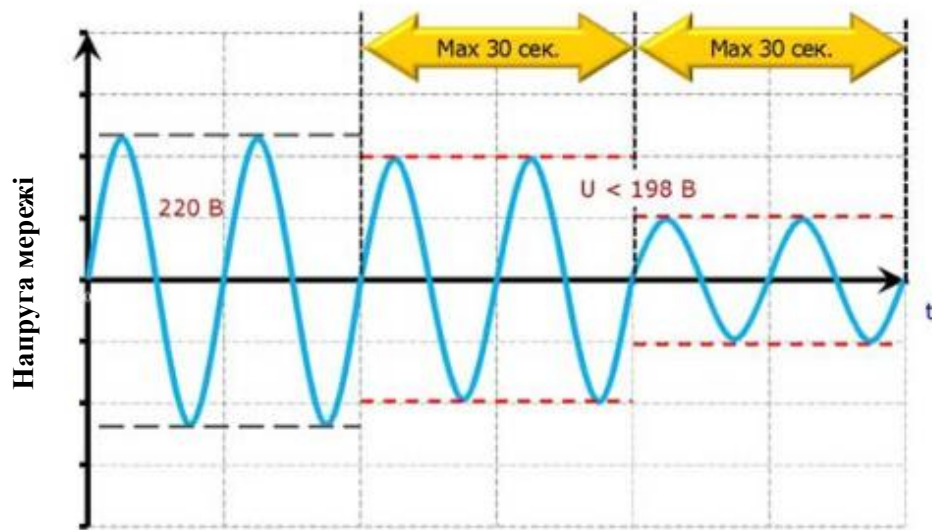


Рисунок 1.3. – Провал напруги

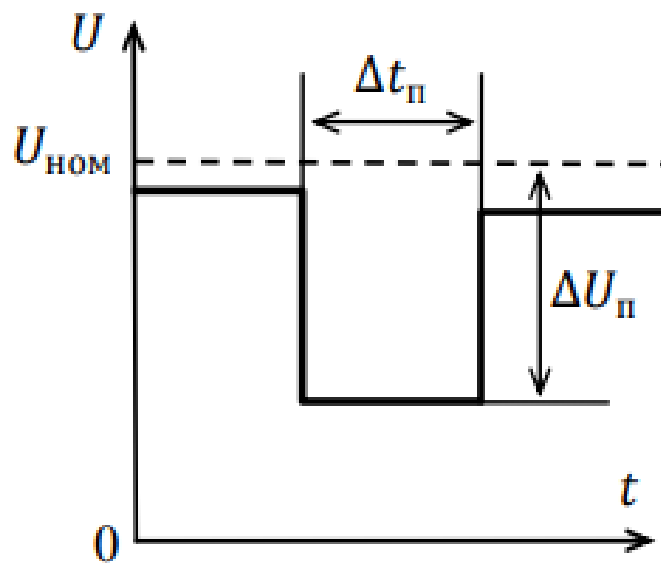


Рисунок 1.4. – Показники провалу напруги

Перенапруга

Тимчасова перенапруга визначається показником коефіцієнта тимчасової перенапруги.

Перенапруга характеризується амплітудним значенням напруги більше 342 В. Верхня межа значення напруги ДСТ не визначається. Тривалість тимчасового перенапруги – менше 1 секунди.

Тимчасова перенапруга - це підвищення напруги в точці електричної мережі тривалістю більше 10 мс, що виникає в системах електропостачання при комутаціях або коротких замикання.

Коефіцієнт тимчасової перенапруги ($K_{\text{пер}U}$) дорівнює рівню відношенню максимального значення амплітудних значень ($U_{\text{ампmax}}$), що огинає, за час існування тимчасової перенапруги до амплітуди номінальної напруги мережі ($U_{\text{ампном}}$). Вимірювання коефіцієнта тимчасового перенапруги проводиться у відносних одиницях за формулою:

$$K_{\text{пер}U} = \frac{U_{\text{ампmax}}}{U_{\text{ампном}}} \quad (1.10)$$

Тривалість короткочасного перенапруги ($\Delta t_{\text{пер}}$) визначається інтервалом часу між початковим моментом виникнення короткочасного перенапруги і моментом його зникнення.



Рисунок 1.5. - Перенапруга

Імпульс напруги

Імпульс напруги це різка зміна напруги в точці електричної мережі, за яким слідує відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня за проміжок часу до кількох мілісекунд.

Імпульс напруги характеризується показником імпульсної напруги ($U_{\text{імп}}$), а також амплітудою ($\Delta U_{\text{імп}}$), тривалістю імпульсу ($\Delta t_{\text{імп}}$) і тривалістю імпульсу на рівні 0,5 його амплітуди ($\Delta t_{\text{імп}0,5}$).

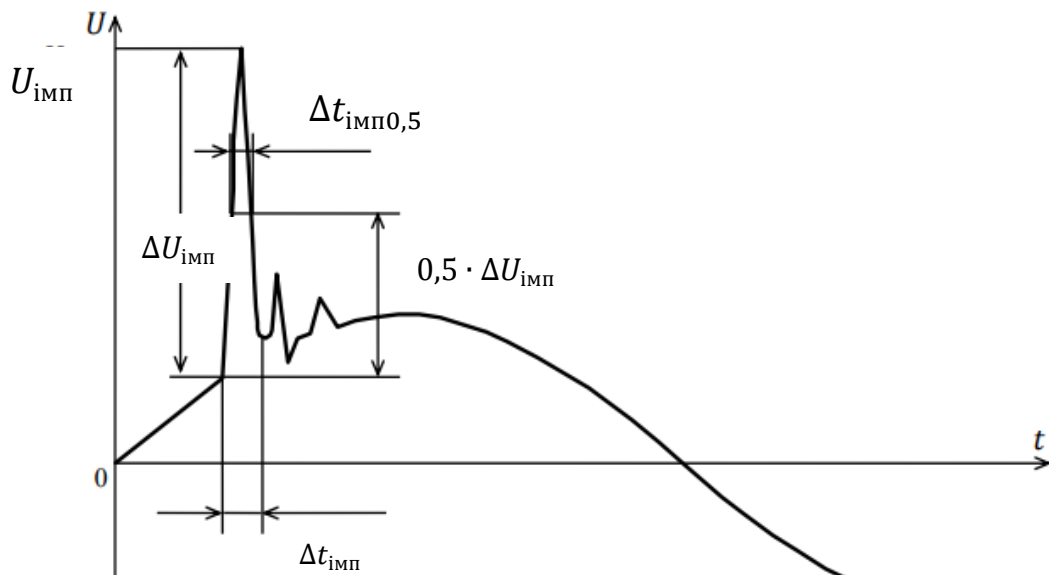


Рисунок 1.6. – Імпульс напруги

Імпульсна напруга - це максимальне миттєве значення напруги, що дорівнює сумі миттєвого значення напруги в мережі в момент початку імпульсу та амплітуди імпульсу. Амплітуда імпульсу це максимальне миттєве значення імпульсу напруги.

Тривалість імпульсу дорівнює інтервалу часу між початковим моментом імпульсу та моментом відновлення миттєвого значення напруги до початкового або близького рівня.

Тривалість імпульсу лише на рівні 0,5 його амплітуди дорівнює інтервалу часу між перетином кривої імпульсу з горизонтальним рівнем половині амплітуди.

Імпульси напруги виникають найчастіше внаслідок комутаційних перехідних процесів в електричній мережі, а також внаслідок роботи ланцюгів імпульсного управління напівпровідникових перетворювачів.

Імпульси напруги призводять до порушення роботи радіоелектронних пристроїв, у тому числі ЕОМ та напівпровідникових пристроїв з імпульсним керуванням.

Значення імпульсної напруги для грозових і комутаційних імпульсів, що виникають в електричних мережах енергопостачальної організації, наведено у довідковій літературі.

Висновки:

1. Стабільність напруги. Стабільність напруги є важливим показником, який визначає, наскільки постійною є напруга в мережі. Відхилення від номінальної напруги можуть призвести до зниження ефективності роботи обладнання або навіть його пошкодження. Регулярні коливання напруги можуть викликати перегрів електродвигунів, передчасний знос ізоляції та

інших компонентів, а також скорочення терміну служби електронних пристроїв. У промислових умовах нестабільна напруга може призвести до зупинки виробничих процесів і значних економічних втрат.

2. Частота. Частота електричної енергії повинна залишатися стабільною (наприклад, 50 Гц або 60 Гц залежно від регіону). Коливання частоти можуть негативно вплинути на роботу синхронних електродвигунів та інших пристроїв, що залежать від стабільної частоти. Відхилення частоти можуть спричиняти резонансні явища в електричних мережах, що призводить до збоїв у роботі обладнання та втрат ефективності.

3. Гармонічні спотворення. Гармонічні спотворення виникають через наявність високочастотних компонентів у струмі та напрузі. Вони можуть спричиняти перегрів обладнання, підвищені втрати енергії та зниження ефективності роботи електричних пристроїв. Гармонічні спотворення можуть також викликати перешкоди в роботі чутливого електронного обладнання, такого як комп'ютери та телекомунікаційні системи. Для зменшення впливу гармонік використовуються активні та пасивні фільтри, які допомагають підтримувати чистоту синусоїди напруги.

4. Флікери. Флікери – це короткотривалі коливання напруги, що можуть бути помітними як мерехтіння світла. Вони можуть спричиняти дискомфорт для користувачів та негативно впливати на роботу чутливого обладнання. Наприклад, флікери можуть викликати збої в роботі освітлювальних систем, що негативно впливає на умови праці та здоров'я людей. У промислових умовах флікери можуть спричинити збій в роботі машин і обладнання, що призводить до втрат продуктивності та якості продукції.

5. Перехідні процеси. Перехідні процеси, такі як імпульси напруги та струму, можуть виникати під час перемикань у мережі або внаслідок короточасних впливів, таких як блискавка. Вони можуть пошкоджувати електронні пристрої та викликати збої в їх роботі. Для захисту обладнання від перехідних процесів використовуються різні засоби, такі як обмежувачі перенапруги, фільтри та стабілізатори напруги.

6. Несиметрія напруги. Несиметрія напруги виникає, коли напруги в різних фазах електричної мережі відрізняються одна від одної. Це може спричиняти нерівномірне навантаження на обладнання і знижувати його ефективність та термін служби. Наприклад, у трифазних системах несиметрія напруги може призвести до перегріву електродвигунів, зниження їх потужності та збільшення втрат енергії. Для зменшення впливу несиметрії використовуються балансувачі пристроїв, стабілізатори напруги та інші засоби.

Розуміння та контроль основних показників якості електричної енергії є важливими для забезпечення стабільної та ефективної роботи електричних систем. Це дозволяє знизити втрати енергії, підвищити надійність обладнання та зменшити витрати на ремонт та обслуговування.

Тема 3. Фактори, що впливають на якість електричної енергії.

Методи контролю та аналізу якості електричної енергії

- Нерівномірний розподіл навантаження.
- Перехідні процеси в електричних мережах.
- Гармонічні спотворення, створені нелінійними навантаженнями.
- Електромагнітні завади.
- Вимірювальні прилади та пристрої для оцінки якості електричної енергії.
- Методи спектрального аналізу для виявлення гармонічних складових.
- Моніторинг параметрів якості електричної енергії в реальному часі.

Нерівномірний розподіл навантаження

Нерівномірний розподіл навантаження в електричних мережах може призвести до різноманітних проблем, таких як перегрів проводів, зниження ефективності роботи обладнання та навіть виникнення аварійних ситуацій. Ось деякі ключові моменти, що стосуються цієї проблеми:

1. **Перегрів проводів.** Нерівномірне навантаження призводить до того, що деякі проводи працюють під більшим навантаженням, що може викликати їх перегрів. Це, в свою чергу, збільшує ризик виникнення коротких замикань та пожеж.

2. **Зниження ефективності обладнання.** Електрообладнання, таке як трансформатори та генератори, розраховане на рівномірне навантаження. При нерівномірному розподілі може виникнути перенапруга або недостатня напруга, що негативно впливає на роботу обладнання і може зменшити його термін служби.

3. **Аварійні ситуації.** Нерівномірний розподіл навантаження може призвести до виникнення аварійних ситуацій, таких як вихід з ладу обладнання або відключення електроенергії на великих ділянках мережі.

Для вирішення цієї проблеми існують декілька підходів:

- **Балансування навантаження.** Впровадження систем автоматичного управління для балансування навантаження між різними частинами мережі.
- **Використання сучасних технологій.** Впровадження інтелектуальних лічильників та систем моніторингу, що дозволяють оперативно виявляти та усувати дисбаланси.
- **Регулярне обслуговування.** Проведення регулярного обслуговування та перевірок для виявлення і усунення потенційних проблем.

Нерівномірний розподіл навантаження є серйозною проблемою, яка потребує комплексного підходу для її вирішення та забезпечення надійної роботи електричних мереж.

Перехідні процеси в електричних мережах

Несиметричним режимом роботи трифазної системи називається режим, за якого умови роботи фаз неоднакові. Несиметричні режими можуть бути тривалими та короткочасними. Короткочасні несиметричні режими пов'язані з аварійними процесами, тривалі обумовлені наявністю несиметрії в елементах електричної мережі.

Причинами несиметрії можуть бути:

- ✓ несиметрія джерел струму;
- ✓ неповнофазні режими елементів електричних мереж;
- ✓ електроприймачі з різними навантаженнями по фазах.

Розвиток промислової та комунальної енергетики характеризується зростанням числа та потужності електроустановок з несиметричним навантаженням, що погіршує роботу інших електроприймачів.

Несиметрія може бути поздовжньою, пов'язаною з пофазним відключенням ліній і трансформаторів, і поперечною, обумовленою несиметрією на вантаж по фазах.

Найчастіше в системах електропостачання зустрічається несиметрія, обумовлена навантаженням, різним за фазами. Зазвичай це електроприймачі, виготовлення яких у трифазному виконанні нераціонально за техніко-економічними показниками. До них відносяться індукційні електропечі, електрифікований транспорт на змінному струмі, комунальні навантаження, однофазні двигуни у сільському господарстві.

Електричні мережі систем електропостачання залежно від класу номінальної напруги мають різне виконання і відповідно по-різному реагують на несиметрію навантажень.

Електричні мережі систем електропостачання промислових, комунальних та сільськогосподарських споживачів на напругу до 1000 В виконуються три- та чотирипровідними. Режими роботи таких мереж при симетричному навантаженні однакові, а при несиметричному – різні.

При несиметрії навантажень і симетрії напруги трансформатора живлення в лінійних проводах виникають різні струми.

Якщо значення коефіцієнтів зворотної чи нульової послідовності напруги перевищує 2...4 %, їх обмеження проводиться за допомогою симетруючих пристроїв або схемних рішень.

Включення несиметричних навантажень, особливо великих таких, як дугові сталеплавильні печі, електрифіковані залізниці на змінному струмі, - викликає несиметрію струмів і напруг.

Енергосистеми повинні забезпечувати симетрію напруг у межах ДСТ.

При несиметричному режимі напруги у трифазних мережах з'являються струми зворотної та нульової послідовності. Струми зворотної послідовності створюють в електричних машинах зворотне синхронне поле частотою 100 Гц, що наводить ЕРС, струми потрійної частоти і спектр всіх непарних гармонік у статорі, а в обмотках ротора - спектр парних гармонік, що викликають додаткові втрати та нагрівання машин. Тому робота синхронних генераторів і компенсаторів допускається лише за відмінності струмів фаз лише на 10 %. Крім того, струми та напруги зворотної послідовності в синхронних та асинхронних машинах викликають вібрацію, зворотне поле створює протидіючий момент, що знижує корисний.

При несиметрії напруги у 4 % термін служби асинхронних двигунів знижується вдвічі, сильно падає ККД.

Погіршується робота трифазних вентильних мостів (випрямлячів). Через різницю величини фазних напруг значно зростає пульсація випрямленої напруги. Крім того, несиметрія негативно впливає на систему імпульсно-фазового управління тиристорними перетворювачами.

При несиметрії напруг нерівномірно завантажуються по фазах конденсаторні батареї, внаслідок чого їх повне цінне використання неможливе. При цьому батареї збільшують несиметрію навантаження, видаючи велику реактивну потужність тих фазах, де вище напруга, тобто менше навантаження. Освітлення працює в ненормальних умовах, так як частина ламп функціонує зі зниженим світловим потоком, а інша частина швидко перегорає, тому що перші включені на фази зі зниженим, а другі з підвищеною напругою.

Гармонічні спотворення, створені нелінійними навантаженнями

Проблема забезпечення синусоїдальності струму та напруги у живильних мережах енергосистем та мережах електропостачання виникла у зв'язку із застосуванням потужних електроприймачів з нелінійною вольтамперною характеристикою, таких як електрозварювання, сталеплавильні печі, некеровані та особливо керовані вентильні перетворювачі. В даний час проблема виникнення вищих гармонік є однією з важливих частин загальної проблеми електромагнітної сумісності приймачів електроенергії з живильною електричною мережею.

Спотворення кривої напруги в електричних мережах призводять до наступних негативних наслідків:

- ✓ з'являються додаткові втрати потужності в лініях живлення, трансформаторах, батареях конденсаторів тощо;
- ✓ відбувається прискорення старіння ізоляції електричних машин, апаратів та кабелів, що призводить до зменшення надійності та терміну служби електроустаткування;
- ✓ погіршується точність електричних вимірів;
- ✓ з'являються порушення в роботі автоматики, телемеханіки та релейної захисту;
- ✓ утруднюється, а в ряді випадків стає неможливим використання силових ланцюгів як канали передачі інформації;
- ✓ погіршується, а іноді й порушується робота приймачів електроенергії, у тому числі і тих, які створюють несинусоїдальність в електричних мережах;
- ✓ обмежується, а в ряді випадків стає неможливим застосування батарей конденсаторів через перевантаження їх струмами вищих гармонік та виникнення резонансних явищ.

Вентильні (переважно тиристорні) перетворювачі є одним з основних джерел несинусоїдальності. Характерна особливість цих пристроїв - споживання ними з мережі несинусоїдальних струмів при підведенні до їх затисків синусоїдальної напруги.

Електромагнітні завади

Електромагнітні завади виникають як через природні явища, так і в результаті технічних процесів. Наприклад, природними завадами можуть бути атмосферні розряди (електромагнітні імпульси, що виникають при ударах блискавки) або електростатичні розряди. Останні особливо важливі в напівпровідниковій електроніці. В промисловому обладнанні основним джерелом завад є процеси перемикання в електричних ланцюгах, які супроводжуються швидкими змінами струмів і напруг. Це призводить до появи електромагнітних завад, які можуть бути як періодичними, так і випадковими. Вплив цих завад може бути як кондуктивним (наведення струмів або напруг у провідниках), так і радіаційним (вплив змінного електромагнітного поля) [17].

Кондуктивні завади можна розділити на симетричні (диференціальні) і асиметричні (синфазні). Симетричні завади виникають, коли наведені струми мають однакову амплітуду і протікають у зворотних напрямках. Асиметричні

завади замикаються на землю або протікають по провіднику в одному напрямку [17].

Електромагнітний зв'язок між джерелом та приймачем перешкод може виникати в результаті:

- гальванічного зв'язку (найбільш поширений випадок), що створює симетричні перешкоди;
- ємнісний зв'язок, що виникає внаслідок впливу змінного електричного поля на паразитні конструктивні ємності;
- індуктивного зв'язку, викликаного перебуванням провідника, яким тече струм, у змінному магнітному полі;
- електромагнітної зв'язку, яка може мати кондуктивний характер (виникає як наведення на провідники у кабельних жгутах або на провідні доріжки друкованої плати) або поширюється шляхом випромінювання (якщо ширина зазору між джерелом і приймачем перешкоди перевищує 0.1 довжини хвилі випромінювання λ) [17].

Існує безліч норм і вимог, спрямованих на забезпечення електромагнітної сумісності обладнання. Вони включають регулювання характеристик вимірювальних приладів, параметрів тестових систем і методик вимірювань перешкод різного характеру. При визначенні методики випробувань електричних пристроїв на електромагнітну сумісність ці норми встановлюють критерії, на основі яких можна зробити висновок, що випробовувані пристрої відповідають вимогам ЕМС.

Стандартизація вимог щодо електромагнітної сумісності здійснюється на міжнародному, європейському та національних рівнях. На світовому рівні основне навантаження лежить на ISO (Міжнародній організації зі стандартизації) та IEC (Міжнародній електротехнічній комісії, МЕК), підрозділом якої є CISPR (Міжнародний спеціальний комітет з боротьби з радіоперешкодами). На європейському рівні цю роботу виконують CEN (Європейський комітет зі стандартизації), CENELEC (Європейський комітет з електротехнічних стандартів) та ETSI (Європейський інститут зі стандартизації у галузі телекомунікацій) [17].

Напівпровідникові інтегральні мікросхеми є відносно новим об'єктом стандартизації електромагнітної сумісності (ЕМС), що потребує введення специфічних обов'язкових вимог щодо їх сумісності. Вимоги до електромагнітної сумісності для цих мікросхем схожі з вимогами до інших пристроїв та компонентів, проте як окремі компоненти вони рідко використовуються лише в одній сфері застосування. Наразі Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК) розробила дві групи нормативів: одну для

стандартизації методик вимірювання випромінюваних завад (стандарт ІЕС 61967), і іншу для завадостійкості інтегральних схем (стандарт ІЕС 62132) [17].

При вирішенні питань, пов'язаних зі спотвореннями, слід враховувати, що технічні засоби придушення спотворень або захисту від них можуть бути реалізовані:

- біля джерел спотворень (індивідуальні пристрої);
- в електричній мережі (потужні централізовані пристрої);
- у споживачів електроенергії, чутливих до спотворень (буферні пристрої для підвищення рівня захисту від спотворень).

Стандарти електромагнітної сумісності можуть бути поділені на дві основні групи:

- ті, що встановлюють допустимий рівень спотворень у мережі;
- ті, що встановлюють правила підключення до мережі обладнання, яке створює спотворення [17].

Кожен споживач електроенергії має характеризуватися відношеннями рівнів сприятливості та стійкості до спотворень, відповідно до рівня електричної сумісності.

Для забезпечення електромагнітної сумісності:

- визначають амплітуди гармонік і оцінюють сумарний вплив кількох гармонік;
- оцінюють загальний рівень спотворень та дозволений індивідуальний внесок споживача в напругу n-ої гармоніки у точці загального підключення;
- визначають частотні характеристики елементів мережі та вузлів навантажень; оцінюють сумісний вплив на коливання напруги кількох дугових сталеплавильних печей (ДСП);
- встановлюють допустимий термін перерви живлення.

Дозволений індивідуальний внесок в стандартах різних країн визначається по-різному. В Австралії конкретному споживачу, який живиться від мережі напругою 22-66 кВ, дозволяється вносити в мережу спотворення, які не перевищують 1/3 від норми електромагнітної сумісності. Залишки 2/3 враховують вже існуючий рівень спотворень та вклад майбутніх навантажень. В мережах 110 кВ і вище на майбутні навантаження відносять від 60 до 80% норми електромагнітної сумісності [17].

У Франції споживачі електроенергії повинні дотримуватися наступних норм: не вносити спотворення більше 1,6% (що дорівнює 1/3 від допустимої норми у 5%), при цьому вклад на кожну парну гармоніку не повинен перевищувати 0,6%, а на непарну — 1%.

В Англії підключення споживачів без коригуючих пристроїв дозволяється до моменту досягнення нормованого рівня електромагнітної сумісності у точці загального підключення. Подальші споживачі повинні передбачати встановлення коригуючих пристроїв [17].

Вимірювальні прилади та пристрої для оцінки якості електричної енергії

Для оцінки якості електричної енергії використовуються різні вимірювальні прилади та пристрої:

1. **Аналізатори параметрів якості електроенергії:** Ці прилади використовуються для вимірювання та аналізу різних параметрів електричної енергії, таких як напруга, струм, частота, фази та гармоніки. Наприклад, аналізатори PQM-700UA, PQM-710UA та PQM-711UA2 [21].

2. **Цифрові вольтметри та амперметри** - використовуються для точного вимірювання напруги та струму в електричних мережах.

3. **Лічильники електроенергії** - використовуються для обліку кількості використаної електроенергії [20].

4. **Індикатори повороту фази** - використовуються для визначення правильного порядку фаз у мережі [22].

5. **Сигнальна арматура** - використовується для відображення стану електричної мережі та виявлення порушень [22].

Ці прилади допомагають забезпечити стабільність та якість електричної енергії, що є важливим для роботи практично будь-яких електронних пристроїв та обладнання.

Аналізатор параметрів якості електроенергії SATEC PM175 [18]

Аналізатор якості енергії PM175 призначений для вимірювання та реєстрації основних параметрів електричної енергії та потужності, у тому числі показників якості електричної енергії, в системах електропостачання загального призначення.

Аналізатори задовольняють вимогам стандартів ДСТУ OIML D11:2012, ДСТУ EN 62052-11:2015, ДСТУ EN 62053-22:2015 і технічної документації фірми SATEC LTD, Ізраїль.

Аналізатори можуть бути підключені через вимірювальні трансформатори струму та напруги. Основним застосуванням є моніторинг та запис параметрів енергії в мережах низької та середньої напруги [18].

PM175 вимірює, обчислює і реєструє всі показники якості електричної енергії визначені в ДСТУ OIML D11:2012, ДСТУ EN 62052-11:2015, ДСТУ EN 62053-22:2015 [18]:

- ✓ Стале відхилення напруги в режимах найбільшою, найменшою і добового навантаження;
- ✓ Викривлення синусоїдальності кривої напруги;
- ✓ Коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги;
- ✓ Несиметрія напруг зворотної та нульової послідовності;
- ✓ Відхилення частоти;
- ✓ Розмах зміни напруги та доза флікера;
- ✓ Провали напруги;
- ✓ Імпульсна напруга і тимчасові перенапруги [18].

Аналізатор параметрів якості електричної енергії PQM-700UA з сертифікатом клас S [19]

Аналізатор параметрів якості електричної енергії використовуються для проведення реєстрації та аналізу основних параметрів якості електричної енергії в мережах електропостачання [19].

Основні характеристики [19].

- ✓ клас S
- ✓ годинник реального часу $\pm 0,3$ с / 24 години;
- ✓ автоматичне формування протоколів реєстрації;
- ✓ ступінь захисту корпусу IP65.

Вимірювання і реєстрація [19]:

✓ напруги постійного і змінного струму $L1, L2, L3, N$ (чотири вимірювальних входу). Мінімального, максимального, середнього і миттєвих значень напруги. Можливо спільне використання з трансформаторами напруги [19];

✓ сили постійного і змінного струму $L1, L2, L3, N$ (чотири вимірювальних входу). Мінімального, максимального, середнього і миттєвих значень сили струму. Можливо спільне використання з трансформаторами струму. Діапазон вимірювання залежить від типу струмовимірювальних кліщів: гнучкі кліщі F-1, F-2, F-3 (до 3000 А АС, відрізняються максимальним діаметром обхвату), кліщі C-4 (1000 А АС) і кліщі C-6 (10 А АС), C-7 (100 А АС) [19].

- ✓ коефіцієнта пікових значень напруги і струму;
- ✓ частоти від 40 Гц до 70 Гц;
- ✓ потужності: активної (P), реактивної (Q), потужності спотворень (D), повної (S);
- ✓ енергії: активної (EP), реактивної (EQ), повної (ES);
- ✓ коефіцієнта потужності $\cos\varphi, \tan\varphi$;
- ✓ коефіцієнта гармонійних втрат (K – фактор);

- ✓ до 40-ї гармоніки напруги і струму;
- ✓ сумарного коефіцієнта гармонійних складових напруги THD U і THD I;
- ✓ короткочасної та тривалої дози флікера P_{st} і PLT ;
- ✓ несиметрії по струму і напрузі;
- ✓ перенапруг, провалів, переривань з можливістю збереження осцилограм;
- ✓ осцилограмм струму і напруги для кожного періоду усереднення [19].

Конфігурація аналізатора [19]:

- ✓ можливість налаштування вимірювального приладу та формування протоколу вимірювань;
- ✓ установка номінальних параметрів мережі: напруга (фазна / лінійне), частота, тип мережі;
- ✓ установка параметрів трансформаторів напруги та / або струму;
- ✓ вибір періоду усереднення;
- ✓ розклад запуску і зупинки реєстрації;
- ✓ установка типу струмовимірювальних кліщів;
- ✓ умова запуску реєстрації: безпосереднє, порогове значення, відповідно до розкладу;
- ✓ режим вимірювання в реальному часі;
- ✓ широкий набір налаштувань представлення та аналізу (звітів) даних реєстрації.

Призначення і область застосування [19]:

RQM-700UA розроблений для проведення реєстрації та аналізу основних параметрів якості електричної енергії в мережах з номінальними частотами 50/60 Гц [19].

RQM-700UA адаптований для роботи в складних погодних умовах, не сприйнятливий до електричних полів (можлива установка безпосередньо на ЛЕП). Ступінь захисту корпусу відповідає IP65 [19].

Конструкція реєстратора дозволяє йому працювати при температурі від -20°C до + 55°C. Стабільна робота при негативних температурах забезпечується за рахунок вбудованого підігріву [19].

У разі відключення зовнішнього живлення, робота вимірювача буде підтримуватися за рахунок внутрішньої Li-Ion (літій-іонної) акумуляторної батареї [19].

Методи спектрального аналізу для виявлення гармонічних складових

Для виявлення гармонічних складових в електричних сигналах використовуються різні методи спектрального аналізу. Ось більш детальна інформація про деякі з них:

✓ Фур'єве перетворення (FFT) - це один з найбільш поширених методів спектрального аналізу. Він базується на математичному перетворенні, яке перетворює часовий сигнал у частотну область. Основною перевагою FFT є його швидкість та точність при обробці цифрових сигналів. За допомогою цього методу можна визначити частоти та амплітуди гармонічних складових сигналу.

✓ Віконний метод - цей метод використовує віконні функції для обмеження аналізу частини сигналу. Наприклад, метод Хеннінга або метод Хеммінга використовуються для зменшення побічних ефектів, таких як витік енергії гармонік. Віконні методи дозволяють покращити точність спектрального аналізу для неперервних сигналів.

✓ Дискретне пряме синтезування (DDS) - цей метод дозволяє генерувати синусоїдальні сигнали з високою точністю за допомогою цифрових синтезаторів. DDS використовується для створення гармонічних складових з заданою частотою та амплітудою, що дозволяє більш точно контролювати параметри сигналу.

✓ Спектральні аналізатори - це спеціальні прилади, які використовуються для аналізу спектру сигналу в режимі реального часу. Вони можуть визначати частоти та амплітуди гармонічних складових з високою точністю. Спектральні аналізатори часто використовуються для вимірювання гармонік у промислових електричних мережах.

✓ Аналізатори імпедансу - ці прилади вимірюють імпеданс електричних мереж і дозволяють виявляти гармонічні складові через аналіз спектру сигналу. Аналізатори імпедансу можуть бути корисними для виявлення проблем, пов'язаних з гармонічними спотвореннями в мережах.

Ці методи та прилади допомагають забезпечити точний аналіз та контроль якості електричної енергії, що є важливим для стабільної роботи електронних пристроїв та обладнання. Вони також сприяють зменшенню впливу гармонічних спотворень на електромережу, що підвищує надійність і ефективність енергопостачання.

Моніторинг параметрів якості електричної енергії в реальному часі

Моніторинг параметрів якості електричної енергії в реальному часі здійснюється за допомогою спеціалізованих систем і приладів, які забезпечують постійне вимірювання та аналіз параметрів електричної мережі:

✓ Встановлення датчиків і вимірювальних приладів - на критичних точках електричної мережі встановлюють датчики, аналізатори та інші прилади, які вимірюють параметри якості електроенергії, такі як напруга, струм, частота, гармонічні спотворення, флікери, небалансування фаз тощо.

✓ Збір даних - вимірювальні прилади передають дані в режимі реального часу на центральні сервери або контролери. Ці дані збираються і обробляються для подальшого аналізу.

✓ Аналіз даних - зібрані дані аналізуються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Це дозволяє виявляти будь-які відхилення від норм, такі як перевищення рівня гармонік або інші аномалії.

✓ Відображення та моніторинг: Оператори системи можуть переглядати дані в реальному часі на моніторах або дисплеях. Графіки та діаграми дозволяють візуально оцінити стан електричної мережі та швидко виявити проблемні ділянки.

✓ Повідомлення та тривоги - системи моніторингу налаштовані на автоматичне відправлення повідомлень або тривог у разі виявлення критичних відхилень від норм. Це дозволяє операторам швидко реагувати та вживати необхідних заходів для усунення проблем.

✓ Коригувальні заходи - в разі виявлення проблем, оператори можуть вживати коригувальних заходів, таких як регулювання навантаження, встановлення додаткових фільтрів гармонік або коригуючих пристроїв для забезпечення стабільності та якості електроенергії.

Моніторинг якості електричної енергії в реальному часі є важливим інструментом для забезпечення стабільної та надійної роботи електромереж і запобігання потенційним проблемам, які можуть впливати на електропостачання та роботу електронного обладнання.

Кодекс системи розподілу (КСР) передбачає перевірку якості електроенергії через вимірювання частоти, напруги, небалансу напруги, гармонічних спотворень, флікерів (мерехтіння), а також фіксацію провалів напруги та перенапруги [23].

Моніторинг у системі розподілу покладено на оператора системи розподілу (ОСР) відповідно до п. 6.3.1 КСР [23].

Система моніторингу має базуватися на даних, отриманих регулярно за допомогою стаціонарних засобів або вибірково за допомогою переносних засобів [23].

При виборі точок вимірювання якості електроенергії ОСР враховує [23]:

- ✓ збалансований розподіл місць встановлення вимірювальних засобів для моніторингу якості електроенергії (географічно та кількісно) на території ліцензованої діяльності;

- ✓ пріоритетність встановлення вимірювальних засобів у районах з високою концентрацією обладнання, чутливого до змін якості електроенергії, або в місцях, де ймовірні проблеми з якістю електроенергії.

ОСР здійснює вибір точок для вимірювання параметрів якості електроенергії за такими критеріями [23]:

- ✓ Щорічно на шинах середньої напруги кожної підстанції ВН/СН (висока напруга/середня напруга).

- ✓ Не рідше одного разу на чотири роки на шинах середньої напруги кожної підстанції СН/СН (середня напруга/середня напруга).

- ✓ Щорічно на не менше ніж 1% точок приєднання споживачів середньої напруги.

- ✓ Щорічно на не менше ніж 0,5% підстанцій СН/НН (середня напруга/низька напруга) на одній із шин низької напруги.

Період часу, протягом якого здійснюється вимірювання якості електричної енергії (у випадку встановлення переносного засобу), має становити не менше одного тижня.

Також ОСР щороку до 01 листопада розробляють та надають Національній комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) Програму моніторингу якості електричної енергії в системі розподілу на наступний рік [23].

Програма моніторингу якості електричної енергії в системі розподілу повинна містити, у тому числі [23]:

- ✓ кількість задіяних вимірювальних засобів (стаціонарних та портативних), їх назви та клас характеристики процесу вимірювання [23];

- ✓ перелік обладнання та точок приєднання, на яких будуть встановлюватись (встановлені) вимірювальні засоби, та період часу, протягом якого буде проводитись вимірювання параметрів якості електричної енергії [23];

- ✓ кількість електронних лічильників, що здійснюють вимірювання і запис параметрів відхилення напруги, дані яких будуть використані для моніторингу якості електричної енергії у звітному періоді [23].

Висновки:

Методи оцінки якості електричної енергії. Для оцінки якості електричної енергії використовуються різні методи та інструменти, такі як:

- Аналізатор гармонік: Вимірює рівень гармонічних спотворень у мережі.
- Монітори якості енергії: Відстежують і записують різні параметри електроенергії, включаючи напругу, частоту, перехідні процеси тощо.
- Логери напруги: Записують зміну напруги протягом часу для виявлення нестабільності та флікерів.

Нормативні документи та стандарти

Існують різні міжнародні та національні стандарти, що регулюють якість електричної енергії:

- IEC 61000: Міжнародні стандарти на електромагнітну сумісність (EMC), які включають вимоги до гармонік, флікерів, перехідних процесів та інших параметрів якості електричної енергії.
- IEEE 519: Стандарт, який визначає обмеження гармонійних спотворень для електричних систем.
- EN 50160: Європейський стандарт, що встановлює параметри якості електричної енергії, яку постачають до споживачів.

Економічні аспекти

Якість електричної енергії має значний вплив на економічні показники:

- Зниження витрат на ремонт та обслуговування: Висока якість електричної енергії зменшує знос обладнання, що знижує витрати на його обслуговування та ремонт.
- Енергоефективність: Покращення якості електроенергії сприяє підвищенню енергоефективності, що веде до економії енергоресурсів і зниження витрат.
- Стабільність виробництва: Підприємства з високоякісним електропостачанням мають менше збоїв у виробництві, що підвищує їх продуктивність і конкурентоспроможність.

Інноваційні рішення

Сучасні технології та підходи до покращення якості електроенергії включають:

- Розумні мережі (Smart Grids): Інтеграція інформаційних технологій з електричними мережами для покращення моніторингу та управління якістю електроенергії.
- Енергозберігаючі технології: Використання новітніх розробок для зменшення втрат енергії та підвищення ефективності роботи обладнання.
- Відновлювані джерела енергії: Інтеграція сонячних, вітрових та інших відновлюваних джерел енергії може сприяти покращенню якості

електроенергії за рахунок зменшення залежності від коливань в енергосистемах.

Тема 4. Методи забезпечення та підвищення якості електричної енергії. Практичні аспекти забезпечення якості електричної енергії

- Використання компенсаційних пристроїв (конденсаторні установки, фільтри гармонік).
- Системи автоматичного регулювання напруги.
- Пристрої безперебійного живлення (UPS) та стабілізатори напруги.
- Резервування та дублювання електроживлення.
- Розрахунки та моделювання електричних мереж з урахуванням показників якості.
- Реальні кейси та приклади з промислової практики.
- Впровадження новітніх технологій для покращення якості електричної енергії.

Забезпечення якості електричної енергії є важливим аспектом для надійної та ефективної роботи електричних систем. Ось кілька практичних аспектів, на які варто звернути увагу:

Моніторинг та аналіз

1. **Моніторинг параметрів якості енергії:** Регулярний моніторинг напруги, частоти, гармонік та інших параметрів дозволяє виявляти відхилення від норми та оперативно реагувати на них.

2. **Аналіз даних:** Зібрані дані потрібно аналізувати для виявлення тенденцій та проблемних зон, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо покращення якості енергії.

Використання компенсаторів

1. **Конденсаторні установки:** Встановлення конденсаторів для компенсації реактивної потужності допомагає знизити втрати енергії та покращити стабільність мережі.

2. **Фільтри гармонік:** Використання фільтрів гармонік дозволяє зменшити рівень вищих гармонік, що покращує якість електроенергії та захищає обладнання від пошкоджень.

Технічне обслуговування

1. **Регулярне технічне обслуговування:** Перевірка та обслуговування обладнання (трансформаторів, генераторів, розподільних щитів тощо) допомагає запобігти аваріям та зменшує ризик втрат енергії.

2. **Оновлення обладнання:** Впровадження сучасного енергоефективного обладнання сприяє підвищенню якості електроенергії та зниженню витрат.

Автоматизація та управління

1. Системи автоматичного управління: Впровадження систем автоматичного управління електричними мережами дозволяє оперативно реагувати на зміни навантаження та параметрів якості енергії.

2. Розумні мережі (Smart Grids): Використання технологій розумних мереж дозволяє підвищити ефективність управління енергоспоживанням та покращити якість електроенергії.

Застосовуючи ці практичні аспекти, можна забезпечити високу якість електроенергії та стабільну роботу електричних систем.

Використання компенсаційних пристроїв (конденсаторні установки, фільтри гармонік)

Компенсаційні пристрої, такі як конденсаторні установки та фільтри гармонік, використовуються для компенсації реактивної потужності в електричних мережах.

Конденсаторні установки

Конденсаторні установки (КБ) є додатковим джерелом реактивної потужності, яка направляється на забезпечення споживача реактивною потужністю. Вони зазвичай складаються з конденсаторів, з'єднаних за схемою «трикутник» і розділених на декілька ступенів з різною ємністю¹. Конденсаторні установки можуть містити фільтри вищих гармонік для зниження рівня гармонік у мережі.

Фільтри гармонік

Фільтри гармонік використовуються для зменшення рівня вищих гармонік у електричних мережах. Вони допомагають покращити якість електроенергії, знижуючи перешкоди та несиметрію фаз [8].

Переваги та недоліки

Переваги конденсаторів як компенсаторів реактивної потужності включають низькі втрати активної потужності, відсутність рухомих частин та невибагливість в обслуговуванні. Однак, вони не можуть плавно регулювати реактивний опір, оскільки комутація дає тільки ступеневу зміну сумарної ємності¹.

Синхронні компенсатори

Синхронні компенсатори (СК) є іншим способом компенсації реактивної потужності. Вони можуть працювати як генератори реактивної потужності при перезбудженні та як споживачі при недозбудженні [7].

Як відомо, нелінійні навантаження (вентильні перетворювачі, дугові печі тощо) працюють, як правило, з низьким коефіцієнтом потужності ($\cos\varphi = 0,4 \dots 0,8$), необхідність компенсації реактивної потужності є очевидною.

Найбільш економічними засобами компенсації реактивної потужності є регульовані та нерегульовані батареї конденсаторів (БК). Це пояснюється їх відомими перевагами перед іншими засобами КРП (СД, СК). Однак використання БК обмежується технічними причинами. При наявності в мережі ВГ струму і напруги включення конденсаторів призводить до резонансних явищ на частотах вищих гармонік, що призводить до порушення нормальної роботи БК.

Дослідження процесу роботи конденсаторних установок при наявності вищих гармонік в живлячій мережі, особливо при роботі вентильних перетворювачів, мають дуже важливе практичне значення для визначення можливості використання конденсаторних батарей в системах електропостачання промислових підприємств.

Сутність явищ можна розглянути на прикладі простішої схеми електропостачання потужного вентильного перетворювача, який представлено на рисунку 1.6. на схемі представлено три основні елемента, які беруть участь в резонансному процесі: вентильний перетворювач – джерело вищих гармонік струму і напруги; живляча мережа, яка включає всі елементи (в тому числі інше навантаження), спрощено представлено в схемі заміщення індуктивно-активним елементом; батарея конденсаторів (ємнісно-активний ланцюг в схемі заміщення).

При відсутності ємнісних елементів (БК відключені) частотні характеристики опору живлячої мережі в точках 1 і 2 (рис. 1.6) X_C і X_Σ лінійні. Активними опорами в даному випадку можна знехтувати. Отже, глибина комутаційних спотворень зменшуються лінійно по мірі їх віддалення від точки комутації.

Глибина комутаційних спотворень ΔU_1 пропорційна величині $X_C / (X_C + X_{пр})$, де X_C - еквівалентний індуктивний опір мережі, тобто опір від умовної точки живлення нескінченної потужності до точки живлячої мережі, що досліджується; $X_{пр}$ – індуктивний опір мережі перетворювача, тобто опір від точки комутації до точки мережі, що досліджується. При цьому ширина комутаційних спотворень залишається незмінною та визначається кутом комутації γ .

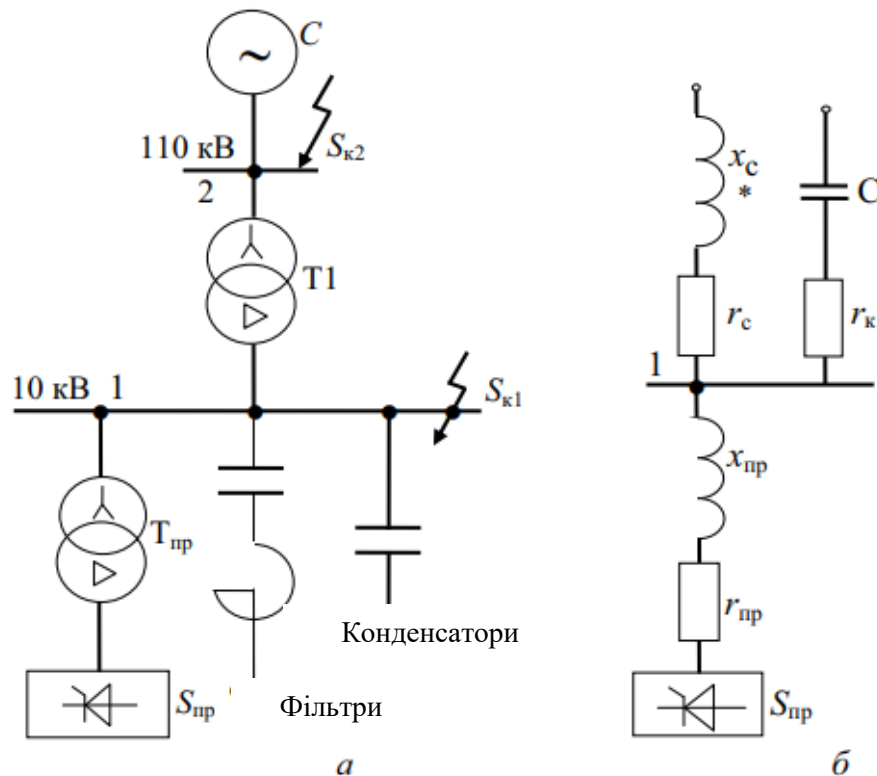


Рисунок 1.6 – Однолінійна схема живлячої мережі з конденсаторними батареями і фільтрами вищих гармонік (а) і схема заміщення (б)

Включення батарей конденсаторів різко змінює лінійний характер частотної характеристики живлячої мережі. При цьому нелінійність частотної характеристики в значній мірі залежить від добротності елементів живлячої мережі, тобто від співвідношення x/r .

Нелінійність частотної характеристики живлячої мережі в точці 1 пояснюється тим, що при підключенні БК виникає паралельний LC-контур, який складається з індуктивного опору живлячої мережі та ємнісного опору конденсатора.

При відсутності в мережі ємнісних елементів напруга n -ї гармоніки на шинах підстанції визначається падінням напруги на порівняльно невеликому індуктивному опорі мережі для цієї гармоніки $X_{сп}$.

Щодо використання компенсаторів, таких як конденсаторні установки та фільтри гармонік можна зауважити наступне:

1. **Покращення якості електроенергії:** Використання компенсаторів допомагає знизити рівень вищих гармонік та реактивної потужності, що сприяє стабільній роботі електричних мереж.

2. **Ефективність енергоспоживання:** Правильне впровадження таких пристроїв зменшує втрати енергії, що підвищує загальну ефективність системи.

3. **Зниження витрат:** Використання конденсаторних установок та фільтрів гармонік може привести до значної економії на рахунках за електроенергію, а також зменшення витрат на технічне обслуговування.

4. **Надійність обладнання:** Зменшення рівня гармонік продовжує термін служби електричних приладів та устаткування, покращуючи їх надійність та знижуючи частоту аварій.

5. **Гнучкість системи:** Використання синхронних компенсаторів забезпечує більш гнучке регулювання реактивної потужності в порівнянні з конденсаторними установками, що дозволяє краще керувати навантаженням мережі.

Отже, використання компенсаційних пристроїв є важливим аспектом для підтримання стабільної, економічно ефективної та надійної роботи електричних мереж.

Системи автоматичного регулювання напруги

Способи та засоби регулювання напруги

Під регулюванням напруги розуміється комплекс технічних заходів щодо обмеження відхилень напруг від їх номінальних значень на шинах споживачів електроенергії в допустимих ДСТ граничних. Крім того, регулювання напруг виконується у системоутворювальній та розподільчих мережах електроенергетичних систем з метою забезпечення економічної та надійної роботи енергетичного обладнання та підтримання напруг у вузлах мережі в технічно допустимих межах.

Таким чином, регулювання напруг здійснюється як у системах електропостачання споживачів, так і в мережах електроенергетичних систем.

Регулювання напруги пов'язане з балансом реактивної потужності в мережі та на шинах споживачів електроенергії. Знижені рівні напруги спостерігаються, як правило, у районах із дефіцитом реактивної потужності.

Розрізняють централізоване та місцеве регулювання напруги.

При централізованому регулюванні в вузлі живлення одночасно підтримуються допустимі рівні напруги в цілому для групи споживачів прилеглого району. Міське регулювання передбачає підтримку необхідних рівнів напруги безпосередньо на шинах споживача.

Слід зазначити, що розмежування між місцевим та централізованим регулюванням напруги дати складно, тому що місське регулювання напруги у

вузлах електроенергетичних систем є одночасно централізованим для споживачів електроенергії, що отримують живлення з цього вузла.

Місцеве регулювання напруги можна поділити на групове та індивідуальне. Групове регулювання виконується одночасно для групи споживачів, індивідуальне регулювання - для одного конкретного, як правило, особливого споживача.

Централізоване регулювання напруги в залежності від характеру графіків навантажень можна умовно розбити на три типи: стабілізація напруги; двоступінчасте регулювання; зустрічне регулювання напруги.

Стабілізація напруги застосовується для споживачів з практично незмінним навантаженням, де необхідний рівень напруги необхідно підтримувати незмінним протягом доби. Графік навантаження таких підприємств показано на рис. 1.6 а.

Двоступінчасте регулювання застосовують для навантажень, графік яких має два явно виражені рівні (рис. 1.6, б). При цьому підтримуються два необхідних рівня напруги відповідно до графіка навантажень. Зазвичай необхідний рівень напруги в режимі максимальних навантажень вище, ніж у режим мінімальних навантажень.

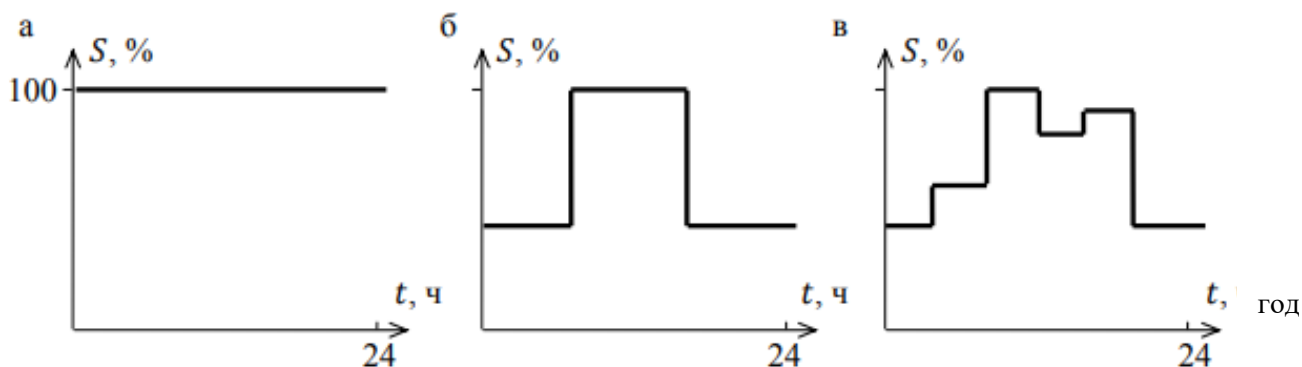


Рисунок 1.6. - Графік навантажень споживачів:
а - незмінний; б - двоступінчастий; в □ багатоступінчастий

Зустрічне регулювання напруги застосовується для споживачів з змінним, багатоступінчастим графіком навантажень (рис. 1.6, в) і є розвитком двоступінчастого. Для кожного значення навантаження в системі електропостачання споживача матимуть місце свої значення втрат напруги.

Для підтримки необхідних рівнів напруги на шинах споживача на напругу слід регулювати відповідно до графіка навантажень.

Зустрічне регулювання полягає у підтримці підвищеного напруги на шинах електричних станцій або знижувальних підстанцій період найбільших

навантажень і зниження його до номінального у період найменших навантажень.

Таким чином, напруга на затискачах споживачів як віддалених від живильної підстанції, так і прилеглих вводиться в допустимі межі.

При такому регулюванні в режимах максимальних та мінімальних навантажень відповідно підвищується та знижується і тому називається зустрічним.

Практично, без спеціальних регулюючих пристроїв, допустимий режим напруги може бути забезпечений тільки в умовах, коли сумарні Втрати напруги в електричній мережі відносно невеликі. Такі умови мають місце в електричних мережах невеликої протяжності з малим числом проміжних трансформацій.

Сучасні вітчизняні електричні системи характеризуються багатоступінчастою трансформацією і довжиною ліній різних напруг, що все збільшується.

Сумарна величина втрат напруги на шляху передачі електроенергії від її джерел до приймачів виходить дуже великою. При зміні значень навантажень від найменших до максимальних сумарні втрати напруги також змінюються.

В результаті на затискачах електроприймачів має місце зміна напруги в вельми значних межах, що істотно перевищують допустимі. У цих умовах не можна забезпечити необхідну якість напруги без застосування спеціальних регулювальних пристроїв.

Завданням регулювання напруги є навмисна зміна режиму напруги в окремих пунктах мережі за заздалегідь заданими законами. Більш надійним та економічним є автоматичне регулювання напруги. Закони регулювання напруги повинні встановлюватися з умов забезпечення найбільш економічної роботи джерел реактивної потужності, електричних мереж і приєднаних до них електроприймачів.

Вибір вихідних положень регулювання напруги багато в чому залежить від місцевих умов, типу мережі, складу електроприймачів тощо.

Засобами регулювання напруги можуть бути:

- ✓ генератори на електростанціях, трансформатори з пристроями регулювання напруги під навантаженням (РПН) та без навантаження (ПБВ);
- ✓ вольтододаткові трансформатори та лінійні регулятори;
- ✓ компенсуючі пристрої, що виробляють (батареї конденсаторів, синхронні компенсатори в збудженому режимі) і споживають (реактори, синхронні компенсатори в недозбудженому режимі) реактивну потужність.

Крім того, регулювання напруги може здійснюватись зміною конфігурації мережі. Певну участь у регулюванні напруги беруть і навантаження, що знижують споживання активної та особливо реактивної потужності при зниженні напруги на їх шинах (регулюючий ефект навантаження).

Засоби регулювання напруги можна розглянути на прикладі розподільної мережі, приєднаної до шин центру живлення (ЦЖ). Величини відхилень напруг у електроприймачів (ЕП) залежать від багатьох факторів: режиму напруг у ЦЖ, втрат напруги в елементах мережі, за якими здійснюється електропостачання даних електроприймачів від ЦЖ, наявності в цій мережі додаткових регулювальних пристроїв.

Для схеми показаної на рис. 1.7, можуть бути використані такі способи регулювання напруги:

- а) зміна режиму напруг або регулювання напруги на шинах ЦЖ;
- б) зміна значень втрат напруги в окремих елементах мережі (лініях, трансформаторах) або на декількох ділянках мережі одночасно;
- в) зміна коефіцієнтів трансформації нерегульованих та регульованих під навантаженням трансформаторів та автотрансформаторів, лінійних регуляторів (ЛР), включених на ділянці мережі ЦЖ-ЕП. У цьому змінюються величини відповідних добавок напруги.

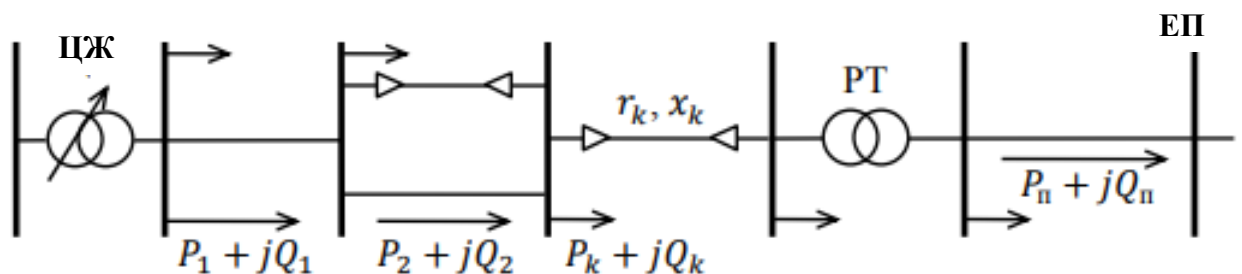


Рисунок 1.7. – Схема електричної мережі

Регулювання напруги на ЦЖ зазвичай призводить до зміни режиму напруг у всій приєднаній до ЦЖ мережі. Тому даний спосіб регулювання є централізованим. Всі інші способи відносяться до місцевого регулювання напруги, що призводить до зміни режиму напруг в обмеженій частині розподільчої мережі.

Надалі під зміною напруги розуміється його коригування за допомогою одноразового заходу, що проводиться на тривалий період часу. До таких заходів відносяться:

✓ зміна робочого положення регульовального відгалуження нерегульованого трансформатора; включення установки поздовжньо-ємнісної компенсації;

✓ включення додаткової лінії; заміна перерізу дротів тощо.

При цьому режим напруги може бути істотно поліпшений. Проте закон зміни напруг залишається вимушеним, зумовленим зміною навантажень.

Під регулюванням розуміється поточна зміна параметрів системи (напруги, коефіцієнта трансформації, втрат напруги), що застосовується з метою забезпечення бажаного режиму напруги. Регулювання може проводитись автоматично. Закон регулювання повинен спеціально підбиратися.

Серед способів регулювання напруги слід особливо виділити застосування автоматизованих джерел реактивної потужності (пристроїв, що компенсують). Використання компенсуючих пристроїв дуже важливе у зв'язку з тим, що регулювання напруги в електричній мережі практично можливе лише в тому випадку, коли є достатній резерв реактивної потужності. Це тим, що зниження рівня напруги у мережі зазвичай пов'язані з помітним зростанням споживаної реактивної потужності. Додатково необхідна реактивна потужність повинна бути покрита за рахунок наявного резерву.

Центрами живлення розподільчих електричних мереж можуть бути шини генераторної напруги електростанцій або шини ПН низьких підстанцій.

Напруга на шинах генераторної напруги станцій регулюється

шляхом зміни струму збудження генераторів автоматично за допомогою спеціальних автоматичних регуляторів збудження (АРЗ). Регулювання на шинах нижчої напруги низьких підстанцій може проводитися за допомогою:

- а) трансформаторів із РПН;
- б) синхронних компенсаторів;
- в) лінійних регуляторів ЛР.

Напруга при цьому має регулюватися автоматично за допомогою регуляторів напруги за бажаним законом у межах діапазону одночасно для всіх ліній розподільної мережі, приєднаних до шин даного ЦЖ. Тому ці схеми централізованого регулювання можуть забезпечити необхідну якість напруги в електроприймачах тільки в тих випадках, коли до шин ЦЖ приєднуються лінії розподільної мережі, що живлять однорідних споживачів. Під однорідними споживачами розуміються групи електроприймачів, котрим графіки зміни навантажень у часі практично однотипними.

В разі приєднання до ЦЖ ліній розподільної мережі, які живлять різнорідних споживачів слід застосовувати схеми групового централізованого регулювання.

Регулювання напруги за допомогою трансформаторів

Двообмотувальні та триобмотувальні трансформатори та автотрансформатори можуть встановлюватись у різних пунктах електричних мереж та виконувати функції підвищення або зниження класу напруги мережі. Режим напруги в пунктах установки трансформаторів зазвичай заздалегідь не відомий, крім того, він може змінюватися внаслідок зміни режимів споживання електроенергії чи зміни параметрів електричної мережі. Для успішного регулювання напруги з метою підтримання необхідних ДСТ рівнів напруги на шинах споживачів та забезпечення економічних режимів роботи електричної мережі необхідно змінювати коефіцієнти трансформації трансформаторів. Тому понижуючі трансформатори та автотрансформатори виготовляються з можливістю зміни коефіцієнта трансформації в межах 10...20%. Регулювальні відгалуження виконуються зазвичай з боку, що живить, тобто на стороні вищої напруги U_B в понижуючих трансформаторів (ВН), якщо клас вищої номінальної напруги не перевищує 220 кВ. При більш високих класах номінальної напруги в мережах встановлюються автотрансформатори, регулювальні відгалуження яких виконуються на середній стороні або нейтралі загальної обмотки.

Зміна коефіцієнта трансформації досягається зміною числа витків однієї з обмоток трансформатора, забезпеченої, крім основних, додатковими регулювальними відгалуженнями. При цьому відгалуження (відпаювання) зі знаком «+» дозволяють збільшити кількість витків відповідної обмотки, а зі знаком «-» – зменшити. На рисунку 1.8 основне регулювальне відгалуження двообмотувального трансформатора, що відповідає номінальному коефіцієнту трансформації k_{TH} , позначено як «0»,

$$k_{TH} = \frac{U_{BH}}{U_{HH}} \quad (1.11)$$

При зміні числа витків обмотки трансформатора перемиканням регулювальних відгалужень коефіцієнт трансформації змінюється і може бути записаний як

$$k_T = \frac{U_{BH} \pm n \cdot k, \%}{U_{HH}} \quad (1.12)$$

де n - загальна кількість регулювальних відгалужень у бік збільшення або зменшення числа витків обмотки трансформатора, $k, \%$ - відгалуження у відсотках від вищої номінальної напруги U_{BH} .

Розташування регулювальних пристроїв з боку вищої напруги понижуючого трансформатора полегшує перемикаючий пристрій у порівнянні з пристроєм перемикання відгалужень, що встановлюється на боці нижчої напруги.

Це з тим, що струми в обмотках вищої напруги трансформаторів менше струмів в обмотках нижчої напруги і співвідносяться назад пропорційно до напруги на обмотках. При вищій номінальній напрузі, що перевищує 220 кВ, виникають складності з ізоляцією пристрою, що перемикає, що зумовлює його перенесення на бік середньої напруги.

За конструктивним виконанням перемикаючих пристроїв розрізняють трансформатори з ПБВ та РПН.

Трансформатори з ПБВ (перемиканням без збудження) необхідно відключати від мережі для перемикання регулювальних відгалужень.

Трансформатори з РПН (перемикання під навантаженням) не вимагають відключення від мережі для перемикання регулювальних відгалужень.

Трансформатори з ПБВ в даний час виконуються з основним (0) і чотирма додатковими відгалуженнями (-5%; -2,5%; +2,5%; +5%). На діючих знижувальних підстанціях зустрічаються раніше, що виготовлялися раніше трансформатори з ПБВ із двома додатковими регулювальними відгалуженнями +5 та -5 %. Перемикач пристрою ПБВ виконується зазвичай у вигляді кругового перемикача, принципова схема обмоток і перемикача трансформатора з ПБВ в однофазному виконанні наведена на рис. 1.8. Для перемикання регулювальних відгалужень трансформатор відключається від мережі, круговий перемикач Q переводиться в потрібне положення і трансформатор вмикається в мережу.

У зв'язку з необхідністю відключення трансформатора, а значить і навантаження, від мережі, перемикання анцапф виробляються рідко, тільки за сезонних зміни навантаження. Тому при змінах навантаження протягом доби доводиться працювати з незмінним коефіцієнтом трансформації, що може призвести до зниження напруги на шинах споживачів у режимах максимальних навантажень і їх підвищення в мінімальних режимах і відповідно до порушення вимог ДСТ на якість електроенергії.

Вказана обставина обмежує використання трансформаторів з ПБВ. Знижувальні трансформатори з ПБВ можуть бути встановлені тільки на тих підстанціях, навантаження яких у максимальних та мінімальних режимах такі, що вдається підтримувати допустимі ДСТ рівні напруги за допомогою централізованого регулювання напруги в електричній мережі.

Крім того, трансформатори з ПБВ використовуються як підвищуючі трансформаторів на електростанціях у блоці із синхронними генераторами, де регулювання напруги виконується на шинах генераторів за допомогою систем автоматичного регулювання напруги.

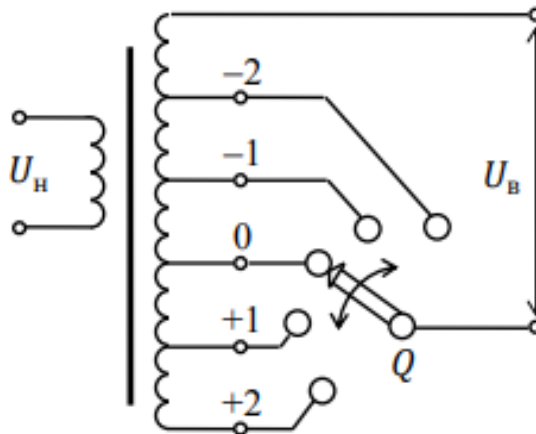


Рисунок 1.8. – Трансформатор з ПБВ

Основні аспекти забезпечення якості електричної енергії:

1. **Постійний моніторинг та аналітика:** Безперервне спостереження за параметрами електроенергії, такими як напруга, частота та рівень гармонік, дозволяє виявляти відхилення від норм та оперативно реагувати на них. Регулярний аналіз зібраних даних допомагає ідентифікувати тенденції та проблемні зони, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення для покращення якості електроенергії.

2. **Використання компенсаторних пристроїв:** Встановлення конденсаторних установок є важливим для компенсації реактивної потужності, що зменшує втрати енергії та покращує стабільність мережі. Фільтри гармонік допомагають зменшити рівень вищих гармонік, покращуючи якість електроенергії та захищаючи обладнання від потенційних пошкоджень, викликаних гармонічними спотвореннями.

3. **Технічне обслуговування та оновлення обладнання:** Регулярне проведення технічного обслуговування та своєчасне оновлення застарілого обладнання є ключовим для запобігання аварійних ситуацій та зменшення втрат енергії. Це також сприяє продовженню терміну служби електричних приладів та устаткування, що позитивно впливає на їх надійність.

4. **Автоматизація систем управління:** Впровадження систем автоматичного управління електричними мережами, а також використання сучасних технологій розумних мереж (Smart Grids), дозволяє підвищити ефективність управління енергоспоживанням. Такі системи забезпечують

можливість швидко реагувати на зміни в навантаженні та параметрах якості електроенергії, що сприяє покращенню загальної стабільності мережі.

Застосування цих практичних заходів дозволяє забезпечити високу якість електроенергії та стабільну роботу електричних систем. Це є критично важливим для промислових і комерційних споживачів, оскільки впливає на їх ефективність, економічність та надійність енергопостачання.

Пристрої безперебійного живлення (UPS) та стабілізатори напруги

Нестабільність електроенергії – одна з найпоширеніших причин поломок домашньої та офісної техніки. Постійні відхилення рівня напруги призводять до більш швидкого зношування пристроїв, а значні перепади можуть спричинити їх повний вихід з ладу. Для надійного захисту від неякісного електропостачання існують спеціальні прилади – стабілізатори напруги та джерела безперебійного живлення (ДБЖ). Вони підвищують безпеку експлуатації техніки, нормалізуючи характеристики напруги живлення.

Функції стабілізатора напруги

Основне завдання цього приладу – стабілізація напруги при нестабільності мережі. Він виступає у ролі регулятора вольтажу для електроживлення техніки, чутливої до стрибків електричного струму.

Стабілізатори призначені для нормалізації рівня напруги до стандартних 220 В при стрибках та просіданнях мережі в різному діапазоні. Вони забезпечують безперервну подачу електроприладів 220/230 або 380/400 з мінімальним відхиленням величини.

Наприклад, інверторні стабілізатори здатні нівелювати шкідливий сигнал в діапазоні від 90 до 310, подаючи на навантаження вольтаж з точністю $\pm 2\%$ і чистим синусом.

Прилади встановлюються переважно у приватних будинках та котеджах, а також на інших об'єктах, де відхилення напруги відбуваються регулярно. Стабілізатори найбільш актуальні для систем опалення, холодильників, аудіо- та відеоапаратури, систем безпеки та відеоспостереження та інших електроприладів, які можуть постраждати від перепадів вольтажу.

Функції джерела безперебійного живлення

ДБЖ топології застосовується як джерело резервного живлення для комп'ютерів при аварійному відключенні електрики. Це здійснюється за рахунок вбудованої акумуляторної батареї, що має достатньо енергії для безперебійного електропостачання навантаження протягом кількох хвилин. Цього достатньо для збереження даних на інформаційних носіях та коректного відключення техніки. Більш дорогі ДБЖ здатні підтримувати живлення

приладів протягом кількох годин – це функція особливо корисна для офісних систем електропостачання.

ДБЖ топології on-line, крім акумулятора, оснащені стабілізатором напруги. Це значно розширює функціональні можливості ДБЖ, дозволяє йому безперервно жити навантаження, підвищувати якість сигналу, нівелюючи стрибки та просідання напруги.

Основні відмінності між стабілізатором та ДБЖ

1. Принцип роботи

Стабілізатор лише нормалізує сигнал, що надходить із електричної мережі, а off-line джерело безперебійного живлення забезпечує можливість збереження електропостачання окремих приладів у разі зникнення напруги. Отже, ці прилади застосовуються для різних цілей.

Стати гідною заміною стабілізатору напруги можуть бути ДБЖ топології on-line. За рахунок вбудованого стабілізатора вони не лише забезпечують резервне живлення, а й коригують напругу при перепадах вольтажу без переходу на акумулятори.

Такі моделі мають технологію подвійного перетворення, за рахунок якої вони здатні:

- ✓ миттєво та безрозривно переводити живлення на батареї при настанні блекауту;
- ✓ коригувати вихідну напругу в діапазоні 90-310 В, подаючи на навантаження якісний сигнал (максимальне відхилення від вихідних 220/230 В – не більше 2%) із чистим синусом, незалежно від гармонійних спотворень на вході.

Лінійно-інтерактивні (Line-Interactive) ДБЖ працюють на базі трансформатора і характеризуються меншим допустимим діапазоном напруги (165-275 В), ступінчастою стабілізацією та відсутністю корекції форми сигналу.

Застосування

Стабілізатори можуть застосовуватися для будь-яких приладів за винятком деяких обмежень. Електромеханічні та релейні видають клацання при роботі, тому не встановлюються у житлових кімнатах. Лінійно-інтерактивні джерела безперебійного живлення не підходять для електрочутливої техніки через ступінчасте регулювання та миттєве спрацювання.

ДБЖ будь-якого типу застосовуються переважно для техніки, яка потребує безперебійної роботи під час блекаутів. Моделі топології онлайн

практично не поступаються інверторним стабілізаторам якості вихідної напруги.

Сучасні стабілізатори та ДБЖ можуть мати максимально схожі технічні характеристики за якістю вихідної напруги. При порівнянні двох таких приладів з однаковою вихідною потужністю джерело безперебійного живлення буде значно дорожчим. Тому якщо необхідності використання акумуляторних батарей немає, то краще встановити стабілізатор. Це буде більш економічним, але не менш ефективним для захисту техніки рішенням, якщо електромережі не трапляються обриви живлення.

Стабілізатор потрібен у разі регулярної нестабільності мережі. Джерело безперебійного живлення встановлюється у випадках:

- ✓ частого вимкнення електропостачання;
- ✓ значних відхилень показників мережі норми;
- ✓ наявності електроприладів, яким потрібна безперервна робота.

У районах з частими відключеннями світла та стрибками напруги для комплексного захисту слід встановити:

- ✓ ДБЖ топології онлайн на електроприлади, яким не можна вимикатися;
- ✓ стабілізатор напруги для техніки, якій потрібен лише якісний сигнал та захист від небезпечного вольтажу.

Умови експлуатації приладів

Стабілізатори та джерела безперебійного живлення слід встановлювати далеко від опалювальних приладів у приміщеннях з помірною вологістю. Їх корпус не допускається закривати іншими предметами, оскільки погіршення циркуляції повітря призводить до перегріву.

Стабілізатори напруги та ДБЖ готові до експлуатації одразу після їх встановлення. Вони призначені для безперервної роботи, тому не повинні вимикатися від мережі. Малопотужні моделі достатньо включити в розетку, а потужніші пристрої вимагають підключення клемними роз'ємами на введенні від зовнішньої мережі після лічильника електроенергії.

Резервування та дублювання електроживлення

Резервування та дублювання електроживлення є важливими аспектами забезпечення якості електроенергії.

Резервування електроживлення

Резервування електроживлення передбачає наявність додаткових джерел енергії, які можуть замінити основне джерело в разі його відключення або нестачі. Це може бути здійснено за допомогою:

✓ **Акумуляторних систем:** Використання акумуляторних батарей для зберігання енергії, яка може бути використана при відключенні основного джерела.

✓ **Генераторів:** Бензинові, дизельні або газові генератори можуть забезпечити автономне живлення.

✓ **Сонячні панелі:** Використання сонячних панелей для зберігання енергії, яка може бути використана в разі відключення основного джерела.

Дублювання електроживлення

Дублювання електроживлення передбачає наявність двох або більше незалежних джерел енергії, що забезпечують безперебійне живлення. Це може бути здійснено за допомогою:

✓ **Дві або більше акумуляторних систем:** Використання двох або більше акумуляторних систем для забезпечення безперебійного живлення.

✓ **Комбіновані системи:** Використання комбінації сонячних панелей та акумуляторних систем для забезпечення безперебійного живлення.

Ці рішення допомагають забезпечити стабільність електропостачання і зменшувати ризики відмінностей у якості електроенергії.

Основним способом захисту критичного навантаження від можливих неполадок електромережі є встановлення джерела безперебійного живлення (ДБЖ). Широкого поширення набула централізована схема електроживлення з використанням одномодульного ДБЖ. Однак для проведення профілактичних, регламентних та інших робіт ДБЖ переводиться в режим Bypass, і навантаження залишається незахищеним на деякий час. Для певних типів навантажень при безперервному виробничому циклі цей ризик є неприйнятним. Розглянемо поширені схеми резервування ДБЖ: системи з паралельним резервуванням, системи з послідовним резервуванням, системи з резервуванням шини живлення навантаження (LBR) та системи з синхронізацією виходу (LBS).

Одномодульні системи

Промислові електромережі не мають 100-відсоткової надійності, що гарантує відсутність можливих перебоїв з електропостачанням. Стандартним засобом захисту критичного навантаження є одномодульні ДБЖ, побудовані за схемою з подвійним перетворенням напруги (On-Line). Вони комплектуються батарейними комплектами, які розраховані на нетривалий час роботи в автономному режимі (зазвичай не більше 30 хвилин). Для захисту від довготривалих перебоїв встановлюють додатковий дизель-генератор із запасом палива для безперервної роботи 8...24 години.

Основними елементами одномодульного ДБЖ (рис. 1.9), що працює за схемою On-Line, є випрямляч, інвертор, акумуляторні батареї, зарядний пристрій, а також пристрої комутації ланцюга Вурасс (обхідний ланцюг живлення навантаження, мінаючи схему подвійного перетворення). Одномодульна система відрізняється високою надійністю та простотою. Вона є оптимальним рішенням для навантажень, що допускають заплановані короткочасні відключення для обслуговування ДБЖ. Однак у моменти технічного обслуговування ДБЖ або виконання інших регламентних робіт виникає необхідність його переведення в режим Вурасс. Для деяких видів навантажень із безперервним технологічним процесом цей ризик неприпустимий. Крім того, не можна забувати про можливість виходу з ладу самого ДБЖ.

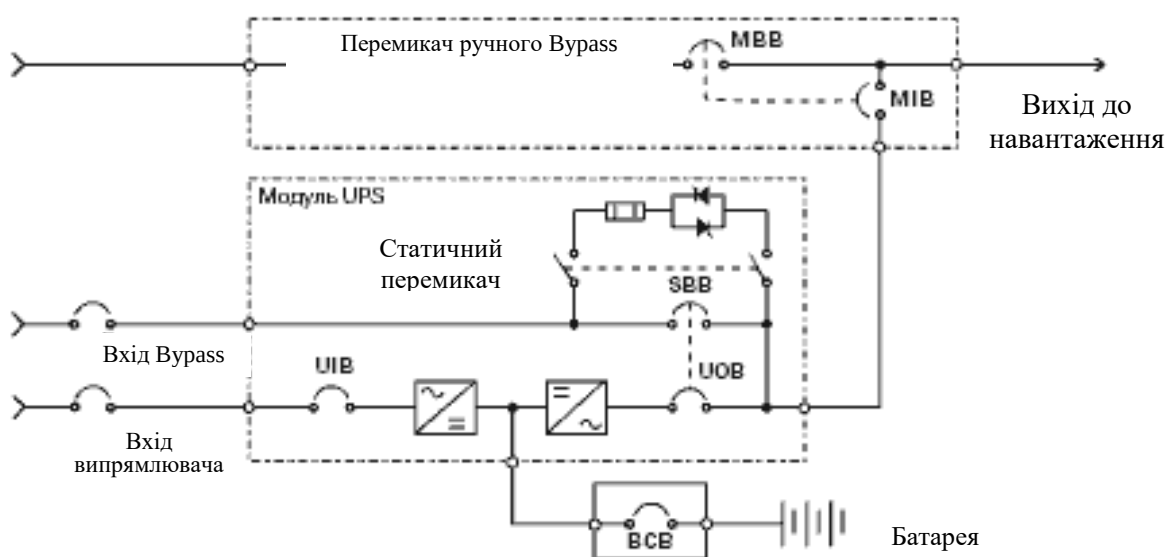


Рисунок 1.9. – Одномодульний UPS

Позначення:

- ВСВ** – батарейний розмикач;
- MVB** - перемикач ручного Вурасс;
- MIB** – розмикач ручного Вурасс;
- SBB** - статичний перемикач;
- UIB** - вхідний розмикач модуля;
- UOB** – вихідний розмикач модуля

Для вирішення вищезгаданих завдань було розроблено схеми резервування. Наведена таблиця ілюструє переваги та недоліки схем резервування.

Таблиця 1.4. - Порівняння різних схем резервування ДБЖ

Схема	Надійність	Простота	Резервування в обслуговуванні	Зручність		
				Модуль	Силова мережа	Захист
Одномодульні ДБЖ	Так	Так	Ні	Ні	Ні	Лише модуль
Паралельне резервування	Так	Так	Так	Так	Ні	Лише модуль
Послідовне подвійне резервування модулів	Так	Так	Так	Так	Ні	Лише модуль
Послідовне резервування модулів (потрійне та більше)	Можливо	Ні	Так	Так	Ні	Лише модуль
Системи з резервуванням шини живлення навантаження (LBR)	Так	Так	Так	Так	Так	Модуль і шина живлення
Системи з синхронізацією виходу (LBS)	Так	Так	Так	Так	Так	Модуль і шина живлення

Системи з паралельним резервуванням ДБЖ

Система з паралельним резервуванням складається з двох або більше модулів ДБЖ, що включені в паралель і працюють на загальне навантаження. По відношенню до проектного навантаження система повинна мати певну надмірність потужності у вигляді одного або декількох додаткових модулів для забезпечення резерву. Як правило, кожен модуль оснащений своїм батарейним блоком, хоч і не виключений варіант використання загального батарейного комплексу для всієї системи в цілому.

При безаварійній роботі навантаження системи рівномірно розподіляється між модулями ДБЖ, а у разі виходу з ладу або примусового відключення одного з них навантаження розподіляється серед модулів, що залишилися. Така схема включення забезпечує високий рівень захисту (99.99%). При цьому процес технічного обслуговування окремих модулів не

призводить до тимчасового харчування навантаження від "брудної" мережі. Однак все ще залишається необхідність відключення системи при проведенні робіт із шиною живлення навантаження або обладнанням, розташованим між ДБЖ та навантаженням.

Незважаючи на простоту концепції побудови паралельної системи резервування, методи її конкретної реалізації суттєво різняться у різних виробників ДБЖ.

Головна відмінність полягає у механізмі розподілу навантаження між модулями. Більшість виробників використовують інвертори з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), що мають високі динамічні характеристики. Однак для паралельної роботи на єдине навантаження потрібні додаткові пристрої синхронізації. При цьому один з модулів ДБЖ стає провідним і за його вихідною напругою синхронізуються модулі системи, що залишилися. При виході з ладу провідного модуля чи ланцюгів синхронізації виходить із ладу вся система. Ведучий модуль – її слабка ланка.

Для подолання цього недоліку в ДБЖ Powerware використовується технологія HotSync. Унікальність цієї технології полягає у відсутності сигнальних інтерфейсних зв'язків між ДБЖ - ДБЖ Powerware бачать один одного через силові виходи, рівномірно розподіляючи навантаження між собою. Технологія дозволяє використовувати до 4 ДБЖ у паралель. Тобто, наприклад, мати систему Powerware $4 \times 80 = 320$ кВА або $4 \times 80 = 240 + 80$ кВА (один ДБЖ забезпечує резервування за схемою $N + 1$)

При цьому можливе використання додаткового кабінету управління, який не є блоком синхронізації або розподілу потужності, а містить комутаційні компоненти режиму загального статичного Bypass, пристрої ізоляції модулів ДБЖ щодо один одного та контрольно-вимірювальні елементи для збирання та передачі інформації (рис. 1.10).

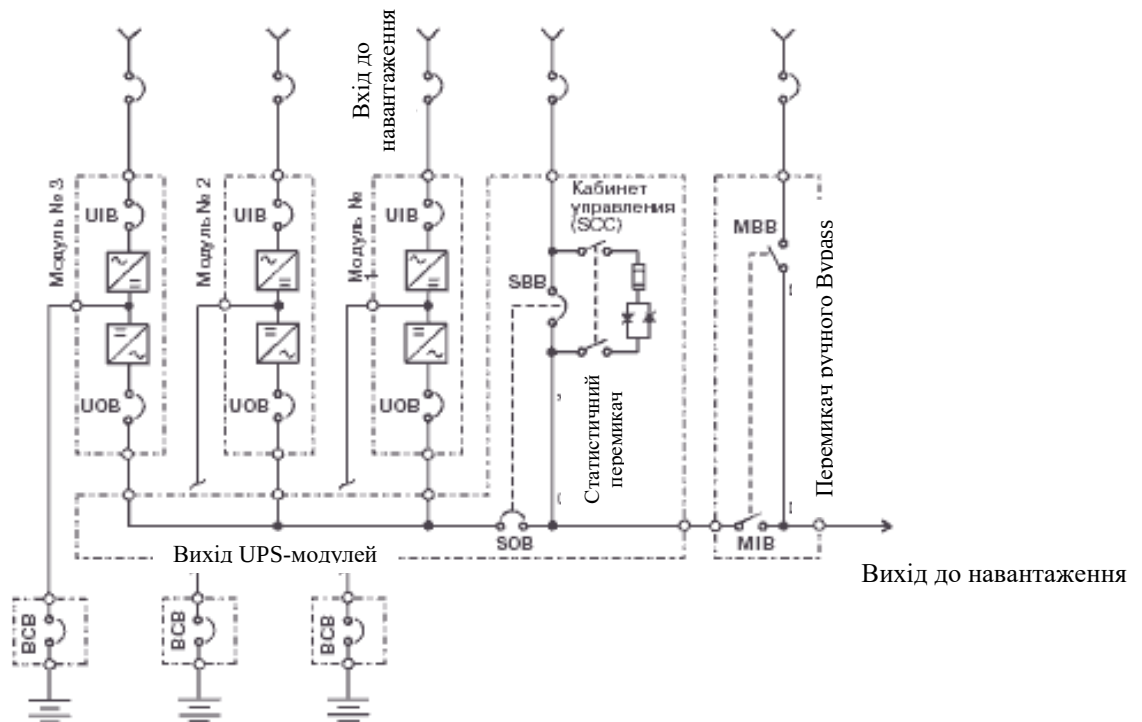


Рисунок 1.10 – Схема з паралельним резервуванням

Позначення:

BCB – батарейний розмикач;

MBB - перемикач ручного Bypass;

MIB – розмикач ручного Bypass;

SBB - статичний перемикач;

SOB - вихідний розмикач системи;

UIB - вхідний розмикач модуля;

UOB – вихідний розмикач модуля

Додаткові можливості систем із паралельним резервуванням

Для економії коштів зовсім не обов'язково використовувати схему з подвійним резервуванням, що має подвійну вартість. Наприклад, для навантаження 600 кВА можна побудувати систему 2 x 600 кВА, а можна 3 x 300 кВА. В останньому випадку схема має полуторну надмірність за потужністю і, отже, таку ж надмірність за вартістю і є вдалим компромісом між високою надійністю і економічністю.

Схеми з паралельним резервуванням дозволяють виконувати технічне обслуговування окремих модулів ДБЖ, не перериваючи процес захисту критичного навантаження. Однак для обслуговування системи в цілому або її переконфігурування, а також для проведення регламентних робіт з елементами шини навантаження потрібен переведення системи в Bypass або

повне відключення навантаження. Тому схеми з паралельним резервування непридатні в тих випадках, коли робота системи в режимі Bypass неприпустима навіть на короткий час. Крім того, у них не передбачено захисту від збоїв на ділянці шини живлення навантаження.

Для підвищення надійності захисту критичного навантаження рекомендується використовувати схеми із синхронізованим виходом (LBS) та схеми резервування шини живлення навантаження (LBR). Але перш ніж перейти до їх розгляду, зупинимося на схемі послідовного резервування модулів ДБЖ.

Системи з послідовним резервуванням ДБЖ

Система з послідовним резервуванням складається з одного або кількох основних модулів та одного резервного. Кожен основний модуль працює на власне навантаження. Резервний модуль використовується як первинне джерело живлення входів Bypass основних модулів системи (рис. 1.11, 1.12).

Така конфігурація дозволяє здійснювати технічне обслуговування основних та резервних модулів без відключення навантаження та без зняття її захисту. У цій схемі виходи основних модулів синхронізовані із виходом резервного модуля системи.

При зникненні живлення на вході одного з основних модулів ДБЖ переходить в автономний режим роботи та навантаження споживає енергію батарейного комплексу даного ДБЖ. Якщо моменту його розряду живлення не відновиться, відбудеться автоматичний перехід модуля в Bypass, тобто. на резервний блок. Зрозуміло, в цьому випадку резервний блок стає недоступним для основних модулів, і при переході в Bypass другого основного модуля підключений до нього сегмент навантаження запитується від незахищеного входу системи.

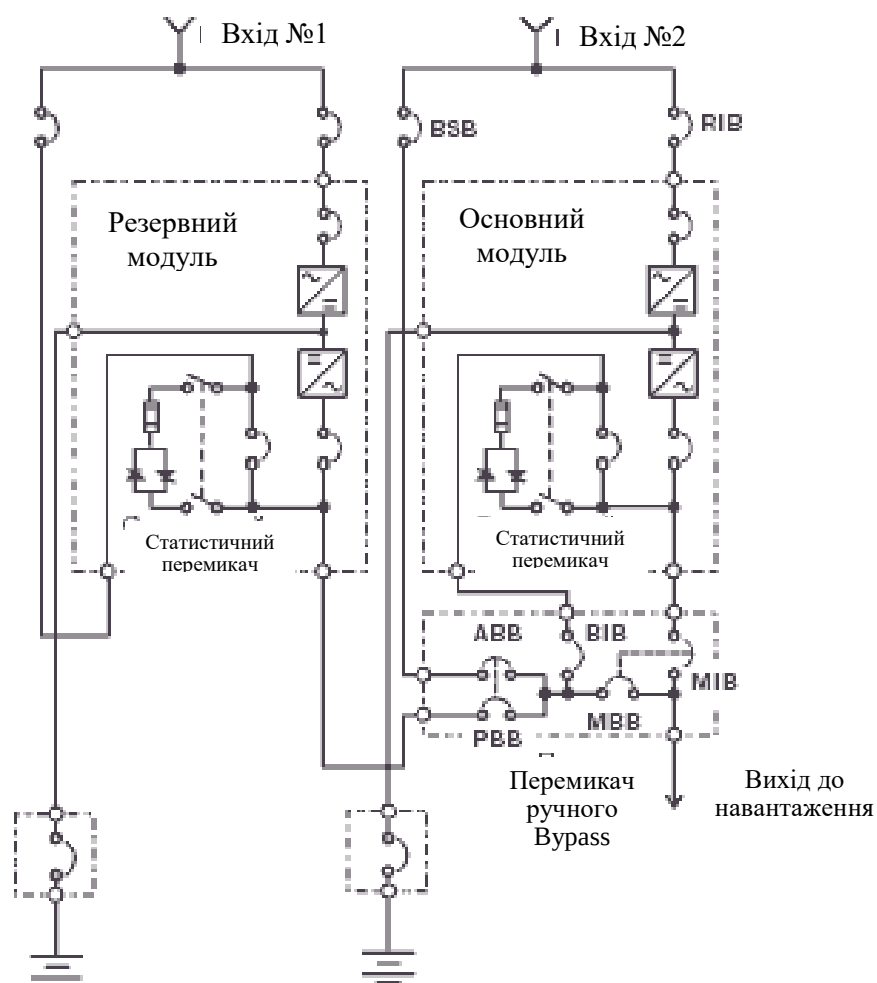


Рисунок 1.11 – Простіша схема з послідовним резервуванням

Позначення:

ABB - розмикач резервного ланцюга Bypass;

BIV - розмикач ланцюга статичного Bypass;

BSB - вхідний розмикач ланцюга Bypass;

MBV - перемикач ручного Bypass;

MIV – розмикач ручного Bypass;

PVB - розмикач основного ланцюга Bypass;

RIV - вхідний розмикач ланцюга випрямляча

Особливості систем із послідовним резервуванням ДБЖ

Резервний модуль працює у режимі off-line.

По входу Bypass основних модулів включений резервний ДБЖ, а чи не “брудна” мережу.

Дана схема - хороший спосіб модернізації існуючої одномодульної системи підвищення її надійності шляхом включення додаткового резервного модуля.

На підставі цього схему з послідовним резервуванням можна розглядати як більш надійну в порівнянні з одномодульною. Додаткова перевага системи з послідовним резервуванням полягає у можливості використання різнорангових модулів (модулів з різною потужністю) та різнотипних модулів (модулів від різних виробників).

Недоліки схем із послідовним резервуванням ДБЖ:

✓ Для реалізації подібної схеми потрібна більша кількість автоматичних перемикачів та захисних автоматів у порівнянні з паралельними системами. Наприклад, схема з 4 модулями (3 основних, 1 резервний) вимагає 3 незалежні лінії Вурасс зі своїми перемикачами. Внаслідок цього середній час напрацювання на відмову (MTBF) системи з послідовним резервуванням може бути нижчим у порівнянні з одномодульними ДБЖ або системами з паралельним резервуванням.

✓ Система з послідовним резервуванням потребує додаткового ланцюга комутації джерела живлення входів Вурасс основних модулів (для систем із 3 або більше модулів).

✓ Для модернізації найпростішої двомодульної системи (1 основний, 1 резервний модулі) потрібні великі витрати.

✓ Потужність кожного сегмента навантаження обмежена потужністю відповідного основного модуля ДБЖ.

Таким чином, застосування схеми послідовного резервування, з одного боку, полегшує обслуговування модулів та переконфігурування системи, але, з іншого боку, призводить до зниження її надійності загалом. Подібна конфігурація найефективніша у варіанті з двома модулями (1 основний, 1 резервний). Однак зі збільшенням кількості основних модулів рекомендується використовувати інші схеми резервування.

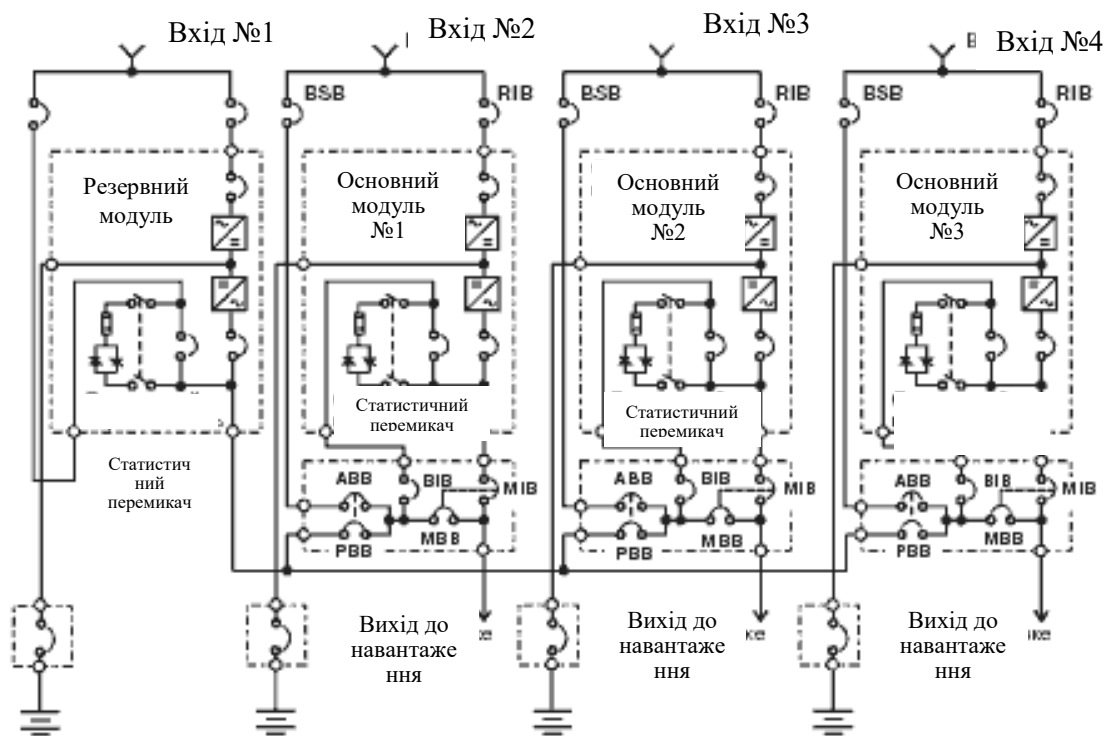


Рисунок 1.12 – Чотирьохмодульна система з послідовним резервуванням

Позначення:

- BCB** – батарейний розмикач;
- MBV** - перемикач ручного Вуypass;
- MIB** – розмикач ручного Вуypass;
- SBV** - статичний перемикач;
- SOB** - вихідний розмикач системи;
- UIB** - вхідний розмикач модуля;
- UOB** – вихідний розмикач модуля

Додаткові можливості систем із паралельним резервуванням

Для економії коштів зовсім не обов'язково використовувати схему з подвійним резервуванням, що має подвійну вартість. Наприклад, для навантаження 600 кВА можна побудувати систему $2 \cdot 600$ кВА, а можна 3×300 кВА. В останньому випадку схема має полуторну надмірність за потужністю і, отже, таку ж надмірність за вартістю і є вдалим компромісом між високою надійністю і економічністю.

Схеми з паралельним резервуванням дозволяють виконувати технічне обслуговування окремих модулів ДБЖ, не перериваючи процес захисту критичного навантаження. Однак для обслуговування системи в цілому або її переконфігурування, а також для проведення регламентних робіт з елементами шини навантаження потрібен переведення системи в Вуypass або

повне відключення навантаження. Тому схеми з паралельним резервування непридатні в тих випадках, коли робота системи в режимі Bypass неприпустима навіть на короткий час. Крім того, у них не передбачено захисту від збоїв на ділянці шини живлення навантаження.

Для підвищення надійності захисту критичного навантаження рекомендується використовувати схеми із синхронізованим виходом (LBS) та схеми резервування шини живлення навантаження (LBR). Але перш ніж перейти до їх розгляду, зупинимося на схемі послідовного резервування модулів ДБЖ.

Системи з послідовним резервуванням ДБЖ

Система з послідовним резервуванням складається з одного або кількох основних модулів та одного резервного. Кожен основний модуль працює на власне навантаження. Резервний модуль використовується як первинне джерело живлення входів Bypass основних модулів системи (рис. 1.13, 1.14).

Така конфігурація дозволяє здійснювати технічне обслуговування основних та резервних модулів без відключення навантаження та без зняття її захисту. У цій схемі виходи основних модулів синхронізовані із виходом резервного модуля системи.

При пропаданні живлення на вході одного з основних модулів ДБЖ переходить в автономний режим роботи та навантаження споживає енергію батарейного комплексу даного ДБЖ. Якщо моменту його розряду живлення не відновиться, відбудеться автоматичний перехід модуля в Bypass, тобто. на резервний блок. Зрозуміло, в цьому випадку резервний блок стає недоступним для основних модулів, і при переході в Bypass другого основного модуля підключений до нього сегмент навантаження запитується від незахищеного входу системи.

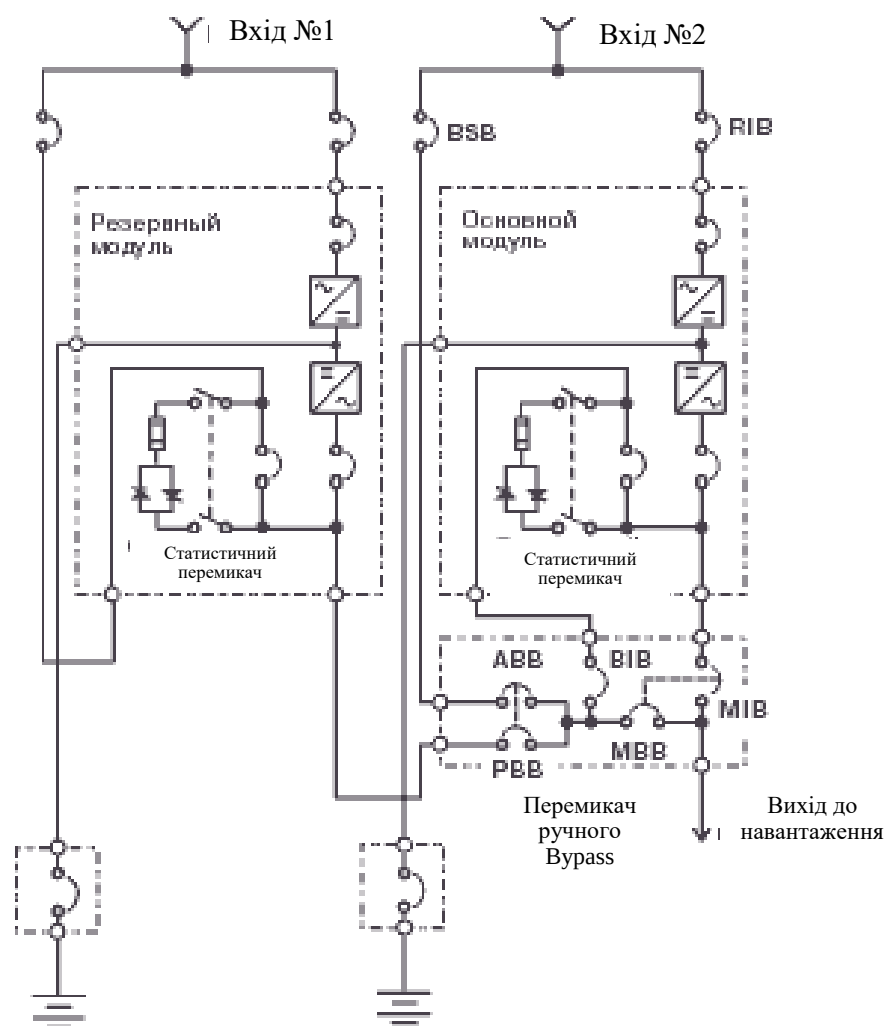


Рисунок 1.13 – Простіша система з послідовним резервуванням

Позначення:

ABB - розмикач резервного ланцюга Bypass;

BVB - розмикач ланцюга статичного Bypass;

BSB - вхідний розмикач ланцюга Bypass;

MBV - перемикач ручного Bypass;

MIB – розмикач ручного Bypass;

PVB - розмикач основного ланцюга Bypass;

RIB - вхідний розмикач ланцюга випрямляча

Резервування шин живлення навантаження (LBR)

В разі необхідності подальшого збільшення надійності системи безперебійного електроживлення рекомендується застосовувати технологію LBR. Концепція полягає у використанні двох незалежних систем безперебійного живлення. Потужності кожної з них має бути достатньо для

живлення 100-відсоткового критичного навантаження. Для підвищення надійності рекомендується підключати їх до фідерів незалежних трансформаторних підстанцій. Навантаження розбивається на два сегменти, кожен із яких з'єднаний окремою шиною зі своєю системою безперебійного живлення. Автоматичний перемикач з відповідним пристроєм керування, встановлений безпосередньо в навантаженні, дозволяє переводити систему в наступні режими роботи:

- ✓ дві незалежні системи ДБЖ незалежно живлять відповідні сегменти навантаження;
- ✓ дві незалежні системи ДБЖ підключаються в паралель для живлення всього навантаження загалом;
- ✓ живлення всього навантаження здійснюється однією із систем ДБЖ.

Перевагою цієї конфігурації є використання подвійного вихідного фідера у схемі резервування. Система підтримує два незалежні вихідні ланцюги живлення. Схема резервування безпосередньо наближена до навантаження, і цим досягається максимальна надійність системи. Крім того, з'являється можливість технічного обслуговування шини навантаження без її відключення.

Устаткування із дубльованими електричними входами може безпосередньо підключатися до подвійного фідера даної системи. У той же час використання розподільних пристроїв з подвійним входом дозволяє підключати навантаження з єдиним електричним входом.

Основна перевага конфігурації LBR полягає в тому, що будь-яка ДБЖ або будь-яка ділянка ланцюга може бути відключена без втрати напруги на виході системи і без переведення навантаження на живлення в режимі Bypass.

Системи із синхронізацією виходу (LBS)

Схема із синхронізацією виходу (LBS) подібна до технології LBR. Вона складається із двох незалежних систем безперебійного живлення зі своїми незалежними вихідними шинами. Системи мають достатню потужність для живлення всього навантаження цілком, але на відміну від технології LBR не мають силових з'єднань по виходу модулів (рис. 1.14). Синхронізація модулів здійснюється за допомогою додаткового ланцюга синхронізації з точністю до 3 градусів у всіх режимах (включаючи заборонений Bypass та автономний режим роботи ДБЖ).

Схема LBS призначена для живлення навантаження від двох електрично незалежних синхронних фідерів. Навантаження з дубльованим електричним входом підключається безпосередньо до них, а навантаження з єдиним входом

передбачає використання додаткових швидкодіючих статичних перемикачів. На відміну від інших методів резервування (крім LBR) дана система не має вразливих ділянок схеми живлення по всьому шляху від ДБЖ до навантаження.

Система LBS є більш ефективною та надійною порівняно з одномодульною, паралельною або системою з послідовним резервуванням. Це пов'язано з наявністю дублюючої шини живлення навантаження.

При проектуванні схеми LBS немає необхідності застосування дорогих систем управління, перемикачів та ін. Достатньо використовувати два одномодульних ДБЖ з додатковою панеллю синхронізації.

Відсутність електричного зв'язку між вихідними фідерами забезпечує повну незалежність одного ланцюга живлення від іншого у разі виникнення будь-яких проблем у навантаженні. Синхронізація ДБЖ здійснюється за допомогою ланцюгів синхронізації без силового з'єднання на їхньому виході. При цьому допускається навіть підключення ДБЖ до незалежних трансформаторних підстанцій.

У звичайних одномодульних системах ДБЖ синхронізуються із джерелом на вході Вурасс. Якщо два ДБЖ мають спільне джерело живлення ланцюга Вурасс, вони синхронно працюють у нормальному режимі експлуатації. Однак при переході на батареї, при живленні від різних вхідних фідерів або асинхронних ланцюгах Вурасс виходи ДБЖ будуть неузгоджені.

При проектуванні системи LBS використовується додатковий блок синхронізації, що складається з інтерфейсної карти, що встановлюється в кожному UPS, та панелі керування, що має невеликі габарити. Блок синхронізації здійснює мінімальний обмін інформацією з ДБЖ. Він активізується лише з появи неузгодженості між фідерами. Відсутність зв'язків між ним та засобами управління ДБЖ гарантує максимальну незалежність системи та ізоляцію модулів.

Схема із синхронізацією виходу (LBS) є найекономічнішою реалізацією топології з подвійною шиною живлення навантаження.

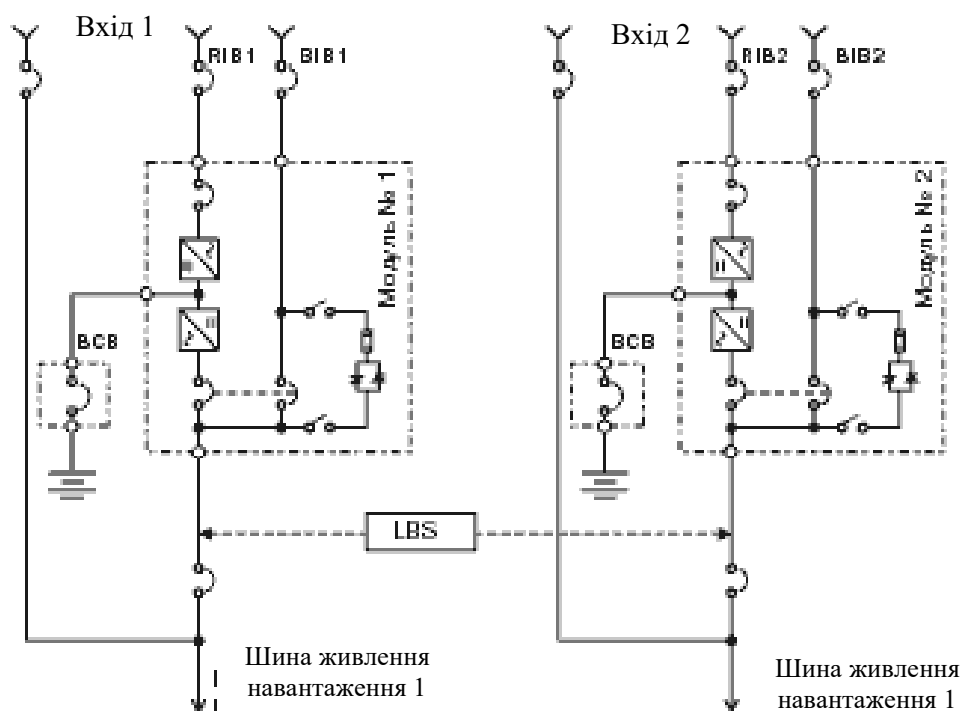


Рисунок 1.14 – LBS-система

Позначення:

BIB - розмикач ланцюга статичного Bypass;

RIB - вхідний розмикач ланцюга випрямляча;

BCB - батарейний розмикач

Отже, при побудові системи безперебійного електроживлення недостатньо покладатися на надійний одномодульний ДБЖ. Все частіше виникає необхідність проектування "дійсно безперебійних" схем, що допускають технічне обслуговування та переконфігурування без відключення навантаження або ризиків, пов'язаних із живленням від "брудної" мережі. Пропоновані технології LBR та LBS дозволяють будувати системи з двома вихідними фідерами для усунення всіх вразливих точок у системі енергоживлення критичного навантаження.

Наведені у цьому огляді п'ять способів резервування мають свої переваги та недоліки. Одномодульна система є оптимальним рішенням завдань, які потребують безперервного циклу роботи протягом усього терміну служби устаткування. Паралельна система має більшу надійність і допускає обслуговування в процесі роботи. Конфігурація з послідовним резервуванням дозволяє звести резервування до існуючої одномодульної установки. Технологія LBR має максимальну надійність та гнучкість в обслуговуванні всіх її компонентів, включаючи шину живлення навантаження та встановлені на ній силові комутаційні елементи. Технологія LBS дозволяє додати резервну

систему безперебійного живлення та впровадити топологію подвійної шини живлення навантаження до вже існуючої системи.

Розрахунки та моделювання електричних мереж з урахуванням показників якості

ПКЕ включають безліч параметрів, що характеризують якість електричної енергії, такі як:

- ✓ Коефіцієнт несиметрії напруги - це міра нерівномірності розподілу напруги між фазами мережі.
- ✓ Коефіцієнт несинусоїдальності напруги - визначає відхилення форми сигналу напруги від ідеальної синусоїди.
- ✓ Частотні характеристики електроустаткування - включають відхилення частоти від номінального значення, що може спричинити проблеми в роботі обладнання.

Для аналізу ПKE використовуються різні методи:

- ✓ Спектральний аналіз кривої напруги: дозволяє виявити гармонічні спотворення, які вносять електроприймачі.
- ✓ Імовірнісні методи: використовуються для аналізу випадкових відхилень параметрів ПKE, пов'язаних із нестабільністю мережі та різними режимами споживання.

Моделювання та розрахунок режимів мережі

- ✓ Моделювання спотворень напруги: включає аналіз впливу різних джерел спотворень на форму напруги у мережі.
- ✓ Вибір оптимальних схем мереж: визначення оптимальних топологій та конфігурацій мереж, що забезпечують мінімальні втрати та високу якість електроенергії.

Застосування програмного забезпечення:

- ✓ Для розрахунку та аналізу ПKE використовуються спеціалізовані програмні комплекси, які дозволяють:
- ✓ Проведення детальних розрахунків: попередні розрахунки параметрів режимів мережі, облік та аналіз ПKE.
- ✓ Симуляція різних сценаріїв: моделювання різних режимів роботи мережі та оцінка їхнього впливу на якість електроенергії.

Ці аспекти допомагають забезпечити надійну та ефективну роботу електричних мереж, мінімізуючи втрати та підвищуючи стабільність енергопостачання.

Проектно-конструкційні рішення

Виділення нелінійних навантажень на окрему систему шин (поділ лінійних та нелінійних навантажень).

Зниження повного опору розподільчої мережі. Це один із ефективних методів зниження нелінійних спотворень. Кабелі та збірні шини мають повне опір, має значною мірою індуктивний характер.

Збільшення перерізу кабелів (проводів) знижує активний опір розподільчої мережі, але знижує її індуктивність. Максимальне ефективний переріз жил кабелів (проводів) становить приблизно 95 мм². З подальшим збільшенням перерізу кабелів їхня індуктивність залишається відносно постійною. Більш ефективним є використання паралельно з'єднаних кабелів (дротів).

Застосування 12-пульсного випрямляча. Наприклад, зниження величини коефіцієнта спотворення синусоїдальності струмів трифазних джерел безперебійного живлення (ДБЖ) рівня менше 10% використовують 12-напівперіодні випрямлячі. Застосування 12-пульсного випрямляча дозволить повністю придушити 5-у та 7-у гармоніки в живильному струмі випрямляча.

Підключення нелінійного навантаження до системи з більшою потужністю короткого замикання. Практично це означає заміну трансформатора живлення більш потужний.

Забезпечення симетричний режим роботи трифазної системи. Необхідно домогтися наскільки це можливо збалансованості навантажень по фазах. При цьому забезпечується мінімальний струм у провіднику нейтралі та мінімальний вміст гармонік у вихідній напрузі джерела безперебійного живлення (у разі його застосування, наприклад, для живлення комп'ютера).

Застосування фільтруючих пристроїв придушення гармонік

Увімкнення лінійних дроселів

Послідовне включення лінійних дроселів змінного струму (рис. 5) є найпростішим способом зниження рівня вищих гармонік, що генеруються нелінійними навантаженнями, у зовнішню мережу.

Дросель має мале значення індуктивного опору на основній частоті 50 Гц і значні величини опорів для вищих гармонік, що призводить до їхнього ослаблення.

Лінійні дроселі змінного струму дозволяють зменшити коефіцієнт гармонік в кілька разів, залежно від співвідношення потужності живлення трансформатора, потужності навантаження та параметрів дроселя. Для оцінки рівня гармонійних спотворень можна скористатися засобами розрахунку, наявними у відкритому доступі, наприклад. Так, при потужності живильного трансформатора 800 кВА підключені до мережі перетворювачі частоти різної потужності внесуть до неї різні гармонічні спотворення, наприклад:

- ПЧ потужністю 315 кВт - 7,3%,

- ПЧ потужністю 30 кВт - 2,9%.

Увімкнення дроселів постійного струму у перетворювачах частоти. Дроселі постійного струму в перетворювачах частоти підключаються до спеціально виведених клем у розрив ланцюга постійного струму (рис. 6) - підключення може бути зроблено користувачем самостійно. Деякі моделі перетворювачів поставляються вже із вбудованими дроселями постійного струму.

Ефективність дроселів постійного струму в частині зниження гармонійних спотворень напруги мережі приблизно така сама, як і лінійних дроселів змінного струму.

Застосування пасивних (резонансних) фільтрів

Застосування послідовно включених лінійних дроселів (або дроселів постійного струму в перетворювачах частоти) часом не дозволяє зменшити гармонічні спотворення до бажаних меж. В цьому випадку доцільно застосування пасивних LC-фільтрів, налаштованих на певну частоту гармонік (резонансних фільтрів).

Для покращення гармонійного складу споживаного струму такі фільтри знайшли широке застосування, наприклад, у системах із джерелами безперебійного живлення (ДБЖ). Підключення фільтра на вході 6-пульсного випрямляча при 100% навантаженні ДБЖ забезпечує зниження коефіцієнта спотворення синусоїдальності до 8–10 %. Значення цього коефіцієнта у системі без фільтра може досягати 30% і більше.

Використання спеціальних пристроїв

Застосування спеціальних розділових трансформаторів

Роздільний трансформатор з обмотками «трикутник-зірка» дозволяє ефективно боротися з гармоніками, кратними третьою, при балансованому навантаженні в трифазній мережі. Для ослаблення впливу несиметрії навантаження та зменшення струму нейтралі додатково застосовують «перехресну» (зигзагоподібну) систему обмоток, де вторинна обмотка кожної фази розбита на дві частини та розміщена на різних стрижнях магнітопроводу трансформатор.

Спеціальний К-фактор-трансформатор, застосований замість звичайного трансформатора, дозволяє витримати нагрівання, викликане вищими гармоніками за рахунок того, що такі трансформатори мають додаткову теплоємність. Крім того, спеціальна конструкція К-фактор-трансформаторів дозволяє звести до мінімуму втрати на вихрові струми та втрати через паразитну ємність.

Застосування магнітних синтезаторів

Магнітний синтезатор являє собою пристрій, що отримує на вхід трифазну напругу електромережі і генерує на виході стабілізовану трифазну змінну напругу, захищене від вищих гармонік в мережі, що викликають синусоїдальну спотворення форми вхідної напруги, а також від провалів та викидів електроживлення, імпульсних та високочастотних перешкод.

Вихідна напруга магнітного синтезатора

на кожному напівперіоді основної частоти генерується шляхом поєднання шести прямокутних імпульсів від пов'язаних між собою імпульсних трансформаторів із насиченням, аналогічно інверторам із ступінчастим (покроковим) принципом управління. Принцип роботи магнітного синтезатора забезпечує точне регулювання формованих імпульсів за амплітудою та тривалістю. Магнітний синтезатор не містить будь-яких силових напівпровідникових елементів виконуючи функцію стабілізатора напруги.

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності вихідної напруги магнітного синтезатора не перевищує 4%, незалежно від ступеня спотворення напруги мережі на вході навіть при повністю асиметричному навантаженні.

Застосування активних фільтрів гармонік (АФГ)

Інша назва цих пристроїв – активні кондиціонери гармонік.

На відміну від пасивних фільтрів гармонік, які вимагають повного аналізу електромережі та виробляються для придушення лише кількох гармонік, активні фільтри гармонік електромережі, навпаки, пригнічують весь спектр гармонійних складових у мережі та не призводять до резонансу з існуючим обладнанням: силовими трансформаторами та косинусними конденсаторами.

Принцип дії активного фільтра гармонік

Заснований на аналізі гармонік нелінійного навантаження та генеруванні в розподільчу мережу таких самих гармонік, але з протилежною фазою.

В результаті вищі гармонічні складові нейтралізуються в точці підключення фільтра, не поширюються від нелінійного навантаження до мережі і не спотворюють напруги мережі.

Активний фільтр гармонік може бути встановлений у будь-якій точці розподільчої мережі та здатний компенсувати вищі гармоніки від однієї чи кількох нелінійних навантажень.

Активний фільтр гармонік забезпечує найкраще придушення найвищих гармонік. Наприклад, застосування такого фільтра дозволяє знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги з THD = 17% (без фільтрів) до THD = 2,5%

Завдання зменшення впливу гармонічних спотворень електромережі, що виникають під час роботи нелінійних споживачів, зокрема перетворювачів частоти, можна вирішити.

Складність та зміст обраного рішення залежать від ступеня внесених перетворювачами частоти гармонічних спотворень та їх відхилень від вимог ДСТ.

При невеликому збільшенні загального коефіцієнта гармонік мережі понад допустиме значення ($KU = 8,0\text{--}10,0\%$) достатньо встановити перед перетворювачами частоти лінійні дроселі або дроселі постійного струму (або одночасно ті й інші). При цьому для попередньої оцінки ефективності установки фільтруючих пристроїв рекомендується скористатися методиками розрахунку.

У випадках більшого перевищення гармонічних спотворень (KU більше $10,0\%$) потрібен ретельніший аналіз гармонічних спотворень мережі та розподілу енергії вищих гармонік з використанням вимірювача нелінійних спотворень або аналізатора якості електроенергії. Відповідні технічні рішення можуть бути спрямовані на придушення якоїсь однієї домінуючої вищої гармоніки (наприклад, пасивні резонансні фільтри) або придушення вищих гармонік у всьому спектрі (наприклад, активні фільтри гармонік).

У будь-якому випадку для зниження гармонічних спотворень рекомендується попереднє обстеження електромережі живлення для визначення:

- ✓ параметрів джерела електроживлення (потужності, конфігурації живлячого трансформатора тощо);
- ✓ характеристик підключених нелінійних споживачів (їх кількості та розподілу за фазами, потужністю, місцями підключення тощо).);
- ✓ ліній електропередачі (протяжності, перерізу проводів, розподільчих пристроїв тощо);
- ✓ локалізації та класифікації впливу гармонічних спотворень (короткочасні збої чи незворотні порушення в роботі приладів, вплив на всіх лінійних споживачів мережі чи вплив лише на локальній ділянці тощо);
- ✓ коефіцієнта нелінійних спотворень ненавантаженої електромережі (для оцінки якості електроенергії, що отримується від енергопостачальної організації).

Регулярно проводячи штатні профілактичні заходи в електромережі підприємства та послідовно виконуючи дії щодо встановлення додаткових фільтруючих пристроїв, починаючи з найпростіших, можна домогтися

зниження рівня гармонійних спотворень в електромережі під час роботи перетворювачів частоти рівня, допустимого ДСТ.

Реальні кейси та приклади з промислової практики

Приклади з промислової практики щодо підвищення якості електроенергії:

1. **Використання сучасних методів діагностики:** Створення систем моніторингу якості електроенергії в режимі реального часу дозволяє проводити своєчасний контроль за її показниками та виконувати відповідні заходи [9].

2. **Розподілена генерація:** Впровадження об'єктів розподіленої генерації, таких як сонячні та вітрові електростанції, сприяє підвищенню надійності енергетичної системи та зниженню втрат електроенергії [10].

3. **Когенерація:** Використання когенераційних установок, які одночасно виробляють електричну та теплову енергію, допомагає ефективно використовувати ресурси та підвищувати якість електроенергії [11].

4. **Використання віконного перетворення Фур'є:** Цей метод дозволяє аналізувати нестационарні сигнали напруги, що допомагає виявити та виправити відхилення від стандартів якості.

Ці методи допомагають покращити якість електроенергії та забезпечити надійне енергопостачання споживачів.

Приклади впровадження методів підвищення якості електроенергії:

1. Люксембург:

✓ В Люксембурзі було створено Інтегрований національний енергетичний та кліматичний план на період 2021-2030 років, який передбачає впровадження заходів для значного скорочення викидів парникових газів [12].

✓ Один з ключових аспектів цього плану - розвиток відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі та вітрові турбіни, що дозволяє не тільки знизити викиди, але і поліпшити якість електроенергії завдяки зменшенню впливу нестабільних факторів [12].

✓ Люксембург також активно працює над модернізацією своєї енергетичної інфраструктури, що включає оновлення мереж та впровадження сучасних технологій моніторингу [12].

2. Україна [12]:

✓ В Україні Закон "Про енергетичну ефективність" став важливим кроком до впровадження енергоефективних технологій та практик [12].

✓ Згідно з цим законом, підприємства та організації мають впроваджувати системи енергетичного менеджменту, які дозволяють більш ефективно використовувати ресурси та знижувати втрати електроенергії [12].

✓ Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), запровадила систему стимулювання споживачів до зниження енергоспоживання через диференційовані тарифи [12].

3. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя [13]:

✓ Університет активно займається дослідженнями та розробкою нових методів підвищення якості електроенергії [13].

✓ Одним із напрямків є використання віконного перетворення Фур'є для аналізу електричних сигналів, що дозволяє виявляти нестаціонарні аномалії у сигналах та своєчасно їх коригувати [13].

✓ Також університет співпрацює з промисловими підприємствами для впровадження цих методів на практиці, що дозволяє поліпшити якість електропостачання на локальному рівні [13].

Ці кейси демонструють, як країни та організації можуть використовувати різні підходи та технології для підвищення якості електроенергії.

Впровадження новітніх технологій для покращення якості електричної енергії

Показники якості електроенергії є критеріями забезпечення електромагнітної сумісності роботи різноманітних технічних засобів. Управління якістю електроенергії – це виконання необхідних організаційно-технічних засобів, які направлені на забезпеченні заданих вимог до якості електроенергії.

До організаційних заходів відносяться:

1. Використання раціональних схем електропостачання:

✓ Вибір оптимальної конфігурації мережі (радіальна, замкнена)

✓ Зменшення числа ступеней трансформації мережі

✓ Секціонування мережі

✓ Зниження протяжності мереж напругою 0,4 та 6-10 кВ

✓ Пристрій перемичок між цеховими трансформаторами напругою 0,4 кВ

✓ Підключення джерел електромагнітних перешкод та різкозмінного навантаження на окремі трансформатори або електрично віддалені секції шин

✓ Використання спеціальних схем включення вентильних перетворювачів

✓ Рівномірний розподіл навантаження по фазам

✓ Використання спеціальних схем з'єднання обмоток

✓ Використання схемних рішень, які призводять до збільшення потужності к.з., таких як об'єднання розщеплених обмоток низької напруги трансформаторів або попарного включення на паралельну роботу розщеплених обмоток.

2. Використання автоматичного регулювання трансформаторів, компенсуючих пристроїв, синхронних двигунів, вентильних перетворювачів, тиристорних джерел реактивної потужності.

3. Регулювання графіків навантаженні і режимів електропостачання.

4. Експлуатаційні заходи щодо покращення якості електроенергії, які відображені в свою чергу в посадових інструкціях, оперативних і ремонтних схем електропостачання.

До технічних заходів відноситься використання спеціальних технічних засобів або засобів, які вимагають значних капітальних вкладень.

До технічних засобів по управлінню встановлених відхилень напруги:

✓ Використання трансформаторів з РПН для централізованого і для місцевого регулювання напруги;

✓ Виконання схеми глибокого вводу на підприємстві;

✓ Реконструкція ЛЕП шляхом заміни або розщеплення проводів або шляхом переходу з ПЛЕП на кабельну лінію;

✓ Встановлення пристроїв продольної та поперечної ємнісної компенсації, синхронних компенсаторів, джерел реактивної потужності з вентильним перетворювачем, шунтуючих реакторів;

✓ Заміна частини асинхронних двигунів на промислових підприємствах на синхронні двигуни;

✓ Використання лінійних регуляторів напруги на ЛЕП або на вторинній обмотці силового трансформатора.

До технічних засобів по управлінню розмахом напруги відносяться:

✓ Установка трансформаторів більшої потужності або з розщепленою обмоткою низької напруги для підключення різкозмінного навантаження;

✓ Підсилення комутаційного обладнання на розподільчих пристроях, оскільки є необхідність підвищення значення потужності к.з. для зниження негативного впливу коливань напруги на споживача;

✓ Використання подвоєних реакторів для розділення живлення навантажень з різкозмінним характером;

✓ Використання продольно-поперечних компенсуючих пристроїв, в тому числі швидкодіючих статичних компенсуючих пристроїв на тиристорній основі;

✓ Використання спеціальних стабілізуючих пристроїв, які працюють на принципах феромагнітного посилювача.

До технічних засобів управління несинусоїдальністю напруги відносяться:

- ✓ Використання фільтро-компенсуючих пристроїв;
- ✓ Використання вентильних перетворювачів з використанням багатофазних схем випрямлювача;
- ✓ Використання спеціальних анодних трансформаторів при підключенні до мережі вентильних перетворювачів;
- ✓ Використання згладжуючих реакторів або фільтрів для зниження пульсацій випрямленого струму.

До технічних засобів управління несиметрією напруги відносяться:

- ✓ Використання симетруючих пристроїв, які складаються з ємнісних та індуктивних елементів, які мають електричні або електромагнітні зв'язки через трансформатори або автотрансформатори;
- ✓ Використання в низьковольтних мережах з нульовим проводом компенсаційних симетруючих пристроїв, які реалізують компенсацію струму як нульової, так і зворотної послідовностей, або обох послідовностей разом.

Висновки:

1. Використання конденсаторів та реакторів: Конденсатори використовуються для компенсації реактивної потужності, що зменшує втрати енергії та покращує стабільність напруги. Вони дозволяють зменшити перехідні процеси та коливання напруги, що позитивно впливає на роботу електрообладнання. Реактори ж допомагають зменшити вплив гармонійних спотворень у мережі, які можуть спричиняти додаткові втрати та погіршувати якість електроенергії.

2. Застосування фільтрів гармонійних спотворень: Фільтри гармонійних спотворень дозволяють зменшити негативний вплив високочастотних компонентів струму, які можуть пошкоджувати обладнання та знижувати його ефективність. Використання активних та пасивних фільтрів допомагає забезпечити чистоту синусоїди напруги, що є важливим для стабільної роботи електронних пристроїв та систем.

3. Використання стабілізаторів напруги: Стабілізатори напруги забезпечують постійну напругу на виході, що захищає чутливе обладнання від перепадів напруги і збільшує його термін служби. Вони можуть бути корисні як для побутових, так і для промислових споживачів, забезпечуючи надійне енергопостачання та зменшуючи ризик виходу з ладу дорогого обладнання.

4. Системи автоматичного регулювання напруги: Вони дозволяють автоматично підтримувати оптимальний рівень напруги в мережі, що зменшує ризик аварій і підвищує ефективність роботи енергосистеми. Ці системи можуть включати автоматичні трансформатори регулювання напруги та інші пристрої, що забезпечують стабільність електропостачання у різних умовах.

5. Моніторинг та аналіз якості електричної енергії: Постійний моніторинг параметрів електроенергії дозволяє вчасно виявляти та усувати проблеми, що виникають у мережі, забезпечуючи стабільну роботу споживачів. Використання сучасних систем моніторингу та аналізу допомагає ідентифікувати потенційні проблеми та вживати заходів для їх усунення ще до того, як вони стануть критичними.

6. Інноваційні технології та матеріали: Використання нових технологій, таких як суперпровідники та вдосконалені напівпровідникові матеріали, сприяє підвищенню ефективності та надійності електроенергетичних систем. Такі технології дозволяють зменшити втрати енергії, підвищити стабільність електропостачання та забезпечити надійну роботу обладнання протягом тривалого часу.

Впровадження цих методів є важливим кроком для підвищення якості електричної енергії, зменшення втрат та забезпечення стабільної роботи електрообладнання. Це дозволяє не тільки знизити витрати на енергопостачання, але й сприяє довготривалій надійності та ефективності енергосистеми.

Тема 5. Аналіз економічних аспектів якості електричної енергії

- Вартість заходів щодо підвищення якості.
- Економічні втрати від недостатньої якості електричної енергії.
- Вигоди від впровадження заходів щодо підвищення якості.

Аналіз економічних аспектів якості електричної енергії включає декілька ключових факторів [14]:

1. **Втрати енергії:** Погіршення якості електричної енергії може призвести до збільшення втрат енергії в мережах, що впливає на економічні затрати [14].

2. **Перегрів обладнання:** Несприйняття стандартів якості може спричинити перегрів електродвигунів та інших електричних машин, що прискорює їх старіння та підвищує ризик аварій [14].

3. **Збільшення споживання енергії:** Погіршення якості електричної енергії може збільшити споживання енергії та необхідну потужність обладнання [14].

4. **Відмови обладнання:** Погіршення якості електричної енергії може призвести до відмов електроніки керування, обчислювальної техніки та інших пристроїв [15].

5. **Економічні втрати:** Погіршення якості електричної енергії може призвести до економічних втрат як для енергопостачальних компаній, так і для споживачів [15].

Забезпечення високої якості електричної енергії є важливим для ефективного функціонування електроенергетичної галузі та зниження економічних втрат.

Вартість заходів щодо підвищення якості [16]

Заходи щодо підвищення якості електроенергії можуть бути досить вартими, оскільки вони включають модернізацію існуючої інфраструктури, впровадження нових технологій та підтримку стандартів якості. Ось кілька ключових аспектів:

1. **Модернізація інфраструктури:** Включає оновлення електромереж, заміну зношених електрообладнань та впровадження нових технологій для підвищення ефективності [16].

2. **Впровадження нових технологій:** Це може включати використання сучасних систем управління електроенергією, інтеграцію альтернативних джерел енергії та використання інноваційних методів для зменшення втрат енергії [16].

3. **Підтримка стандартів якості:** Забезпечення дотримання гарантованих стандартів якості електропостачання, що включає компенсації за їх недотримання [16].

Ці заходи можуть потребувати значних фінансових витрат, але вони також забезпечують стабільність електропостачання та покращення якості життя споживачів.

Економічні втрат щодо підвищення якості

Для оцінки економічної шкоди в Україні, зумовленої неякісною електроенергією, насамперед:

Визначаємо її сумарну потужність трансформаторів $W_{уст}$. Як відомо, ця величина в 4-5 разів перевищує сумарну потужність генераторів електростанцій $W_{гсп}$; в Україні складає 50 тис. МВ·А. Таким чином, $W_{уст} = 50 \cdot 5 = 250$ ГВт.

Щорічна величина втрати потужності внаслідок виходу з ладу трансформаторів ΔW в результаті додаткового зносу ізоляції через несиметрії та несинусоїдності напруги за усередненою оцінкою інституту "Енергомережапроект" становить 20%. Ця величина справедлива, якщо більше 75% трансформаторів працюють із навантаженням понад 50%.

Таким чином,

$$\Delta W = 0,2 \cdot 0,75 \cdot W_{уст} = 0,15 \cdot 250 = 37,5 \text{ ГВт} \quad (1.13)$$

Тоді розходи по заміні трансформаторів $37500 \cdot 0,25 = 9375$ млн. грн/рік або $9375/8 = 1,17$ млрд. дол./год; Оскільки електродвигуни (електропривода) споживають біля 70% всієї електроенергії, що виробляється, $S_{вир}$, в 2012 році ця величина складала біля 200 млрд. кВт·ч, то можна записати що $S_{еп} = 0,7 \cdot S_{вир} = 0,7 \cdot 200 = 140$ млрд. кВт·рік.

Оцінімо значення втрат, які пов'язані із впливом низької якості електроенергії на пошкодженість електродвигунів, $\Delta S_{дв}$, і відповідно: $\Delta S_{дв} = S_{еп} \cdot 0,2 = 140 \cdot 0,2 = 28$ млрд. кВт·рік.

Тоді вартість додаткової споживаної електроенергії (0,5 грн/кВт год) $\Delta S_{дв}^{(дод)} = 28 \cdot 0,5 = 14$ млрд. грн/рік або $14/8 = 1,75$ млрд. дол./рік. Визначаємо вартість щорічних втрат електроенергії на основній частоті, які за даними 2012 р. складають 12%. $200 \cdot 0,12 \cdot 0,5 = 12$ млрд. грн/рік або $12/8 = 1,5$ млрд. дол./рік. Тоді вартість сумарних економічних втрат електроенергії, $S_{\Sigma} = 1,17 + 1,75 + 1,5 = 4,42$ млрд. дол. Приймаємо $S_{\Sigma} \approx 5$ млрд. дол.

Таким чином, оцінне значення електромагнітних втрат електричних мережах України, з урахуванням величини втрати у мережі, а також технологічні складові можна прийняти рівним 5 – 6 млрд. дол./рік.

Впровадження у виробництво нових технологічних процесів, пов'язаних з застосуванням потужних несиметричних, нелінійних та швидкозмінних навантажень, викликає різке погіршення показників якості електроенергії (ЯЕ). Однофазні установки, що отримали широке застосування електрошлакового переплаву потужністю 2500-10000 кВ·А, електровози потужністю до 8000 кВ·А на змінному однофазному струмі та однофазні індукційні печі до 16000 кВ·А водночас є потужними несиметричними навантаженнями, а багато з них одночасно і джерелами появи вищих гармонік. Ряд споживачів, наприклад, таких як трифазні дугові сталеплавильні печі, також стають джерелами несиметрії та появи вищих гармонік. Вентильні перетворювачі вносять значні спотворення у форму кривої напруги мережі, будучи потужними генераторами вищих гармонік при регулюванні напруги зміною кута управління.

Таким чином, наслідком зниження ЯЕ є збільшення втрат потужності та електроенергії в мережах енергетичних систем та підприємств, а також в електрообладнанні (трансформатори, конденсатори, що обертаються машини), зменшення пропускної спроможності мереж, погіршення показників технологічних процесів, зниження продуктивності та підвищений знос електроустаткування. Економічні збитки через низьку якість електроенергії становить у світі близько 500 млрд. у.о. на рік. Вищі гармоніки струму та напруги негативно впливають на роботу електронних схем управління, релейного захисту, автоматики, створюють резонансні явища у контурах, що утворюються індуктивністю мережі та ємністю конденсаторних установок, що призводить до перегріву та виходу останніх з ладу.

Існує кілька способів усунення наслідків, що виникають від зниження ЯЕ. Це:

- Зменшення опорів елементів СЕП за допомогою здвоєних реакторів, установок поздовжньої компенсації, струмообмежувальних пристроїв. При цьому несиметрія та несинусоїдальність, як і негативне вплив їх на мережі та електроприймачі, що не усуваються;

- Зміна величини напруг симетричних складових шляхом створення симетричної системи напруг на затискачах приймача, підключеного до несиметричної системи напруги, наприклад, до неповнофазної ЛЕП. Несиметрія вхідних струмів та напруг при цьому не усувається. Цей спосіб

пов'язаний з додатковими капіталовкладеннями та втратами у фільтросиметруючих пристроях;

- обмеження струмів симетричних складових основної та вищої гармонійних частот у місцях їхнього генерування. Досягається при включенні статичних пристроїв багатофункціонального призначення на реактивних елементах, наприклад, для регулювання реактивної потужності з одночасною фільтрацією вищих гармонік або генеруванням пульсуючої потужності для компенсації несиметрії в мережі. Цей спосіб - найбільш ефективний, тому що усувається причина спотворення якості напруги, а не її наслідки.

Зниження показників якості електроенергії у системах електропостачання промислових підприємств викликає негативні наслідки, серед яких:

- збитки від порушення нормального перебігу технологічних процесів при відхиленнях та коливаннях напруги, а також інших показників КЕ;

- збільшення втрат електроенергії в обмотках електричних машин та мережах;

- скорочення терміну служби електроустаткування, збільшення капітальних вкладень у системи електропостачання.

Машини, що обертаються. Момент обертання та ковзання асинхронних електродвигунів залежить від напруги з їхньої затискачах. При зниженні напруги утрудняється пуск двигунів і знижується частота обертання, що призводить до падіння продуктивності механізмів та збільшення споживаного струму, тобто до зростання втрат у мережі. При підвищенні напруги зростає споживання реактивної потужності, відбувається старіння та знос ізоляції (наприклад, з підвищенням напруги на 1%, споживання реактивної потужності збільшується на 3%). Поява в мережі несиметрії напруг призводить до значного збільшення втрат активної потужності в обмотках двигуна внаслідок низького опору зворотної після тривалості і до зниження крутного моменту двигуна.

Опір зворотної послідовності асинхронних двигунів 5-7 разів менше опору прямої послідовності, а тому допустима для двигунів несиметрія напруг обмежується значенням 2%, інакше різко знижується термін служби двигунів.

Так, при несиметрії напруги в 2% термін служби двигунів зменшується на 10,8 %, при несиметрії 4 % – зменшується вдвічі. Для синхронних двигунів зменшення терміну служби при несиметрії напруги в 2% становить 16,2%, трансформаторів – 4%, конденсаторів – 20%; причому в синхронних двигунах втрати в роторі та його перегрів від несиметрії напруги вищі, ніж у статорі. При несиметрії напруги 2% струм зворотної послідовності асинхронного двигуна зростає на 15 %, втрати зменшуються – на 8 %, а температура

нагрівання обмотки з ізоляцією класу А досягає 5°C , що становить значну величину, якщо врахувати, що додаткове нагрівання обмотки двигуна з ізоляцією класу А на 8°C скорочує термін його служби вдвічі. Якщо несиметрія досягає 5%, то струм зворотної послідовності зростає до 38%, втрати до 50%, а температура перегріву – до 30°C .

Обертовий та пусковий моменти асинхронного двигуна при несиметрії напруг зменшуються пропорційно квадрату коефіцієнта несиметрії напруг. Більше 20% асинхронних двигунів виходять з ладу при їх роботі в несиметричних режимах. Також негативно позначається на роботі машин, що обертаються, зниження інших показників якості електроенергії. Так, при зменшенні напруги на 10% термін служби асинхронних двигунів знижується вдвічі. Поява вищих гармонік сприяє збільшенню активної потужності за рахунок вищого опору обмоток струмам підвищеної частоти.

Електроосвітлювальні лампи. Відхилення напруги впливають на термін служби ламп, світловий потік та освітленість. При зниженні напруги споживана потужність лампи знижується, проте її світловий потік при цьому падає швидше. Так, при відхиленні напруги на 10% світловий потік знижується на 40%. Для люмінесцентних ламп зміна світлового потоку приблизно пропорційно відхилення напруги. При зниженні напруги на 10% пуск та робота цих ламп стають ненадійними.

Підвищення напруги на освітлювальних установках на 10% знижує їх термін служби у 4 рази. Зниження освітленості впливає продуктивність праці. Так, на складальних роботах високої точності продуктивність праці зі зміною освітленості на 1 лк падає на 0,007-0,012%. Істотно змінюється і термін служби ламп, а передчасний їхній вихід із ладу завдає значної шкоди підприємству.

Силові конденсатори особливо схильні до негативного впливу вищих гармонік, тому що їх опір струмам вищих гармонік зменшується зі зростанням частоти, що призводить до перевантаження конденсаторів по струму.

Електротехнологічні установки характеризуються зниженням продуктивності при падінні напруги, погіршенням температурного режиму, збільшенням тривалості перебігу технологічного процесу та перевитратою електроенергії.

Електролізне виробництво. При зниженні напруги на електролізних ванн (наприклад, хлору, алюмінію, магнію) зменшується оптимальний струм, при якому забезпечується найбільша продуктивність і підвищується витрата електроенергії. В результаті продуктивність знижується приблизно пропорційно до падіння напруги.

Трансформатори (як і конденсатори) є статичними пристроями, тому перебіг у них струмів зворотної послідовності та струмів вищих гармонік викликає додаткові втрати, які розраховують так само, як і для симетричних режимів роботи.

Електронні пристрої автоматики схильні до впливу вищих гармонік, тому для забезпечення нормальних умов їх роботи необхідно обмежувати значення коефіцієнта несинусоїдальності або ж зменшувати частоту окремих гармонік струму чи напруги.

Вигоди від впровадження заходів щодо підвищення якості

На роботу електротехнологічних (ЕТУ) установок найбільшою мірою впливають відхилення напруги. Вплив інших показників якості електроенергії, зазвичай, незначно. За наявності відхилень напруги змінюється споживання активної потужності та енергії, а також реактивної потужності U той же час спостерігається зміна якості та кількості продукції, що випускається, порушення технологічного процесу, скорочення терміну служби обладнання та ін. Як правило, залежність продуктивності ЕТУ П від відхилення напруги δU можна уявити економічною характеристикою $Y = Y(n)$ такого виду:

$$Y = (E_H \cdot K + I_{\Pi}) \cdot (1 - P^x) + C_{y.п.} \cdot W_p \cdot P^x \cdot (\omega^x - 1) \quad (1.14)$$

де Y - номінальний збиток від відхилення напруги;

K - капітальні витрати на ЕП;

I_{Π} - постійна частина витрат виробництва, тис. грн/рік;

P^x - відносна зміна продуктивності;

$C_{y.п.}$ - питома вартість ЕЕ, грн/кВт·год;

W_p - річне споживання активної енергії, кВт·год;

ω^x - відносна зміна питомої витрати ЕЕ.

Відхилення напруги на підстанціях від номінального значення позначається, головним чином, на роботі асинхронних двигунів, термічних печей та освітлювального навантаження, що входять до складу узагальненого навантаження.

Висновки:

Аналіз економічних аспектів якості електричної енергії є важливим для оптимізації енергетичних процесів та зниження витрат. Ось декілька ключових висновків:

1. **Зниження витрат на енергію:** Покращення якості електричної енергії дозволяє зменшити витрати на енергію, оскільки високоякісна електроенергія зменшує втрати енергії в системі. Знижуючи кількість енергії,

необхідної для компенсації низької якості, підприємства можуть знизити загальні витрати на електроенергію, що веде до економії коштів.

2. Підвищення ефективності обладнання: Високоякісна електроенергія зменшує навантаження на обладнання, що підвищує його термін служби та зменшує витрати на обслуговування та ремонт. Наприклад, стабільна напруга та чистота синусоїди зменшують теплові втрати в електронних пристроях та двигунах, запобігаючи передчасному зносу.

3. Зниження витрат на енергозберігаючі заходи: Високоякісна електроенергія зменшує потребу в додаткових енергозберігаючих заходах, таких як конденсатори та фільтри, що знижує витрати на їх придбання та обслуговування. Це також зменшує потребу в капіталовкладеннях для модернізації електричних систем і мереж.

4. Покращення якості продукції: Високоякісна електроенергія забезпечує стабільність напруги, що є важливим для виробництва високоякісної продукції, особливо в промисловому секторі. Наприклад, у виробництві напівпровідників, де навіть незначні відхилення напруги можуть спричинити дефекти в продукції, стабільна якість електроенергії є критично важливою.

5. Зниження витрат на енергетичні ризики: Високоякісна електроенергія зменшує ризики, пов'язані з перебоями в енергопостачанні, що дозволяє зменшити витрати на страхування та інші заходи безпеки. Наприклад, підприємства зменшують ризик простоїв виробництва через нестабільну електроенергію, що сприяє стабільності виробничих процесів та зниженню операційних витрат.

Ці висновки підкреслюють важливість аналізу економічних аспектів якості електричної енергії для оптимізації енергетичних процесів та зниження витрат. Інвестуючи в покращення якості електроенергії, підприємства та домогосподарства можуть значно знизити свої витрати, підвищити ефективність використання ресурсів та забезпечити стабільну роботу обладнання.

РОЗДІЛ 2. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Тема 1. Поняття реактивної потужності. Компенсація реактивної потужності

- Вступ
- Проблеми, пов'язані з реактивною потужністю
- Компенсація реактивної потужності
- Методи компенсації реактивної потужності
- Приклади використання та розрахунки
- Технічні та економічні аспекти компенсації

Вступ

Енергетичне уявлення реактивної потужності (РП) характеризує швидкість зміни енергії, що періодично накопичується в змінних електромагнітних та електростатичних полях. Миттєва реактивна потужність протягом періоду приймає позитивні та негативні значення, змінюючись синусоїдально з подвійною частотою. Вважається, що позитивні значення миттєвої потужності відповідають передачі енергії з мережі до реактора, а негативні – навпаки, з реактора до мережі.

Середнє значення миттєвої потужності за половину періоду напруги стоку дорівнює нулю. Практичне визначення РП характеризує величину, для якої справедлива умова балансу РП у вузлах навантаження. При цьому слід враховувати принципову різницю між балансом активної та реактивної потужності в системі.

Основний нормативний показник підтримки балансу активної потужності в кожен момент часу – це частота змінного струму (загальний критерій), а для РП – рівень напруги (місцевий критерій) у вузлах навантаження. Баланс РП насамперед потрібно забезпечити для порівняно невеликих територій, а потім і в усій системі загалом.

Щодня ми використовуємо електроенергію. У побуті, на роботі, здійснюючи дзвінок по мобільному або дивлячись телевізор. Однак більшість споживачів просто не замислюються про способи економії та ефективну витрату електроенергії.

Інша річ – промисловість. Тут питання оптимізації витрат стоїть чи не першому місці. Проблема компенсації реактивної потужності на основі використання постійного струму просто не існувала, цей факт підкреслив ще Т. Едісон, який займався електрифікацією Нью-Йорка наприкінці XIX століття, але вона виникла одночасно із застосуванням на практиці змінного, а особливо трифазного струму.

Компенсація реактивної потужності – це важливий процес, який забезпечує ефективність електроенергетичних систем та зменшує втрати електричної енергії. Реактивна потужність виникає через індуктивні та ємнісні навантаження, які можуть призводити до збільшення витрат палива та втрат енергії в мережах. Це явище впливає на роботу електричних приладів та обладнання, збільшуючи навантаження на лінії електропередачі, трансформатори та інші компоненти електромережі.

Основним методом компенсації реактивної потужності є використання конденсаторних установок. Ці пристрої підключаються до електромережі та створюють протилежний ефект до індуктивних навантажень, компенсуючи реактивну потужність і знижуючи її негативний вплив на систему. Конденсаторні установки допомагають зменшити втрати електричної енергії, збільшити ефективність роботи електричних приладів та знизити витрати на оплату електроенергії.

Існують також інші методи компенсації реактивної потужності, такі як використання синхронних компенсаторів та реакторів. Синхронні компенсатори – це спеціальні електричні машини, які генерують або поглинають реактивну потужність в залежності від потреби системи. Реактори, в свою чергу, використовуються для обмеження перенапруг та стабілізації роботи електричних мереж.

Використання сучасних методів компенсації реактивної потужності дозволяє забезпечити стабільність та надійність роботи електроенергетичних систем, знизити втрати електричної енергії та покращити економічну ефективність. Це важливий аспект у забезпеченні стійкого розвитку енергетики та зменшенні негативного впливу на навколишнє середовище.

Проблеми, пов'язані з реактивною потужністю:

Компенсація реактивної потужності може викликати кілька проблем, які варто враховувати:

- ✓ Витрати на обладнання - встановлення систем компенсації реактивної потужності, таких як конденсаторні установки або синхронні компенсатори, потребує значних фінансових витрат;
- ✓ Обслуговування та технічне обслуговування - системи компенсації потребують регулярного обслуговування та технічного обслуговування для забезпечення їхньої ефективної роботи;
- ✓ Комплексність системи - встановлення системи компенсації реактивної потужності може бути складним завданням, оскільки вимагає точного планування та координації;

✓ Вплив на навколишнє середовище - некоректне використання або обслуговування систем компенсації може мати негативний вплив на навколишнє середовище, наприклад, через викиди та витрати енергії;

✓ Залежність від технологій - системи компенсації реактивної потужності можуть залежати від технологічних проривів та інновацій для покращення ефективності та зниження витрат.

Більшість споживачів електроенергії є електричні машини (трансформатори, асинхронні двигуни, обладнання для дугового зварювання), в яких змінний магнітний потік пов'язаний з обмотками. Внаслідок цього в обмотках при перебігу змінного струму індукуються реактивні е.р.с. що зумовлюють зсув по фазі (f_i) між напругою і струмом. Така навантаження, крім активної потужності, споживає і реактивну потужність, збільшуючи в середньому на 20-25% повну потужність по відношенню до активної.

Параметр, який визначає споживання реактивної потужності, називається $\cos \varphi$.

Відповідно:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.1.)$$

де P – активна потужність,

S - повна потужність,

Q - реактивна потужність,

$\cos \varphi$ – коефіцієнт споживання реактивної потужності.

Таким чином, зниження $\cos \varphi$ означає збільшення споживання реактивної потужності, відповідно необхідно намагатися збільшити $\cos \varphi$.

Наявність в електромережі реактивної потужності знижує якість електроенергії, а саме: призводить до втрат потужності в електричних лініях, до перепадів напруги в електричних лініях, необхідності завищення потужності силових трансформаторів та перерізу кабелів, просадок напруги в електромережі.

Також має місце збільшення плати за електроенергію, що саме собою є серйозною проблемою, що призводить до додаткових фінансових витрат.

Застосування установок компенсації реактивної потужності (далі УКРМ), дозволяє знизити обсяг споживаної реактивної потужності, досягти енергозбереження та економічного ефекту, а це в свою чергу дає можливість використання заощаджених коштів на покращення та оновлення необхідного промислового обладнання.

Компенсація реактивної потужності

Повна потужність пристрою складається з двох складових – активної та реактивної. Активна потужність необхідна для живлення підключених пристроїв у мережі, тому ще називається «корисною» потужністю.

Для ланцюгів постійного струму існує лише активна потужність. І в приладах, що підключаються до неї, вона перетворюється в необхідний тип енергії, наприклад, в тепло для нагрівача.

Інша складова - реактивна потужність - є енергією, що перетікає між джерелом і реактивними елементами мережі і назад. Таке переміщення відбувається за одне коливання мережі змінного струму.

Така потужність виникає, наприклад, при включенні до мережі магнітних обмоток. У такому випадку енергія тимчасово запасається в котушці, а потім віддається назад, що призводить до розсинхронізації в мережі синусоїд, відставання змін струму від напруги. Для ємнісного навантаження ситуація схожа, тільки тут струм починає випереджати напругу. В обох випадках у мережі виникає реактивна енергія.

Вплив реактивної потужності

Реактивна потужність не витрачається на корисну роботу і тому часто називається шкідливою компонентою потужності. Однак існує велика кількість пристроїв, яким необхідна наявність реактивної потужності. Наприклад, коли реактивна потужність не потрібна для роботи ламп розжарювання, вона потрібна електродвигунам.

Реактивна складова дозволяє наситити обмотки двигуна електромагнітним полем. В іншому випадку вони не будуть обертатися, а двигун не зможе виконувати свою основну функцію. У цьому асинхронні електродвигуни глобально споживають до 40% всієї потужності електроустановок. Інші споживачі реактивної потужності – трансформатори, перетворювачі, електропечі та ін.

Вочевидь, що недолік реактивної потужності може дуже нашкодити. Однак різним типам електрообладнання потрібна різна кількість реактивної потужності, і її надлишок також призводить до негативних наслідків для всієї мережі.

✓ Збільшення втрат у мережі. Перетікання електричного струму у бік реактивних елементів і назад супроводжується втратами активного опору. Зокрема це призводить до надмірного нагрівання провідників ліній електропередавання і, як наслідок, до їх провисання у разі повітряних ЛЕП. У деяких випадках це може призвести до замикання на землю або перетину дротів.

✓ Зниження пропускну́ї здатно́сті мережі. Мережі електропостачання розраховані певний струм. Для компенсації витрат «місця» у проводах на реактивну складову часто доводиться збільшити струм у мережі. Це призводить до спрацьовування захисту від навантаження та подальшого відключення споживачів.

✓ Зменшення терміну служби пристрою. Під'єднані до мережі пристрої піддаються додатковому зношуванню під впливом реактивної потужності. Це важливо, наприклад, для автотрансформаторів кутових підстанцій.

✓ Зниження напруги споживача. Збільшення сили струму, необхідне компенсації впливу реактивної енергії, призводить до зниження напруги. Це шкодить багатьом електроприладам, наприклад, знижує оберти електродвигунів.

✓ Підвищена похибка обліку електроенергії. Зниження напруги в мережі призводить до збільшення значень похибки на трансформаторах струму та напруги. Таким чином, вимірювальні прилади перестають відповідати необхідному класу точності, що веде до пере- або недооблік електроенергії, що йде до споживачів. А це може спричинити економічні втрати.

Враховуючи безліч проблем, що виникають при перевищенні реактивної потужності в мережі, а також поширення її споживачів, очевидно є необхідність компенсації реактивної потужності.

Компенсація реактивної потужності

Компенсація реактивної потужності полягає у впливі на баланс реактивної потужності в електросистемі з метою регулювання параметрів електроенергії.

Компенсуючі пристрої УКРМ розміщують джерело реактивної потужності поблизу споживача. Таким джерелом служать конденсаторні батареї. Так можна позбавити мережі електропередачі від зайвої індуктивної енергії, що необхідне компенсації реактивної складової потужності.

Однак, оскільки споживання електроенергії на будь-якому підприємстві не статично і може значно змінюватися в короткі терміни, змінюється і величина споживаної активної енергії.

Методи компенсації реактивної потужності

Одним з основних питань вирішуваних при проектуванні та експлуатації СЕП пром підприємств є питання КРП, що включає: правильний вибір типу КП, потужності, раціонального їх розміщення в СЕП, вибір оптимального способу регулювання режиму роботи КП. Розв'язання перелічених завдань

забезпечить зниження перетоків реактивної потужності мережами, що підвищить пропускну здатність ЛЕП, знизить трансформаторні потужності, забезпечить стійкість вузлів навантаження.

Введення ДДРП призводить до зниження втрат у період максимальних навантажень в середньому на 0,081 кВт на 1 квар потужності КП, що вводиться. При КРП втрати напруги в зовнішній мережі зменшуються, а це дає можливість за певних умов використовувати регульовані ДРП як регулятори напруги в мережі.

Для компенсації реактивної потужності використовують додаткові джерела реактивної потужності. До них відносяться ЦД, ЦД та комплектні конденсаторні установки.

До сучасних ДДРП висуваються низка вимог:

- плавність регулювання РП;
- Плавний перехід з одного режиму в інший;
- велика глибина регулювання потужності обох режимах;
- Мінімальний рівень вищих гармонік у кривій мережевого струму;
- малі питомі втрати активної потужності у КП;
- незалежність наявної потужності КП від відхилень напруги в мережі.

Пристрої компенсації реактивної потужності - УКРПМ

УКРП або БСК (батарея статичних конденсаторів) є батареєю, що складається з паралельно-послідовно з'єднаних конденсаторів, суміщену з міцною металоконструкцією і включає додаткове обладнання. Конструктивно БСК складається з блоків конденсаторів, встановлених схемою трикутник, встановлених у відкритих або закритих розподільних пристроях на опорних ізоляторах. Між блоками прокладено з'єднання за допомогою струмопровідних шин, конденсатори з'єднані за допомогою гнучких зв'язків.

У складі УКРП замість конденсаторів можуть використовуватися котушки індуктивності, якщо реактивна потужність ємнісного характеру. Такий варіант застосовується рідко, наприклад, компенсації на ЛЕП.

Компенсація реактивної потужності відбувається так:

Датчик (контролер, регулятор) проводить вимірювання потужності в процесі ввімкнення/вимкнення конденсаторів. Отримані за наслідками вимірів дані порівнюються з еталонними. За наявності відхилень від встановлених значень апарат перемикається для забезпечення необхідної компенсації.

Іншим пристроєм компенсації є статичний генератор реактивної потужності СТАТКОМ.

СТАТКОМ є пристроєм, який використовує силову електроніку для швидкого регулювання реактивної потужності у мережах змінного струму. Він

дозволяє покращити стабільність напруги та підвищити ефективність роботи електричних мереж.

СТАТКОМ базується на використанні силових транзисторів (IGBT або GTO), які дозволяють швидко змінювати фазу та амплітуду реактивного струму. Пристрій може працювати як в режимі генерації, так і поглинання реактивної потужності, залежно від потреб мережі.

Переваги STATCOM

1. Швидкодія: СТАТКОМ має високу швидкодію, що дозволяє миттєво реагувати на зміни в електричній мережі.

2. Компактність: Пристрій компактніший та легший у встановленні порівняно з традиційними компенсаторами.

3. Ефективність: Висока ефективність дозволяє знижувати втрати енергії та покращувати якість електропостачання.

4. Гнучкість: СТАТКОМ може використовуватись у різних умовах, як в міських мережах, так і в промислових підприємствах.

Використання STATCOM

СТАТКОМ широко використовується для:

- Компенсації реактивної потужності в електричних мережах.
- Стабілізації напруги у промислових та комунальних мережах.
- Поліпшення якості електропостачання та зменшення гармонічних спотворень.
- Підвищення надійності та ефективності роботи електричних систем.

Приклади використання STATCOM

У реальних умовах СТАТКОМ встановлюється на підстанціях, великих промислових об'єктах та в мережах з високим навантаженням для підтримання стабільної напруги та зниження втрат енергії.

Статичний компенсатор реактивної потужності (СТАТКОМ) - це пристрій для покращення якості електроенергії в мережах змінного струму шляхом швидкої компенсації реактивної потужності.

Приклади використання та розрахунки

Електричні мережі 0.4 кВ та підстанції 6 (10) кВ/0.4 кВ у розрахунках компенсації реактивної потужності.

Усі електричні мережі 0.4 кВ об'єктів за фактом межі балансової належності, як правило, що визначається наявністю або відсутністю власних навантажень 6/10 кВ, можна умовно розділити на підстанції 6 (10) кВ/0.4 кВ, що включають, і приєднані по стороні нижчої напруги ТП, що зумовлює вибір

способу, методику розрахунку компенсації реактивної потужності та вибір установок корекції коефіцієнта потужності.

✓ підстанціями 6 (10) кВ/0.4 кВ при малому обсязі нелінійних навантажень може бути доцільною компенсація за вищою напругою;

✓ навантаженнями 6/10 кВ необхідно враховувати, що з цих навантажень реактивна потужність має передаватися з мережі 6 (10) кВ, тобто. при інтеграції пристроїв корекції коефіцієнта потужності за нижчої напруги ТП 6/10 кВ потрібно задіяти спосіб індивідуальної або групової компенсації.

Розрахунок компенсації реактивної потужності в електричних мережах 0,4 кВ

При розрахунках компенсації реактивної потужності в електричних мережах 0.4 кВ слід враховувати, що:

✓ реальна потужність, генерована установкою компенсації з урахуванням конденсаторних батарей, залежить від номінального напруги мережі U_n і напруги у точці приєднання установки

$$U_{вх} - Q_{\phi} = (U_n/U_{вх})^2 \cdot Q_{пасп} \quad (2.2.)$$

де $Q_{пасп}$ - паспортна номінальна потужність установки.

Для мережі 0,4 кВ $U_n = U_{вх} - 1$, для мереж 6/10 кВ $U_n/U_{вх} = 0,95$;

✓ за наявності в електричній мережі об'єкта синхронних двигунів та/або протяжних повітряних ліній допустиму розрахункову потужність генерації установкою КРП, УКРМІ, УКП потрібно зменшити при інтеграції збоку;

✓ •напруги 0.4 кВ на $Q_{сд}$ – потужність, що генерується синхронними двигунами в мережі 0,4 кВ ($Q_{сд} = \alpha \cdot Q_n$, де α – паспортне (або довідкове) граничне значення навантаження двигуна за реактивною потужністю, Q_n – номінальна реактивна потужність);

✓ напруги 6/10 кВ на $(0,7 \cdot Q_{сд} + Q_l)$, де Q_l – реактивна потужність, що генерується повітряною (або кабельною) лінією, яка дорівнює $U^2 \cdot Q_y \cdot L$ (U – номінальна мережна напруга, Q_y – питома потужність 1 км кабельної/повітряної лінії, L - довжина лінії);

✓ корекція коефіцієнта потужності інтеграцією установок КРП, УКРП, УКП тощо не виконується в мережі 0.4 кВ при розрахунковій потужності установки < 50 кВАр, та в мережі 6/10 кВ при розрахунковій потужності установки < 800 кВАр;

✓ вибір конденсаторів для установки, батареї або індивідуальної схеми компенсації не можна здійснювати лише по відношенню до сумарної потужності нелінійних навантажень до потужності трансформаторів – технічно грамотний вибір конденсаторів виконується за характером

навантажень, режимом роботи обладнання, інтенсивністю засмічення мережі гармоніками струму, умовами експлуатації тощо. на основі енергоаудиту та тільки профільними фахівцями, які виготовляють установки компенсації реактивної потужності;

Технічні та економічні аспекти компенсації

З урахуванням інтенсивного збільшення індуктивного навантаження у споживачів – промислових та непромислових об'єктів компенсація реактивної потужності практично завжди актуальна та забезпечує економію електроенергії та, відповідно, енергозбереження та енергетичну ефективність підприємства, організації, проте:

- ✓ незважаючи на очевидні технічні вигоди від стабілізації основних параметрів мережі та виведення електрообладнання на оптимальний режим роботи, пріоритетом вибору для переважної більшості об'єктів залишається економічна доцільність реалізації заходів щодо компенсації реактивної потужності;

- ✓ економічний ефект впровадження установок компенсації реактивної потужності (або інших заходів щодо підвищення коефіцієнта потужності, енергозбереження) розраховується за декількома показниками та актуальними на поточний момент методичними рекомендаціями.

Розрахунки економічного ефекту багатопланові, складні, вимагають великої кількості вступних даних, значного часу і тому для оперативної оцінки економічної доцільності заходів щодо компенсації реактивної потужності використовують термін окупності капітальних вкладень, який сьогодні прийнято визначати за процентною ставкою за кредитами на поточний момент.

В даний час математичне формулювання завдання виходить з мінімуму наведених витрат на електричну мережу та обладнання, що компенсує. Вирішення цієї задачі зводиться до аналізу характеру та режимів роботи електроустановок у різний час доби, споживання ними РМ у години максимальних та мінімальних навантажень енергосистеми. При цьому враховується економічно обґрунтована найбільша величина реактивної потужності Q_{e1} , що передається із системи режиму її найбільших активних навантажень у мережу споживача, а також визначена за технічними умовами найменша величина реактивної потужності Q_{e2} , яка може бути передана з мережі енергосистеми в режимі її найменших активних. Як правило, підприємство не повинно видавати РМ у мережу енергосистеми.

Для визначення економічно оптимальної (вхідної) потужності, яка може бути передана промпідприємству в режимі найбільших та найменших активних навантажень енергосистемі (Q_{e1} та Q_{e2}), промпідприємство повідомляє в енергосистему значення розрахункових навантажень у вузлах (P_p та Q_p). Кожному підприємству енергосистема розраховує економічно доцільну вхідну потужність Q_{e1} . За вхідною потужністю визначають сумарну потужність КУ підприємства за виразом:

$$Q_{\text{КП}} = Q_p - Q_{e1} \quad (2.3.)$$

А відповідно до значення Q_{e2} визначають регульовану частину КП:

$$Q_{\text{рег}} = Q_{\text{КП}} - Q_{e2} \quad (2.4.)$$

Висновки:

Компенсація реактивної потужності є важливим аспектом електропостачання, оскільки вона допомагає зменшити втрати енергії та покращити ефективність системи. Ось декілька ключових висновків:

1. **Зниження втрат енергії:** Компенсація реактивної потужності дозволяє зменшити втрати активної потужності, що створюється реактивним навантаженням. Без компенсації реактивна потужність збільшує струмові навантаження в мережі, що призводить до додаткових втрат активної потужності у вигляді тепла в провідниках і трансформаторах.

2. **Покращення якості електроенергії:** Зменшення реактивного струму покращує якість електроенергії, зменшуючи падіння напруги в довгих кабелях. Це особливо важливо для споживачів, які мають чутливе обладнання, що залежить від стабільної напруги, таких як комп'ютери, медичне обладнання та промислові машини.

3. **Зниження витрат:** Впровадження конденсаторних установок компенсації дозволяє знизити оплату за споживання реактивної потужності на 70-80%. У багатьох країнах енергопостачальні компанії накладають додаткові тарифи на споживачів, які використовують велику кількість реактивної потужності. Компенсація допомагає зменшити ці витрати, що призводить до економії коштів для підприємств і домогосподарств.

4. **Збільшення терміну служби обладнання:** Зменшення навантаження на силові трансформатори та проводи збільшує їх термін служби. Реактивна потужність створює додаткові струмові навантаження, що спричиняють нагрівання і знос обладнання. Компенсація допомагає зменшити ці ефекти, забезпечуючи тривалу та надійну роботу електрообладнання.

5. **Економічні переваги:** Компенсація реактивної потужності є найдешевшим і ефективним засобом підвищення техніко-економічних показників електропостачання. Вона не лише зменшує витрати на

електроенергію, але й дозволяє оптимізувати використання існуючих енергетичних ресурсів. Це особливо важливо в умовах зростаючого попиту на електроенергію та обмежених природних ресурсів.

Компенсація реактивної потужності є не лише технічно необхідною, але й економічно вигідною. Вона сприяє підвищенню ефективності роботи електричних мереж, знижує витрати на енергопостачання та допомагає захистити електрообладнання від передчасного зносу.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА:

1. <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi>
2. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18#Text> Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії
3. [Про затвердження Кодексу систем ... | від 14.03.2018 № 310](#) Про затвердження Кодексу систем розподілу
4. [01.pdf](#)
5. <https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/tool/print/index.php?id=30892>
6. Якість електричної енергії [Якісні-характеристики-електричної-енергії.pdf](#)
7. uk.wikipedia.org
8. lab.esolut.kiev.ua
9. elartu.tntu.edu.ua
10. systemre.org
11. energysecurityua.org
12. ukraine-oss.com
13. elartu.tntu.edu.ua
14. www.satec-global.com.ua
15. elartu.tntu.edu.ua
16. <https://www.nerc.gov.ua/>
17. [Лекція 9. Електромагнітна сумісність і вплив на неї якості електричної енергії: Природа електромагнітних завад | Освітній сайт КНУБА](#)
18. [Аналізатор якості електричної енергії SATEC PM175 ціна, купити](#)
19. [Аналізатор параметрів якості електричної енергії PQM-700UA з сертифікатом клас S: продаж, ціна у Києві. Прилади контролю якості електроенергії від "ТОВ «СОНЕЛ»" - 1567754](#)
20. [Як перевірити якість електроенергії в мережі: методи та прилади - 220volt.](#)
21. [Аналізатори параметрів електричної енергії - Каталог продукції](#)
22. [Прилади контролю якості електроенергії в Україні. Порівняти ціни та купити по акції зі знижкою. Купити оптом на Prom.ua](#)
23. [Моніторинг якості електричної енергії | Державна інспекція енергетичного нагляду України](#)
24. [Ватметр. Як перевірити електроспоживання і потужність приладів? - YouTube](#)
25. <https://pte-ukraine.com/electricity-quality-standards>

26. Охріменко В. М. Споживачі електричної енергії : підручник / В. М. Охріменко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 286 с.

27. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Якість електричної енергії» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (усіх форм навчання), / Укл.: А. П. Заболотний, Д. В. Федоша, - Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. - 14 с.

28. Конспект лекцій з дисципліни "Електропостачання промислових підприємств" для студентів напряму 6.050701 – електротехніка і електротехнології, 6.050702 - електромеханіка / Укладачі Є.Д.Хмельницький, О.О.Крупник — Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2016, 126 с.(Частина 2).

29. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник [Текст] / В.Є. Шестеренко. — Вінниця: Нова Книга, 2004. — 656 с.

30. Пивняк Г.Г. Розрахунки показників електромагнітної сумісності: навч. посібник / Г.Г. Пивняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка ; М-во освіти і науки України, Нац. горн. ун-т. – Д. : НГУ, 2014. – 113 с.

31. <https://enerhozbuttrans.com.ua/news/energoefektyvnist/zaoshchaduyemo-elektrychnu-energiyu/>

Електронне навчальне видання комбінованого використання
Можна використовувати в локальному та мережному режимі

Олійник Юлія Сергіївна

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Конспект лекцій
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за спеціальністю 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

В авторській редакції

Підписано до розміщення 23.04.2025. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 4,78. Обсяг 1,611 Мб. Зам. № 167/25.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009.
Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна