

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Славінський Дмитро Антонович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування вибору системи автоматичного управління коефіцієнта
потужності підстанції на прикладі виробничого підприємства
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Славінський Д. А.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Островерхов Микола Якович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.т.н., професор кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Славінський Д. А. Обґрунтування вибору системи автоматичного управління коефіцієнта потужності підстанції на прикладі виробничого підприємства. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Метою роботи є обґрунтування вибору системи автоматичного управління коефіцієнта потужності підстанції на прикладі виробничого підприємства, що дозволить оптимізувати конструкцію силового трансформатора підстанції виробничого підприємства.

Ключові слова: електрична мережа, коефіцієнт потужності, режим роботи.

ABSTRACT

Slavinsky D. A. Justification of the choice of the automatic control system of the power factor of a substation on the example of a manufacturing enterprise. Qualification work for obtaining the degree of bachelor in specialty 141 – Electric power, electrical engineering and electromechanics – Polessia National University, Zhytomyr, 2026.

The purpose of the work is to justify the choice of the automatic control system of the power factor of a substation on the example of a manufacturing enterprise, which will allow optimizing the design of the power transformer of the manufacturing enterprise's substation.

Keywords: electrical network, power factor, operating mode.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІДСТАНЦІЇ: ВТРАТИ, РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ТА ВИПРОБУВАННЯ	7
1.1 Старіння ізоляції частковими розрядами	10
1.2 Дискретне хвильове перетворення	12
1.3 Презентація запропонованого пристрою	14
1.4 Виявлення часткових розрядів з використанням котушки Роговського	15
1.5 Обробка сигналу	16
Висновки по розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ, СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УТРИМАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ	19
2.1 Принципи проектування інтелектуальної підстанції для реалізації системи АУКП	19
2.2 Розробка структури системи автоматичного утримання коефіцієнта потужності	22
Висновки по розділу 2	35
РОЗДІЛ 3. ПРИКЛАД ВИКОРИСТАННЯ АКРП У МЕХАНІЧНОМУ ЦЕХУ НА ТОВ «КОРОСТЕНСЬКИЙ ЗАВОД МДФ»	36
3.1 Визначення розрахункового навантаження цеху методом упорядкованих діаграм (табличний метод).	37
3.2 Вибір типу та уставки захисту для конденсаторних батарей	40
Висновки по розділу 3	43
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46

ВСТУП

Для підвищення ефективності електропостачання, зниження втрат потужності та підтримки необхідного рівня напруги в розподільних мережах 6-10 кВ виникає необхідність розробки системи автоматичної компенсації реактивної потужності (САКРП). Індуктивним навантаженням, таким як електродвигуни та трансформатори споживається реактивна потужність, що призводить до зниження коефіцієнта потужності ($\cos\phi$) і, як наслідок, збільшує струм, що протікає мережею. Це призводить до ряду негативних наслідків.

Використання САКРП дозволяє:

1. Знизити втрати електроенергії шляхом зниження струмового навантаження на лінії електропередач і трансформаторних підстанціях, що пропорційно зменшує втрати потужності в них.

2. Підвищення пропускної здатності мережі: Зменшення струму дозволяє збільшити допустиме навантаження на існуючі лінії електропередач і трансформатори, відкладаючи необхідність модернізації мережі.

3. Поліпшення якості електроенергії: Підтримання оптимального рівня напруги за рахунок компенсації реактивної потужності знижує коливання напруги і запобігає перенапругам, забезпечуючи надійну роботу електрообладнання.

4. Оптимізація роботи генеруючого обладнання: Зниження навантаження на генератори дозволяє їм працювати в більш ефективному режимі, що в свою чергу знижує витрату палива (для теплових електростанцій) і збільшує термін служби обладнання.

5. Зниження витрат на електроенергію: Зниження втрат і підвищення ефективності використання електроенергії призводять до зменшення загальних витрат на електропостачання.

Управління коефіцієнтом потужності ($\cos\phi$) при споживанні електричної енергії є важливим з кількох причин, які впливають як на постачальників електроенергії, так і на споживачів.

Для постачальників електроенергії це повинно призводити до зменшення втрат в мережі, збільшення їх пропускної здатності, підвищення стабільності напруги та зменшення навантаження на генератори та трансформатори. Для споживачів електроенергії це означає: зменшення витрат на електроенергію, підвищення ефективності використання обладнання, збільшення пропускної здатності власної електромережі підприємства, зменшення ризику перегріву кабелів та обладнання

Найбільш поширений спосіб підвищення $\cos\varphi$ - це встановлення конденсаторних установок (конденсаторних батарей) паралельно до навантаження. Конденсатори компенсують реактивну потужність, яку споживає індуктивне навантаження (наприклад, електродвигуни), тим самим збільшуючи $\cos\varphi$. Інші методи включають використання синхронних компенсаторів та спеціалізованих пристроїв управління реактивною потужністю.

Відповідно **метою роботи** є обґрунтування вибору системи автоматичного управління коефіцієнта потужності підстанції на прикладі виробничого підприємства, що дозволить оптимізувати конструкцію силового трансформатора підстанції виробничого підприємства.

При виконанні роботи були **використані методи** аналізу та математичного моделювання а також метод визначення розрахункового навантаження цеху методом упорядкованих діаграм.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Славінський Д.А. ПРИКЛАД СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ВІДХИЛЕНЬ НАПРУГИ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ ПІДСТАНЦІЇ

Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей» 29 квітня 2026 року. Житомир: Поліський національний університет, 2026.- С 195-198.

Славінський Д.А., Шуневич М. В. ФАКТРИ ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА
РЕАКТИВНУ ПОТУЖНОСТЬ

Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей» 29 квітня 2026 року. Житомир: Поліський національний університет, 2026.- С 195-198.

РОЗДІЛ 1

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІДСТАНЦІЇ: ВТРАТИ, РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ТА ВИПРОБУВАННЯ

«Трансформатори є одним з найважливіших видів обладнання енергосистем. На сьогоднішній день рівень надійності, який вимагається від енергетичних компаній, зумовлює те, що вони повинні володіти великим обсягом інформації про їхнє обладнання, зокрема, про їхні трансформатори. Економічні наслідки, пов'язані з експлуатацією обладнання, що виходить з ладу в електромережі, є величезними, тому цілісність роботи кожного з її компонентів повинна бути гарантована. Ця цілісність може бути досягнута шляхом впровадження нових технологій для моніторингу та оцінки їхньої роботи. Однак з часом і схемою завантаження електрична система піддає це обладнання навантаженням, які згодом можуть призвести до скорочення їхньої потужності, що унеможливить визначення її реальної експлуатаційної потужності. Тому ретельна оцінка експлуатаційного стану комплекту обладнання, безсумнівно, призведе до значного підвищення надійності електричної системи, помітного скорочення витрат на обслуговування, що включає належне виконання профілактичного обслуговування та можливість уникнути збоїв у роботі такого обладнання.

Щоб уникнути незапланованих перерв у роботі складних систем через позапланові непередбачені обставини, протягом останніх сорока років були розроблені систематичні процедури технічного обслуговування. Спочатку використовувалися лише процедури, пов'язані з коригувальним обслуговуванням. Тобто, якщо відбувається збій обладнання і обладнання перестає працювати, починається процедура ремонту. Це пов'язано з перебоями в доступності розглянутого обладнання. З плином часу і накопиченням знань, пов'язаних з експлуатацією обладнання, інженери електромереж розробили процедури профілактичного обслуговування, які

запускають процес технічного обслуговування до аварії, ґрунтуючись на історії кожного обладнання.

Незважаючи на те, що він дає задовільний результат з точки зору скорочення перебоїв у подачі електроенергії для споживачів, ця процедура іноді призводить до непотрібного попереднього запрограмованого обслуговування, оскільки обладнання, на яке було виконано втручання, перебуває в ідеальному робочому стані, хоча воно працює протягом кількох годин, все одно середнє значення одного і того ж типу обладнання буде вказувати на близькість відмови.

Останнім часом, з розвитком цифрових систем збору та обробки цифрових сигналів, розробляється інша стратегія обслуговування. Ця нова методика, що називається прогностичним обслуговуванням, спрямована на розробку діагностичного процесу піднаглядного обладнання, так що вказівка на технічне обслуговування надається лише в тому випадку, якщо робочий стан обладнання засвідчує значне погіршення стану, з вказівкою на його рівень погіршення та показ оцінки того, як довго воно може продовжувати функціонувати без збоїв.

У даному документі мова йде саме про цей тип обслуговування трансформаторів. У пропонованій методології використовуються сигнали часткових розрядів, що виникають всередині трансформаторів. Використання часткових розрядів є одним з видів відмови, який заслуговує на згадку, оскільки він містить багато інформації про проблеми всередині трансформаторів.

Часткові розряди представляють собою відмови, які розвиваються безшумно і можуть призвести до непередбаченого збою в трансформаторі. Явище часткового розряду є проблемою в системі ізоляції, яка проявляється через крихітні електричні дуги всередині діелектричного матеріалу, в результаті чого його руйнування завершується повним пробоем і можливим руйнуванням обладнання[6]. Необхідно відстежувати активність часткових розрядів в трансформаторах, щоб стежити за розвитком цієї проблеми, і

спланувати втручання до катастрофічної відмови. Тому ретельна оцінка експлуатаційного стану трансформаторів призводить до значного підвищення його надійності, помітного скорочення витрат в щодо правильної обробки, що включає належне виконання профілактичних заходів і можливість уникнути експлуатаційних відмов обладнання.

Таким чином, пристрій, який виявляє внутрішні дефекти на ранньому етапі, дозволяє спланувати заходи з обслуговування, щоб пом'якшити ці перерви. Це планування може бути включено в культуру прогнозування технічного обслуговування і націлене на розробку процесу діагностики піднаглядного обладнання, так що вказівка на технічне обслуговування надається лише в тому випадку, якщо робочий стан обладнання забезпечує значне погіршення стану. Їх подальше використання створює параметри, на рівні погіршення, в яких те ж саме, і представляє прогноз того, як довго він може продовжувати функціонувати без відмови. Оскільки процес часткових розрядів спочатку проявляється як одинична відмова, іноді з мікроскопічними розмірами, він може розвиватися в будь-якій точці ізоляції. Оскільки часткові розряди, що виникають всередині обмоток, представляють собою важливу точку інформації про умови їх старіння і зносу, пропонується пристрій корисний для будь-якої компанії з трансформаторами.

Запропонована методологія оцінки робочих умов трансформатора була реалізована в належній розробленій системі збору даних, щоб зробити вибірку змінних, що беруть участь в процесі погіршення спостережуваного обладнання.

Розроблена система заснована на цифровій обробці сигналів інформації, що міститься в електричних змінних, пов'язаних з роботою трансформатора, особливо інформації, безпосередньо отримуваної від струму, що протікає через обмотки трансформатора. Вейвлет-перетворення було обрано цифровим методом через його якість для розпізнавання інформації, всередині інших незліченних сигналів, що містяться в потоці. На підставі інформації, отриманої спеціально для струмів трансформатора, з використанням датчиків типу

котушок Роговського, передбачається, що вони зможуть визначати умови експлуатації ізоляції обладнання[6]. Цього можна очікувати, тому що стандарт, що включає в себе спостереження за поведінкою часткових розрядів, має сильний ступінь кореляції з погіршенням умов їх ізоляції. Таким чином, за допомогою інформації, що міститься в отриманих сигналах, витягнутої після адекватної цифрової обробки сигналу, можна отримати оцінку стану обмоток спостережуваного обладнання.

1.1 Старіння ізоляції частковими розрядами

Нормальне або прискорене старіння ізоляції, спричинене частковими розрядами та забрудненням оливи, викликає зміни динамічних характеристик системи, утвореної металевою конструкцією трансформатора та його ізоляцією. Враховуючи той факт, що часткові розряди спричинені неоднорідністю в ізоляції, забрудненням і перевантаженням, електричні сигнали часткових розрядів, отримані внаслідок цього процесу, можуть бути підтверджені шляхом аналізу розподілу напруги в фазі та її форми, які необхідно діагностувати. Отже, встановивши хронологію вимірювань, можна змодельовати розвиток цих проблем і спрогнозувати можливе ушкодження ізоляції, запобігши йому шляхом належного втручання.

Частковий розряд - це електричний імпульс або електричний розряд, який виникає всередині ізоляційного матеріалу під дією електричного поля. Цей імпульс або розряд лише частково замикає ланцюг між ізольованими провідними частинами, звідси й назва - частковий розряд[4]. Часткові розряди можуть генеруватися різними типами механізмів. Загалом це відбувається через швидку зміну конфігурації електричного поля, якусь внутрішню електричну активність у присутності забруднень або включень. Ця зміна призводить до виникнення електричного струму, що тече по провіднику, підключеному до зовнішньої частини пристрою, що є найпоширенішим ефектом і найчастіше використовується для вимірювання часткових розрядів.

Силові трансформатори належать до найдорожчого обладнання енергосистеми. Отже, вони також створюються та експлуатуються як найбільш

надійне обладнання, необхідне для функціонування всієї системи. Підтвердженням цього є наявність силових трансформаторів віком понад 30 років. Однак ця репутація підтримується за рахунок збереження високої якості, що включає суворий контроль їхнього стану. Це вкрай необхідно, бо трансформатори є стратегічними частинами електричної системи, а відмови в їхній роботі можуть спричинити величезні проблеми, такі як переривання живлення для великих груп населення і для важливих виробничих секторів. Їхнє руйнування може призвести до пошкодження іншого обладнання, травм у працівників електропостачання, забруднення навколишнього середовища токсичними речовинами, що тягне за собою штрафи згідно з природоохоронним законодавством. Усі ці проблеми являють собою великі витрати, яких можна уникнути при належному обслуговуванні на основі моніторингу стану. У цьому контексті система ізоляції трансформатора є критичним аспектом такого моніторингу.

Великі силові трансформатори ізолювані оливою, папером і порцеляною (втулки). Олива, загалом, не має високого ступеня очищення, що спричиняє виникнення часткових розрядів, пов'язаних із такими домішками, як бульбашки газу (порожнини) і тверді частинки (корона в рідинах) [3]. Наявність порожнин у паперовій ізоляції є основною причиною часткових розрядів, а зношення внаслідок присутності вологи і навіть дії часткового розряду призводить до зменшення її діелектричних властивостей. Таким чином, не лише старіння елементів системи ізоляції сприяє активності часткових розрядів у трансформаторах, а й недотримання конструкції або режиму експлуатації обладнання може призвести до пошкоджень, оскільки забруднення в оливі підвищує інтенсивність розрядів і скорочує термін служби.

Тому, знаючи, як часткові розряди виникають не лише в певній точці, а й у багатьох точках усередині трансформатора, і знаючи їхню поведінку в часі, можна зробити висновок про стан контрольованого трансформатора і навіть

передбачити потенційні відмови, що тягне за собою значну економію витрат на технічне обслуговування.

В цілому, залежно від того, як проявляється частковий розряд, можна зробити висновок не лише про серйозність проблеми, а й про її можливі причини. Часткові розряди відбуваються переважно в першій і третій чвертях циклу напруги. У цих чвертях спостерігається значне зростання напруги. Електрична система, утворена проводами і ізоляцією, діє як ємність, заряджена до точки, в якій починають виникати часткові розряди. Вони можуть бути виміряні як імпульси напруги високої частоти і малої інтенсивності. У першій чверті напруги розрядний цикл призводить до негативного імпульсу (або вниз). Це називається частковим розрядом від'ємної полярності. У третій чверті циклу частковий розряд призводить до імпульсного руху вгору або до позитивного, що називають частковим розрядом додатної полярності. Ці імпульси мають значення від мілівольт до кількох вольт. Хоча вони виникають як імпульс у кожній чверті циклу, насправді вони появляються у великій кількості, будучи кількісною оцінкою в межах циклу, вимірюваною параметрами.

Загалом, частковий розряд триває не більше однієї або двох наносекунд. Однак, сигнал, виявлений за межами тестованого обладнання, залежить від характеру з'єднання між точкою, де виникає частковий розряд, і зовнішнім середовищем. У випадку хорошого стану (наприклад, коаксіальних кабелів з ізоляцією SF₆) втрати дуже малі (через хорошу реакцію на високих частотах), сигнал, виявлений ззовні, зберігається майже незмінним, оскільки він зазнаватиме незначного згасання або розсіювання. Але трапляються випадки, коли відбуваються серйозні зміни у формі кривої через значні втрати на високих частотах і через складність з'єднання між місцями, де відбувається частковий розряд, і зовнішнім середовищем, що впливає на внутрішнє виявлення для кожного типу тестованого обладнання.

1.2 Дискретне хвильове перетворення

Дискретне хвильове перетворення є формою розкладання. Основна відмінність від більшості розкладань полягає в організації їхніх коефіцієнтів, які змінюються залежно від двох параметрів, а не лише одного, як у рядах Фур'є[5].

Функції формують базу хвильових сигналів, які можуть бути організовані для формування ортогональних множин. Коефіцієнти дискретного хвильового перетворення розташовані на різних рівнях, які представляють різні роздільності або масштаби, і задані як функція часу. Отримання цих коефіцієнтів можна інтерпретувати через кореляцію між сигналом і функціями базису, підсилюючи концепцію мультироздільності.

Елементарна хвиля збудження, являє собою форму хвилі обмеженої тривалості, із середнім значенням, що дорівнює нулю, та одиничним стандартом. Ці сигнали концентрують свою енергію в часі, що дає можливість використовувати їх у системах розкладання для нестационарного аналізу, тобто, для аналізу, де сигнал не є стаціонарним або нестационарні компоненти мають (перехідний режим).

Використання вейвлетів як набору розкладань - це те, що зазвичай називають вейвлет-системою. Цей набір розкладань не є унікальним, як, наприклад, випадок розкладання в ряд Фур'є, який формується лише складними експонентами. Насправді існує безліч різних вейвлет-систем, і їхні загальні функції:

А) Можуть формувати набір «будівельних блоків»: цей набір може використовуватися для побудови або представлення сигналів і функцій;

Б) Забезпечуючи частоту сигналу, місце розташування та час, вейвлет-розкладання представляє найбільшу частину енергії сигналу з невеликою кількістю коефіцієнтів;

С) Розрахунок коефіцієнтів розкладання здійснюється ефективно;

Д) Вейвлет-системи або різні сімейства вейвлетів мають хвильові форми, які балансують залежно між тим, як функції компактно розташовані в часі або в просторі (тривалість) і наскільки вони гладкі;

Е) Мультироздільність;

ґ) Значення коефіцієнтів розкладання швидко спадають до нуля;

Г) Здатність виконувати більш точний опис місцезнаходження та розділення характеристик сигналу; коефіцієнти вейвлета представляють собою кореляцію між розтягуванням сигналу та вейвлета; «Розтягування», тому що вейвлет - хвиля обмеженої підтримки (обмеженої тривалості), таким чином, коефіцієнти представляють компоненти, які самі по собі;

Н) Можливість визначення вейвлет-систем «персоналізованими» для конкретних застосувань.

Існує лінія досліджень, в якій вивчаються характеристики та система вейвлетів. У цьому дослідженні використовуються існуючі системи, наприклад, сімейство вейвлетів Добеші[7].

Розкладання складається з «версій» материнських вейвлетів, масштабованих і зміщених у часі. Це означає, що є хвиля з форматом, визначеним характеристиками вейвлета (материнського вейвлета), і з нього створюється все розкладання, змінюючи його положення в часі або просторі (незалежна змінна) і змінюючи його діапазон, тобто «розтягування» або «стиснення» форми хвилі. Масштаб є параметром, обернено пропорційним частоті.

1.3 Презентація запропонованого пристрою

Система складається з перетворювачів струму, з відповідною смугою пропускання, що базується на технології котушки Роговського, схеми формування сигналу, схеми збору даних вимірювання сигналу, схеми аналого-цифрового перетворення для високої швидкості та роздільної здатності, комп'ютера для цифрової обробки та зберігання змінних електричних величин, а також здійснює інтелектуальну консолідацію даних, оцінку та діагностику робочого стану обладнання. Техніка обробки сигналів, яка дала важливі результати у виявленні часткових розрядів – це метод, який називається вейвлет-перетворенням, і він використовується в цій розробці. Цей тип

перетворення також було реалізовано в процесі руйнування основних характеристик, пов'язаних з умовами ізоляції трансформатора.

В ході розробки аналізується характеристика струмового сигналу з урахуванням часткових розрядів, що циркулюють в корпусі обладнання, які вимірюються в конкретній точці з'єднання із землею.

1.4 Виявлення часткових розрядів з використанням котушки Роговського

Використовують датчик, заснований на ефекті Роговського, і обчислювальну потужність дискретного вейвлет-перетворювача для виявлення часткового розряду в трансформаторах.

Парціальні імпульси розряду генеруються на високих частотах, але залежно від схеми, яка розташована від трансформатора до місця, де він детектується, можуть мати згладжування, що значно змінює форму хвилі і, особливо, їх діапазон значно зменшується, викликаючи імпульси малої амплітуди.

І ще, до проблеми з малими амплітудами імпульсу, також слід додати проблему з шумом. На підстанції є кілька джерел шуму, таких як радіохвилі, електростатичний розряд, корони, блискавка, на додаток до теплових шумів. Сама по собі апаратура виявлення сигналів, що має високу пропускну здатність для ознак часткових розрядів, також сприяє забрудненню білим шумом. Таким чином, простий візуальний аналіз сигналу, зібраного, наприклад, на клемі заземлення трансформатора, може не виявити нічого, пов'язаного з частковими розрядами. Тому важливо використовувати більш точний аналіз з використанням методів цифрової обробки сигналів.

Приймають до уваги наземні термінали трансформатора, як один із шляхів, через який імпульси часткових розрядів, у вигляді електричного струму, може бути виявлено. Для цього обраний датчик, окрім того, що він здатний виявляти високочастотні струми, повинен також забезпечувати хорошу електричну ізоляцію. Ідеальним пристроєм для цієї задачі є котушка Роговського.

Котушка Роговського повинна складатися з круглої пластикової форми, встановленої таким чином, щоб щільність розподілу витків була рівномірно розподілена. Перерізи також повинні зберігати свої однорідні області. Котушку слід встановлювати навколо провідника, де вимірюється струм. Напруга, пропорційна зміні струму, з'являється між клемми обмотки. Таким чином, інтегруючи цей сигнал напруги, з'являється необхідний струмовий сигнал.

Котушка Роговського має велику чутливість до високих частот, а її конструкція забезпечує відмінну електричну ізоляцію.

Вона також здатна вимірювати високі рівні струму, від кількох сотень міліампер до сотень тисяч ампер.

При встановленні котушки Роговського в клема заземлення трансформатора, можна контролювати поточний сигнал в цій точці. Використання належних методів обробки сигналів дозволяє витягувати імпульси часткового розряду, які в кінцевому підсумку існують в цих терміналах.

1.5 Обробка сигналу

Враховуючи характеристики імпульсів часткового розряду, які можуть бути виявлені в наземних терміналах трансформатора, необхідно розробити ефективну стратегію обробки сигналів, враховуючи всі відповідні проблеми.

Основним методом математичної обробки сигналів є дискретне вейвлет-перетворення. Воно забезпечує придушення шуму та спрощує виявлення перехідних процесів. Детальний опис стратегії наведено нижче.

Розділення функцій для частотних діапазонів може бути корисним, коли потрібно знизити рівень сигналу. Для цього необхідно використовувати зворотне дискретне вейвлет-перетворення. Зворотне перетворення здатне відновити початкову функцію (або сигнал) з коефіцієнтів при перетворенні у зворотному напрямку. Однак, як і при дискретному вейвлет-перетворенні, двовимірний набір коефіцієнтів, які представляють різні знаки, що складають початковий сигнал, може перебудувати початковий сигнал (або його частину) шляхом простого вибору присвоєних коефіцієнтів.

Таким чином, якщо деякі рівні розкладання відповідають паразитним сигналам, відповідні коефіцієнти можуть бути зменшені та відновити сигнал без шумової частини. Щоб проілюструвати зменшення шуму, на рисунку 3 показано синусоїдальний сигнал, забруднений білим шумом. Розкладання цього чотирирівневого сигналу, показує, що коефіцієнти рівнів деталізації містять майже всю енергію шуму[7].

Щоб застосувати дискретне вейвлет-перетворення до знаку, що містить відносно високу частоту переходу, початковий сигнал розділяється на різні рівні (або діапазони частот, як пояснювалося раніше), відокремлюючи стаціонарний сигнал і перехідний сигнал. Правильне відновлення рівнів, що містять перехідний процес, дозволяє переглядати його та визначати, коли і як довго він тривав.

Важливий факт, який потрібно враховувати, полягає в тому, що той самий знак, де ви хочете знайти імпульси часткового розряду, також зазнає шумоподавлення, використовуючи дискретне вейвлет-перетворення. У цьому випадку, якщо цей процес не виконується правильно, імпульси, які ви хочете знайти, можуть бути усунені разом із шумом, оскільки вони мають дуже малу амплітуду, майже повністю занурені в шум.

Таким чином, видалення шуму з використанням дискретного вейвлет-перетворення, в поєднанні з пошуком відповідних імпульсів часткового розряду, значною мірою залежить від вибору форми хвилі вейвлета, яка повинна бути добре корельована з імпульсом. Це змушує коефіцієнти, пов'язані з вашими імпульсами, мати вищі значення та залишатися вище порогового значення зниження шуму.

Висновки по першому розділу

Запропонована методологія оцінки робочих умов трансформатора була реалізована в належній розробленій системі збору даних, щоб зробити вибірку змінних, що беруть участь в процесі погіршення спостережуваного обладнання.

Розроблена система заснована на цифровій обробці сигналів інформації, що міститься в електричних змінних, пов'язаних з роботою трансформатора, особливо інформації, безпосередньо отримуваної від струму, що протікає через обмотки трансформатора. Вейвлет-перетворення було обрано цифровим методом через його якість для розпізнавання інформації, всередині інших незліченних сигналів, що містяться в потоці. На підставі інформації, отриманої спеціально для струмів трансформатора, з використанням датчиків типу котушок Роговського, передбачається, що вони зможуть визначати умови експлуатації ізоляції обладнання.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА СТРУКТУРИ, СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УТРИМАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ

2.1 Принципи проектування інтелектуальної підстанції для реалізації системи АУКП

«У порівнянні зі звичайною ТП, існують великі відмінності в інтелектуальній структурі підстанції для реалізації системи АУКП. Вторинна система інтелектуальної підстанції зазвичай містить електронний трансформатор, об'єднуючий блок, вимикач, захист, пристрої моніторингу тощо.

Комплексний кабель, що з'єднує трансформатори, захист та автоматичний вимикач, потрібно замінити на оптоволоконний. Вхідні значення напруги та струму захисту та пристрій керування перетворюють з аналогових сигналів у цифрові сигнали. Аналоговий сигнал захисту та дисплей подається у вигляді об'єднаного блоку замість самого пристрою.

Ці перетворення збільшують час на синхронізацію інтелектуальної системи підстанції.

Звичайні трансформаторні підстанції приймають згруповані сигнали датчиків[6]. Незалежно від затримки передачі для даного пристрою, первинні та вторинні електричні параметри, релейного захисту пристрою та інші пристрої автоматизації можуть забезпечити одночасність вибірки даних шляхом вибірки відповідних ТА, ТВ вторинні параметри у певний момент часу, відповідно до імпульсу вибірки.

Після того, як за допомогою електронного приладу трансформатор, модуль збору даних реле, пристрої захисту та інші пристрої автоматизації рухаються вперед до об'єднуючого пристрою. Після цього первинні електричні параметри котушки взаємоіндуктивності надходять для вибірки вхідного модуля та обробки приєднаного блоку. Збір і обробка кожної котушки взаємоіндуктивності є незалежним і не має єдиної координації. А затримка

передачі первинних та вторинних електричних параметрів призводить до затримки часу.

Отже, вторинні електричні параметри не мають синхронності між різними трансформаторами і, отже, не можуть бути безпосередньо використані для розрахунку автоматичного пристрою. Висока точність синхронізації годинника може бути використана, щоб переконатися, що кожен блок об'єднання здійснює збір даних у певний інтервал часу. Синхронізація годинника стала важливою частиною релейного захисту, і його продуктивність впливає на нормальну роботу релейного захисту.

За вимогою інтелектуальної підстанції, цей звіт представляє інтелектуальну синхронізацію часу підстанції. Технологія висуває принцип синхронізації системи за часом. Потім аналізуються приклади несправностей підстанції, викликані несправністю синхронізації часу, та надається відповідна команда системі.

Принципи проектування синхронізації системи за часом.

Для забезпечення надійної роботи системи синхронізації за часом, проектування інтелектуальної системи синхронізації часу підстанції повинно відповідати наступним принципам.

Дублюючі конфігурації з GPS .

Система підтримує дублюючі годинники GPS та компас і гарячий резерв IRIG-B, та годинники, налаштовані з високою точністю. Прилад, що налаштовує синхронізацію годинників, може отримати доступ до GPS + компас і сигнал від двох зовнішніх ліній синхронізатора IRIG-B. Обидва сигнали діють як взаєморезервування. Для синхронізації часу підсилювач має доступ до двох ліній IRIG-B, які виступають в якості взаєморезервування. Резервна конфігурація може підтримувати високу надійність і стабільність роботи системи синхронізації часу.

Висока стабільність автоматичної самосинхронізації.

Система приймає інформацію від рубідієвих атомних годинників для самостійного підтримання синхронізації з високою точністю. Точність

самостійного підтримання синхронізації рубідиевих атомних годинників може досягати 3 мкс/день, що набагато краще, ніж стандартна вимога 55 мкс / день. Система приймає синхронізацію управління із зворотним зв'язком, самостійно підтримувати теорію і технологію цифрової фільтрації Калмана[4], і використовує зовнішнє джерело еталонного часу для управління рубідиевим годинником. 1PPS сигнал про те, що система виводить, досягається з частотним розділенням внутрішнього джерела частоти. Вони синхронізовані з довгостроковим середнім сигналом 1PPS, що при виході за межі, дає другий імпульс сигналів для переходу на зовнішній еталонний час. Сигнал синхронізації часу має дуже високу точність і стабільність, з точністю до $\pm 0,1$ мкс.

Безперервність стрибкоподібної зміни в часі.

Годинниковий контролер і підсилювач сигналів синхронізуються самостійно за уставкою. Годинниковий контролер здійснює синхронізацію з зовнішнього опорного сигналу, коли синхронізація самостійно підтримується приймальними блоками, зовнішньою уставкою по часу. Після цього зберігається певний рівень точності часу, щоб гарантувати точність вхідного сигналу синхронізації часу, коли блоки не можуть отримати еталонний сигнал часу від зовнішнього джерела. Коли відновлюється зовнішній еталонний сигнал часу, стандартний час синхронізації годинникового контролера і перемикання підсилювача сигналу до нормального режиму роботи, становить менше 0,5 с[5]. Система вживає заходів поетапного переходу під час перемикання, для підтримки безперервності часу стрибкоподібного переналаштування і запобігання хибному спрацюванню.

Часовий сигнал з єдиним виходом.

Внутрішня затримка часу виникає при спробі синхронізації локальних PPS із зовнішнім джерелом інформації. Технологія випередження часу може бути використана для подолання затримки. Кожен вихідний канал має власну компенсацію затримки. Як правило, система синхронізації часу може реалізувати синхронізацію з різними видами портів, такими як RS232, RS485,

оптичний порт, порт електроенергії та мережевий порт, кожен з яких має різну часову затримку. З технологією випередження часу вихідні сигнали різних портів можуть реалізувати синхронізацію з тим самим зовнішнім джерелом тактового сигналу. Multi -портове випередження часу може використовувати різні уставки затримки відповідно до внутрішнього стандарту PPS та конфігурацій сигнальних каналів. Це дає пристроям змогу повністю реалізувати синхронізацію із зовнішнім джерелом синхронізації, долає зсув між усіма вихідними платами, а також підсилює миттєвість і стабільність системи.

Схема резервування електропостачання.

Силовий модуль реалізований у вигляді плати, приймає резервування подвійного джерела живлення та має широкий діапазон постійного та змінного струму. Якщо одна частина джерела живлення виходить з ладу, інша все ще може підтримувати енергію, що дозволяє зробити гарячу заміну.

ШПМ - випрямляч з регулюванням коефіцієнта потужності, має наступні переваги: високий коефіцієнт потужності, низький гармонічний вміст струму на стороні мережі, двонаправлена передача енергії і т. д., широко використовується в приводах змінного струму, для компенсації реактивної потужності, фільтра активної потужності, уніфікованого управління потоком потужності, а також безперебійного електроживлення і т. д.

2.2 Розробка структури системи автоматичного утримання коефіцієнта потужності

Пристрій призначений для електротехнічних систем і комплексів. Він забезпечує швидкодіючу компенсацію реактивної потужності та стабілізацію трифазної синусоїдальної напруги в системах енергопостачання промислових підприємств, об'єктів агропромислового та оборонного комплексів, міського житлово-комунального господарства та електрифікованого транспорту. Система містить вольтододавальний трансформатор, вторинна обмотка якого з'єднується через реверсивний випрямляч, фільтр і двоклітьовий інвертор напруги підключена до навантаження, а його первинна обмотка з'єднана

послідовно з первинною обмоткою головного трансформатора підстанції. В автоматичній системі для вирівнювання U на навантаженні застосовано змішане регулювання додаткової високовольтової напруги (амплітудне та широтно-імпульсне). Широтно-імпульсне регулювання реалізовано двоклітьовим інвертором напруги у функції відхилення напруги на навантаженні, а амплітудне – реверсивним випрямлячем у функції відхилення напруги мережі або навантаження. Компенсація РП мережі здійснюється дискретним і плавним шляхом. Дискретний ступінь представлений у вигляді батареї косинусних конденсаторів на затискачах мережі та/або фільтрокомпенсуючими ланцюгами на затискачах навантаження. Ступінь плавного регулювання споживаної або генерованої реактивної потужності організовано двоклітьовим інвертором шляхом відстаючого або випереджаючого регулювання фази його вихідної напруги у функції реактивної потужності мережі. Запропоновану систему вирізняють покращена якість вихідної напруги та вхідного струму, високі енергетичні показники та швидкодія, що є технічним результатом.

Пристрій належить до енергетичної електроніки і може бути використаний для компенсації реактивної потужності на вході та стабілізації напруги на виході трансформаторної підстанції.

За прототип взято систему автоматичної компенсації відхилень напруги трансформаторної підстанції, яка містить головний і вольтододавальний трансформатори та тиристорний перетворювач з ланкою постійної напруги, до складу якого входять реверсивний випрямляч, LC-фільтр і двоклітьовий інвертор напруги. Обмотки головного трансформатора підстанції включені за схемою U/U_n . Вторинна обмотка вольтододавального трансформатора через тиристорний перетворювач підключена до навантаження, а його первинна обмотка включена послідовно з первинною обмоткою головного трансформатора. Реверсивний випрямляч працює з фіксованими кутами α_s і $\pi\alpha_s$, прямого та зворотного трифазних мостів при формуванні відповідно позитивної та негативної вольтодобавки. Кути управління α_u і $\pi\alpha_u$ першим і

другим трифазними мостами інвертора напруги регулюються від 0 до 180 градусів.

В результаті роздільного узгодженого керування мостами випрямляча з фіксованим α_b та спільного узгодженого керування мостами інвертора досягається широтно-імпульсне регулювання вольтодобавки у шести піддіапазонах.

Це регулювання вихідної напруги здійснюється вгору та вниз відносно напруги мережі без зсуву першої гармоніки та з порівняно високою швидкістю.

До недоліків відомого пристрою слід віднести низькі значення коефіцієнтів потужності та корисної дії трансформаторної підстанції, які викликані тим, що за наявності в прототипі споживачів реактивної потужності та джерел потужності спотворення в ньому відсутні засоби та елементи керування для компенсації цих складових повної потужності.

У відомому пристрої наявні два джерела нелінійних спотворень, що викликають втрати активної потужності у споживачів, в мережі, на елементах трансформаторної підстанції.

По-перше, це спотворення вихідної напруги, що вносяться двомостовим інвертором. Вони мають найбільші значення за відсутності амплітудного регулювання, особливо при зміні α в межах від 0 до 15 град. та від 165 до 180 град.

По-друге, це спотворення струму на низькій та високій стороні підстанції, обумовлені наявністю реверсивного випрямляча.

Крім того, при роботі підстанції в умовах різких коливань напруги в мережі та різкозмінного характеру навантаження виникають додаткові спотворення форми струмів та коливання їх перших гармонічних складових по фазі.

Завданням винаходу є підвищення якості, ефективності споживання та використання електроенергії.

В результаті вирішення поставленого завдання покращуються форма вихідної напруги та форма вхідного струму, підвищуються коефіцієнти потужності та корисної дії підстанції.

Вирішення поставленого завдання при неповній та нерегульованій компенсації реактивної потужності мережі досягається тим, що до вхідних затискачів реверсивного випрямляча підключені фільтрокомпенсуючі ланцюги, система спільного узгодженого керування двомостовим інвертором напруги виконана з можливістю зміни кута керування в межах від 15 до 165 град., а система роздільного узгодженого керування реверсивним випрямлячем виконана з обмеженням мінімального рівня випрямленої напруги і її керуючий вхід підключений до виходу того ж датчика відхилення напруги навантаження або до виходу введеного датчика відхилення напруги мережі, а також тим, що реверсивний випрямляч виконаний за мостовою схемою зі штучною комутацією і з незмінним 120-градусним інтервалом між кутами включення і виключення кожного вентиля, синхронізуючий вхід системи управління реверсивним випрямлячем підключений до навантаження через одноканальну систему регулювання фази синхроімпульсів, виконану зі зміною напрямку регулювання фази синхроімпульсів відносно напруги навантаження за знаком керуючого сигналу або знаком випрямленого струму, а керуючий вхід одноканальної системи регулювання фази синхроімпульсів підключений до виходу датчика відхилення напруги навантаження або датчика відхилення напруги мережі.

Вирішення поставленої задачі при досягненні повної компенсації реактивної потужності підстанції з забезпеченням високої якості вихідної напруги та вхідного струму підстанції досягається тим, що до вхідних затискачів трансформаторної підстанції підключено батарею косинусних конденсаторів і синхронізуючий вхід системи спільного узгодженого управління двомостовим інвертором напруги підключено до мережі через додаткову одноканальну систему регулювання фази синхроімпульсів, виконану з можливістю зміни напрямку регулювання фази відносно напруги

мережі за знаком керуючого сигналу, а керуючий вхід додаткової одноканальної системи регулювання фази синхроімпульсів підключено до виходу введеного реверсивного датчика реактивної потужності мережі, а також тим, що введено логічний блок завдання напрямку регулювання фази, вихід якого підключено до входу контролю одноканальної системи регулювання фази синхроімпульсів, а перший і другий його входи - відповідно до виходу реверсивного датчика реактивної потужності мережі та до виходу датчика відхилення напруги навантаження.

На рис. 2.2-2.5 наведено схеми запропонованої системи, виконані до рівня відомих функціональних елементів. Схеми з керованим реверсивним випрямлячем з природною та штучною комутацією представлені на рис. 2.2 і 2.3, а з додаванням до них чотирьохквadrантного амплітудно-фазового регулювання - на рисунках 2.4 і 2.5. На рисунку 2.1 представлено векторну діаграму струмів і напруг, що ілюструє роботу системи при R - та RL -навантаженнях.

На векторній діаграмі (рис. 2.1) показано наступні позначення:

$\dot{U}_M$ та $\Delta\dot{U}'_M$ - напруга мережі та її відхилення від номінального рівня; $\dot{U}_1$ та $\Delta\dot{U}'_1$ - напруга на первинній обмотці головного трансформатора при RL - та R -навантаженні відповідно; $\dot{U}_2$ та $\Delta\dot{U}'_2$ - напруга на вторинній обмотці головного трансформатора при RL - та R -навантаженні відповідно; $\dot{U}_d$ та $\Delta\dot{U}'_d$ - додаткова напруга трансформатора при RL - та R -навантаженні; φ_n та φ'_n - фаза струму навантаження при RL - та R -навантаженні; β - фаза додаткової напруги; $\dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}_K$ - струм мережі та його складові (струм первинного кола та конденсаторної батареї); $\dot{I}_2 = \dot{I}_H + \dot{I}_B + \dot{I}_{\phi K}$ - струм вторинного кола та його складові (струм навантаження, випрямляча та першої гармоніки фільтрокомпенсуючих ланцюгів).

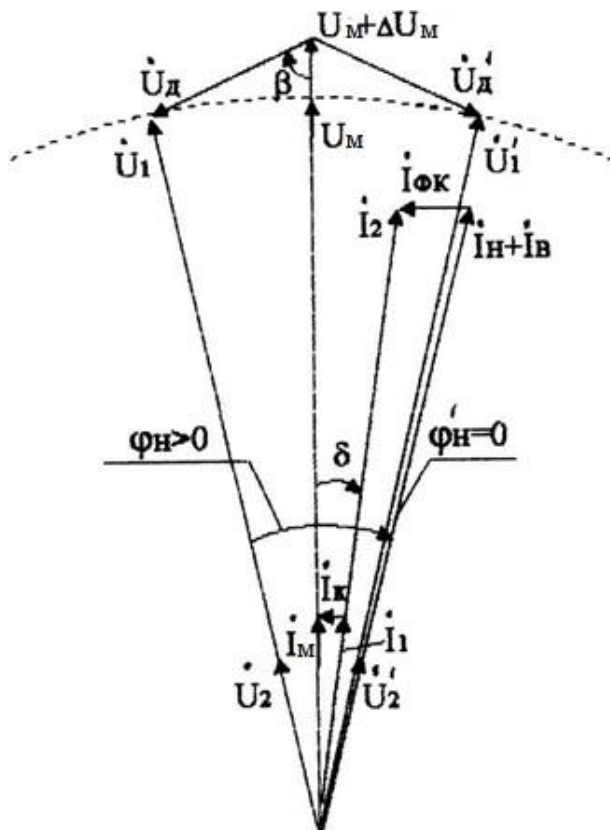


Рисунок 2.1 – Векторна діаграма

Система автоматичної компенсації реактивної потужності та відхилень напруги трансформаторної підстанції (рис. 2.2, 2.3, 2.4 та 2.5) містить такі елементи: головний та вольтододавальний трансформатори 1 та 2, двомостовий інвертор напруги 3 з системою спільного узгодженого керування 4, мостовий реверсивний випрямляч 5 з системою керування 6, фільтр 7, фільтрокомпенсуючі кола 8, датчики відхилення напруги навантаження 9 та мережі 10, мережу 11 та навантаження 12, одноканальну систему регулювання фази синхроімпульсів 13, додаткову одноканальну систему регулювання фази синхроімпульсів 14, реверсивний датчик реактивної потужності 15, батарею косинусних конденсаторів 16, логічний блок задання напрямку регулювання фази синхроімпульсів 17.

Елементи схеми (рис. 2.2) з'єднані наступним чином.

реверсивного датчика 15 реактивної потужності мережі 11 та до виходу датчика 9 відхилення напруги навантаження 12.

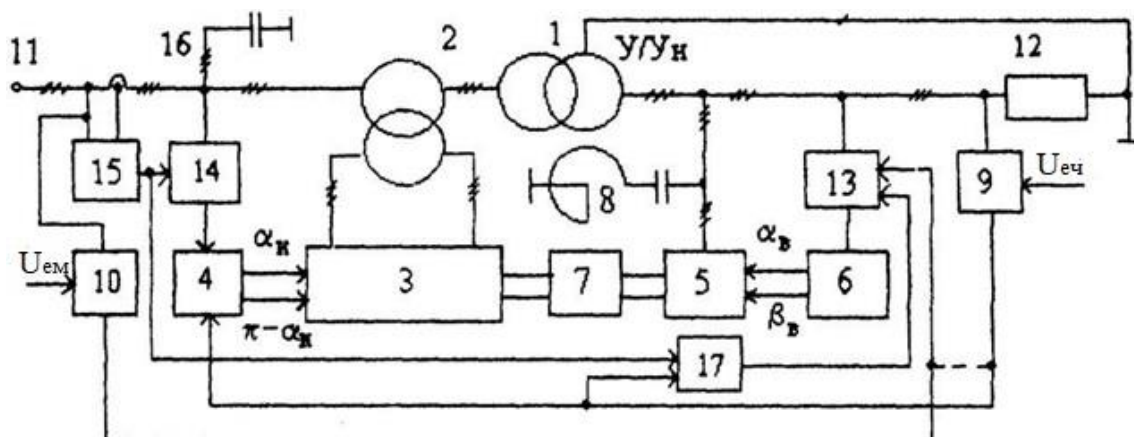


Рисунок 2.5 – Друга схема з додаванням чотирьохквadrантного амплітудно-фазового регулювання

Принцип дії запропонованої системи базується на сумуванні напруги мережі з модульованою додатковою напругою та чотирьохквadrантному векторному формуванні додаткової напруги за допомогою тиристорного перетворення амплітуди та фази з ланкою постійної напруги.

Вектор діючого значення першої гармоніки модульованої додаткової напруги формується з напруги навантаження U_2 і визначається виразом:

$$\dot{U}_d = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot \cos \alpha_s \right) \cdot \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \cos \alpha_u \right) \cdot \kappa_{BT} \cdot U_2 \cdot e^{j\beta_u}, \quad (2.1)$$

де α_s , α_u – кути керування тиристорами реверсивного випрямляча та двомостового інвертора напруги; β_u – фаза вихідної напруги двомостового інвертора; κ_{BT} – коефіцієнт трансформації вольтододавального трансформатора.

Тут, враховуючи падіння напруги в тиристорному перетворювачі та умову обмеження початкового та кінцевого значень α на 15 град., вважатимемо, що

$$\left(\frac{6\sqrt{12}}{\pi^2} \cdot \cos \alpha_u \right) = 2,106 \cdot \cos \alpha_u \approx 2 \cdot \cos \alpha_u,$$

і тоді вираз (2.1) перепишеться в слідуючому вигляді:

$$\dot{U}_D = 2 \cdot \cos \alpha_u \cdot \cos \alpha_\phi \cdot \kappa_{BT} \cdot U_2 \cdot e^{j\beta_u}. \quad (2.2)$$

Напруга U_1 на первинній обмотці головного трансформатора визначається сумою напруги мережі U_c та додаткової напруги U_δ :

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_c + \dot{U}_D = \dot{U}_c + 2 \cdot \kappa_{BT} \cdot U_2 \cdot \cos \alpha_H \cdot |\cos \alpha_B| \cdot e^{j\beta_H}. \quad (2.3)$$

Головний трансформатор 1, зменшуючи свою вхідну напругу U_1 в коефіцієнт трансформації κ_{IT} разів, формує напругу навантаження:

$$\dot{U}_2 = \frac{U_1}{\kappa_{IT}} = \frac{U_c}{\kappa_{IT}} + \frac{\kappa_{BT}}{\kappa_{IT}} \cdot 2 \cdot U_2 \cdot \cos \alpha_H \cdot |\cos \alpha_B| \cdot e^{j\beta_H},$$

або з урахуванням відхилення напруги в мережі $\pm \Delta U_c$ і падіння напруги ΔU_K на трансформаторах в кінцевому результаті одержимо:

$$\dot{U}_2 = \frac{U_c \pm \Delta U_c - \Delta U_K}{\kappa_{IT} - 2 \cdot \kappa_{BT} \cdot \cos \alpha_u \cdot |\cos \alpha_\phi| \cdot \exp(j\beta)}. \quad (2.4)$$

З виразу (2.4) та діаграми (рисунок 2.1) видно, що при зміні α_u , β_u та α_ϕ вектор $\dot{U}_2$ регулюється за амплітудою та фазою. Регулювання амплітуди U_2 забезпечує компенсацію відхилень напруги, спричинених змінами напруги в мережі $\pm \Delta U_c$, а також змінами величини та характеру навантаження, вираженими вектором ΔU_K .

Регулювання фази вектора напруги $\dot{U}_2$ у бік випередження при RL -навантаженні та у бік відставання при R -навантаженні дозволяє спільно з фільтрокомпенсуючими ланцюгами 8 забезпечити орієнтацію вектора струму вторинного кола підстанції $\dot{I}_2$ практично на незмінну величину кута δ відносно напруги мережі $\dot{U}_c$ і, при необхідності, із застосуванням в первинному колі батареї косинусних конденсаторів 16 забезпечити повну компенсацію реактивної потужності на вхідних затисках підстанції.

Струм вторинного кола $\dot{I}_2$ в колі з індуктивною компенсацією (рисунок 2.6) складається зі струму навантаження $\dot{I}_H$ з струмом реверсивного випрямляча $\dot{I}_B$ та першої гармоніки струму фільтрокомпенсуючих ланцюгів $\dot{I}_{\phi K}$:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_H + \dot{I}_B + \dot{I}_{\phi K} . \quad (2.5)$$

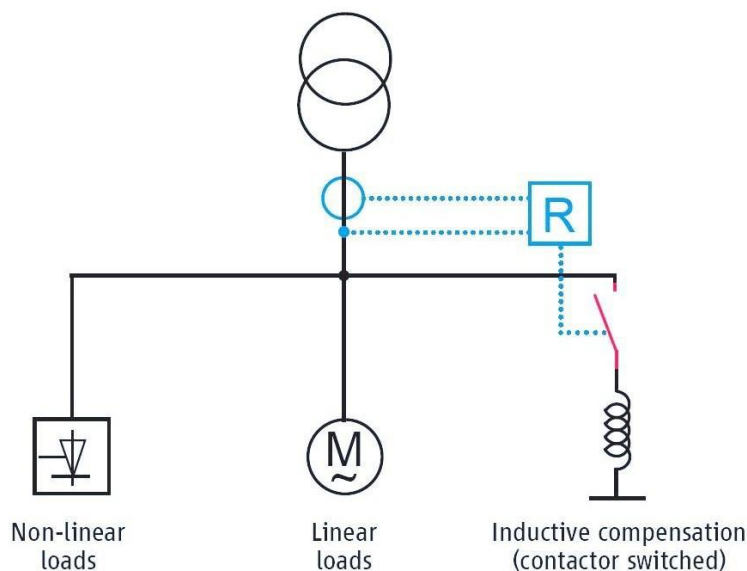


Рисунок 2.6 – Електричне коло з індуктивною компенсацією.

При використанні в пристрої реверсивного випрямляча 5 з штучною комутацією фазу вектора струму $\dot{I}_B$ можна регулювати кутами включення і виключення тиристорів (див. п. 2.2 формули), зберігаючи при цьому між ними інтервал 120 град. В режимі вольтододавання фазу струму $\dot{I}_B$ доцільно регулювати в сторону випередження, а в режимі вольтовирахування – в сторону відставання відносно синхронізуючої напруги $\dot{U}_2$. Це доповнює вирішення задачі компенсації реактивної потужності, зменшує спотворення струму, споживаного випрямлячем з вторинного кола підстанції (полегшує фільтрокомпенсуючі кола 8), і зменшує спотворення вихідної напруги.

При управлінні кутом β у функції реактивної потужності мережі, а кутами α_u і α_v у функції відхилення напруги навантаження вектор напруги $\dot{U}_1$ є радіусом заданого кола, а фаза струму мережі дорівнює нулю (рис. 2.1). Це дозволяє в одному пристрої поєднати дві взаємно доповнюючі одна одну

функції – стабілізувати напругу навантаження і компенсувати реактивну потужність мережі.

При суміщенні формули (2.2) і (2.3) питання раціонального регулювання фази струму випрямляча I_B може бути вирішене за допомогою логічного блоку 17 завдання напрямку регулювання фази синхроімпульсів за співпадінням знаків вихідних сигналів з датчиків зворотного зв'язку в процесі чотириквadrантного формування вектора $\dot{U}_d$.

Пропонований пристрій відрізняють висока швидкодія, покращена форма вхідного струму і вихідної напруги. Він, як більш досконалий, може замінити в системах електропостачання відомі пристрої автоматичної компенсації реактивної потужності та стабілізації трифазної напруги.

1. Система автоматичної компенсації реактивної потужності та відхилень напруги трансформаторної підстанції, що містить головний та вольтододавальний трансформатори, первинні обмотки яких з'єднані послідовно та підключені до вхідних затискачів трансформаторної підстанції, призначених для підключення мережі, вторинна обмотка головного трансформатора підключена до навантаження, до якого також через реверсивний випрямляч, фільтр та двомістовий інвертор напруги підключена вторинна обмотка вольтододавального трансформатора, при цьому в реверсивному випрямлячі застосована синхронізована з напругою навантаження система роздільного узгодженого управління з перемиканням мостів за знаком струму через фільтр, а в двомістовому інверторі напруги – синхронізована з напругою мережі система спільного узгодженого управління з керуючим входом. Даний вхід підключається до виходу датчика відхилення напруги навантаження, що відрізняється тим, що до вхідних затискачів реверсивного випрямляча підключені фільтрокомпенсуючі ланцюги. Система спільного узгодженого управління двомістовим інвертором напруги виконана зі змінним кутом керування в межах від 10 до 160°, а система роздільного узгодженого управління реверсивним випрямлячем виконана з обмеженням

мінімального рівня випрямленої напруги. Її керуючий вхід підключений до виходу того ж датчика відхилення напруги навантаження або до виходу нововведеного датчика відхилення напруги мережі.

2. Система автоматичної компенсації за п.1, що відрізняється тим, що реверсивний випрямляч виконаний за мостовою схемою зі штучною комутацією та з незмінним 120-градусним інтервалом між кутами вмикання та вимикання кожного вентиля, синхронізуючий вхід системи управління реверсивним випрямлячем підключений до навантаження через одноканальну систему регулювання фази синхроімпульсів, виконану зі зміною напрямку регулювання фази синхроімпульсів відносно напруги навантаження за знаком керуючого сигналу або знаком випрямленого струму, а керуючий вхід одноканальної системи регулювання фази синхроімпульсів підключений до виходу датчика відхилення напруги навантаження або датчика відхилення напруги мережі.

3. Система автоматичної компенсації відрізняється тим, що до вхідних затискачів трансформаторної підстанції підключено батарею косинусних конденсаторів, і синхронізуючий вхід системи спільного узгодженого управління двомостовим інвертором напруги підключено до мережі через додаткову одноканальну систему регулювання фази синхроімпульсів, виконану з можливістю зміни напрямку регулювання фази відносно напруги мережі за знаком керуючого сигналу, а керуючий вхід додаткової одноканальної системи регулювання фази синхроімпульсів підключено до виходу нововведеного реверсивного датчика реактивної потужності мережі.

4. Система автоматичної компенсації за п.2, що відрізняється тим, що до вхідних затискачів трансформаторної підстанції підключено батарею косинусних конденсаторів, і синхронізуючий вхід системи спільного узгодженого управління двомостовим інвертором напруги підключено до мережі через додаткову одноканальну систему регулювання фази синхроімпульсів, виконану з можливістю зміни напрямку регулювання фази відносно напруги мережі за знаком керуючого сигналу, а керуючий вхід

додаткової одноканальної системи регулювання фази синхроімпульсів підключено до виходу нововведеного реверсивного датчика реактивної потужності мережі.

5. Система автоматичної компенсації за п.4, що відрізняється тим, що введено логічний блок задання напрямку регулювання фази, вихід якого підключено до входу контролю одноканальної системи регулювання фази синхроімпульсів, а перший і другий його входи відповідно до виходу реверсивного датчика реактивної потужності мережі і до виходу датчика відхилення напруги навантаження.

Висновки по другому розділу

Зменшення споживання реактивної енергії досягається шляхом компенсації реактивної енергії як природними заходами (суть яких полягає в обмеженні впливу приймача на живильну мережу за рахунок впливу на сам приймач), так і за рахунок спеціальних компенсуючих пристроїв у відповідних точках системи, в даному випадку на трансформаторних підстанціях.

РОЗДІЛ 3

ПРИКЛАД ВИКОРИСТАННЯ АКРП У МЕХАНІЧНОМУ ЦЕХУ НА ТОВ «КОРОСТЕНСЬКИЙ ЗАВОД МДФ»

Ділянка механічного цеху призначена для випуску та налагодження обладнання для виробництва основної продукції підприємства.

Цех є складовою частиною виробництва плит МДФ.

Механічний цех передбачає виробничі, допоміжні, службові та побутові приміщення.

Цех отримує електроенергію від власної цехової трансформаторної підстанції (Т1), яка розташована на відстані 0,7 км від головної знижувальної підстанції (ГЗП 2) заводу. ГЗП 2 підключена до енергосистеми, розташованої на відстані 8 км від заводу.

Споживачі електричної енергії відносяться до II та III категорії надійності електропостачання. Робочий графік розподілено на дві зміни.

В районі цеху ґрунт глинистий з температурою +10 °С. Будівля споруджена з блок-секцій довжиною 6 та 8 м кожна.

Розміри ділянки Д х Ш х В - 50 х 30 х 9 м.

Усі приміщення, крім верстатного відділення, двоповерхові, висотою 4,2 м.

Потужність електроспоживання (P_{EC}) вказана для одного електроприймача.

Графічні залежності зміни споживання активної та реактивної енергії, механічного цеху, від часу доби, представлені на рисунку 3.1.

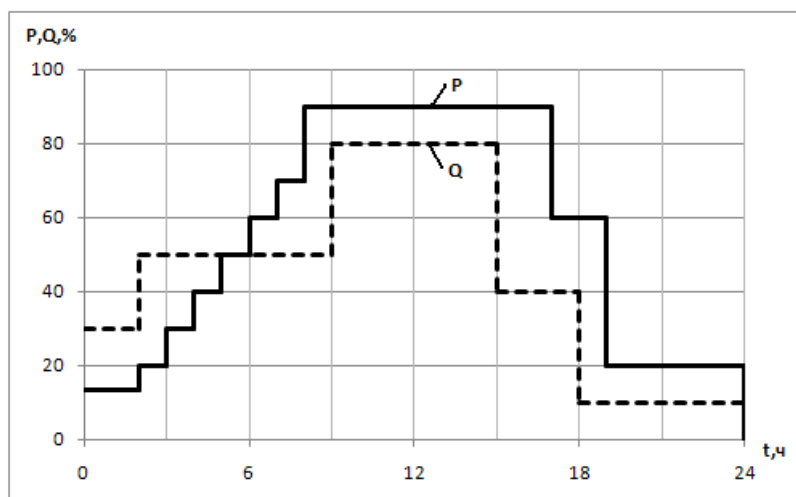


Рисунок 3.1- Залежності зміни Р , Q механічного цеху

3.1 Визначення розрахункового навантаження цеху методом упорядкованих діаграм (табличний метод).

Електрообладнання механічного цеху відноситься до 2 категорії надійності. «Електроприймачі другої категорії – електроприймачі, перерва електропостачання яких призводить до масового недовідпуску продукції, масових простоїв робітників, механізмів і промислового транспорту, порушення нормальної діяльності значної кількості міських та сільських жителів.

Електроприймачі другої категорії в нормальних режимах повинні забезпечуватися електроенергією від двох незалежних взаємно резервуючих джерел живлення.

Для електроприймачів другої категорії при порушенні електропостачання від одного з джерел живлення допустимі перерви електропостачання на час, необхідний для ввімкнення резервного живлення діями чергового персоналу або виїзної оперативної бригади» [1.3].

ТП – двотрансформаторна.

Статичні електромагнітні пристрої стоять однотипні, рівної потужності. Розрахунок виконується методом упорядкованих діаграм. Це основний метод розрахунку електричних навантажень. За ним визначаються розрахункові навантаження (P_p , Q_p , S_p) групи електроприймачів.

«Повна розрахункова потужність групи силових електроприймачів визначається за формулою» [9]:

$$P_p = P_{cp} \cdot k_p, \quad (3.1)$$

$$Q_p = Q_{cp} \cdot k'_p, \quad (3.2)$$

$$S_p = \sqrt{P_{cp}^2 + Q_{cp}^2}, \quad (3.3)$$

де P_p , Q_p , – розрахункове активне та реактивне навантаження; S_p – повне розрахункове навантаження; k_p – розрахунковий коефіцієнт активного

навантаження; k'_p – розрахунковий коефіцієнт реактивного навантаження, причому $k'_p = 1,1$, якщо $n_e \leq 10$ і $k'_p = 1$, якщо $n_e > 10$.

Через різну потужність електроприймачів ускладнюється облік їхнього впливу на формування графіка навантаження. Щоб уникнути цієї складної ситуації, групи електричних приймачів різної потужності замінюють на групу ЕП однієї потужності n_e .

Ефективне число електроприймачів n_e визначається як:

$$n_e = \frac{\sum_1^n P_{ном}^2}{\sum_1^n P_{ном}^2} \quad (3.4)$$

Найдемо ефективне число електроприймачів n_e :

$$n_e = \frac{\left(3 \cdot 2,2 + 3 \cdot 10 + 2 \cdot 14 + 3 \cdot 20,5 + 3 \cdot 25 + 2 \cdot 17,5 + \right. \\ \left. + 2 \cdot 7,5 + 2 \cdot 17 + 2 \cdot 13 + 2 \cdot 4 + 2 \cdot 4,5 + 2 \cdot 5 + 1 \cdot 16 + 2 \cdot 5 \right)^2}{23 \cdot 2,2^2 + 3 \cdot 10^2 + 2 \cdot 14^2 + 3 \cdot 25^2 + 2 \cdot 17,5^2 + 2 \cdot 7,5^2 + \\ + 2 \cdot 17^2 + 2 \cdot 13^2 + 2 \cdot 4^2 + 2 \cdot 4,5^2 + 2 \cdot 5^2 + 1 \cdot 16^2 + 2 \cdot 5^2} = 22,43$$

Приймаємо $n_e = 23$ штуки.

У додатку А представлені всі електричні навантаження механічного цеху.

Приклад розрахунку першого рядка.

Знайдемо сумарну активну потужність:

$$\sum P = P_{ном} \cdot n = 2,2 \cdot 3 \text{ кВт} \quad (3.5)$$

де n – кількість станків.

Середня активна потужність:

$$P_{сер} = k_{\phi} \cdot P_{ном} = 0,7 \cdot 6,6 = 4,62 \text{ кВт} \quad (3.6)$$

де k_{ϕ} – коефіцієнт використання електроприймача.

Середня реактивна потужність:

$$Q_{сер} = P_{сер} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 4,62 \cdot \operatorname{tg}(\arccos \varphi) = 4,62 \cdot 1,732 = 8 \text{ кВАр} \quad (3.7)$$

Для освітлювального навантаження:

$$\sum P = F_{ц} \cdot P_{нм.осв} = 1,2 \text{ кВт} \quad (3.8)$$

На стороні обмотки низької напруги трансформатора знайдемо середній коефіцієнт використання:

$$k_{\varepsilon, \text{сеп}} = \frac{\sum P_{\text{сеп}}}{\sum P_{\text{ном}}} = \frac{234,33}{365,30} = 0,64 \quad (3.9)$$

Середній коефіцієнт потужності на стороні низької напруги:

$$\cos \varphi_{\text{серед}} = 0,58 \quad (3.10)$$

Розрахунковий коефіцієнт на стороні низької напруги:

$$k_p = 1 + 2,6\sqrt{k_{\varepsilon}} \left(\frac{1}{k_{\varepsilon}} - 1 \right) n_{\varepsilon}^{-0,75} \quad (3.11)$$

$$k_p = 1 + 2,6\sqrt{0,7} \left(\frac{1}{0,2} - 1 \right) \cdot 23^{-0,75} = 1,41 \quad (3.12)$$

Розрахункова активна потужність на стороні низької напруги:

$$P_p = P_{\text{сеп}} \cdot k_p = 4,62 \cdot 1,41 = 6,51 \text{ кВт} \quad (3.13)$$

Розрахункова реактивна потужність на стороні низької напруги:

$$Q_p = Q_{\text{сеп}} = 8 \text{ кВАр} \quad (3.14)$$

Так як $n_{\varepsilon} = 23 > 10$.

Розрахункова повна потужність на стороні низької напруги:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = 10,32 \text{ кВА} \quad (3.15)$$

Враховуємо втрати потужності в трансформаторі. На даному етапі визначення потужності на стороні високої напруги ми ще не обрали трансформатор, тому втрати в трансформаторі беруться приблизно:

$$\Delta P = 0,02 \cdot S_p = 0,02 \cdot 452,48 = 9,05 \text{ кВт} \quad (3.16)$$

$$\Delta Q = 0,1 \cdot S_p = 0,1 \cdot 452,48 = 45,25 \text{ кВАр} \quad (3.17)$$

Повна потужність на стороні високої напруги:

$$P_{p, \varepsilon} = P_p + \Delta P = 260,30 + 9,05 = 269,35 \text{ кВт} \quad (3.18)$$

$$Q_{p, \varepsilon} = Q_p + \Delta Q = 370,12 + 45,25 = 415,37 \text{ кВАр} \quad (3.19)$$

$$S_{p.e} = \sqrt{P_{p.e}^2 + Q_{p.e}^2} = 495,05 \text{ кВА} \quad (3.20)$$

Коефіцієнт потужності на стороні високої напруги:

$$\cos \varphi = \frac{P_{p.e}}{S_{p.e}} = \frac{269,35}{495,05} = 0,54 \quad (3.20)$$

Для підвищення коефіцієнта активної потужності до нормативного ($\cos \varphi = 0,93$) необхідно використовувати пристрій компенсації реактивної потужності.

$$Q_{P.e} = P_{p.e} \cdot \operatorname{tg}(\arccos \varphi) = 269,35 \cdot 0,395 = 106,453 \text{ кВАр} \quad (3.21)$$

Потужність компенсуючих пристроїв:

$$Q = Q_{p.e} - Q_{P.e} = 415,37 - 106,453 = 308,92 \text{ кВАр} \quad (2.24)$$

Вибір компенсуючого пристрою

За електронним каталогом виробника, вибираємо компенсуючий пристрій: 4х АУКРМ -0,4-75. АУКРМ -0,4-75 - це комплектна конденсаторна установка, оснащена 3-ма ступенями регулювання в автоматичному режимі, на $U=0,4 \text{ кВ}$. Потужність КУ - 75кВАр (по 25кВАр на секцію).

Також, при нестачі грошових коштів на установку з автоматичним регулюванням, можна використовувати нерегульовану, групову КРМ з 12-ю конденсаторами марки КМ-0,4-25 загальною потужністю 300 кВАр.

Так як загальна потужність компенсуючих пристроїв $Q=308,92 \text{ кВАр} > 75 \text{ кВАр}$, то рекомендується регульована (автоматична) КРМ.

Таким чином, кВА - повна потужність системи, що знизилася за рахунок компенсуючих пристроїв.

3.2 Вибір типу та уставки захисту для конденсаторних батарей

Захист конденсаторів низької напруги може бути виконаний за допомогою запобіжників або вимикачів.

- Захист конденсаторів вимикачем

Як було показано вище, номінальний струм вимикача для захисту стандартних конденсаторів повинен бути більшим, ніж $1,36 \cdot I_{\text{ном}}$, а номінальний струм теплового розчіплювача може бути прийнятий $1,36 \cdot I_{\text{ном}}$.

Захист повинен бути чутливим до діючого значення струму, включно з вищими гармоніками. Уставка миттєвого спрацювання повинна бути на рівні $10 \cdot I_{\text{ном}}$.

- Тип розчіплювача

Може бути використаний комбінований (магнітотермічний) розчіплювач.

У випадку використання електронного розчіплювача уставка миттєвого спрацювання повинна бути $10 \cdot I_r$, щоб пропустити пік струму ввімкнення.

- Узгодження вимикача з конденсаторною установкою.

У тому випадку, коли батарея захищена струмообмежувальним вимикачем, відпадає необхідність розраховувати батарею на такий самий струм короткого замикання, на який розрахована електроустановка.

- Використання ПЗВ

У момент ввімкнення батареї конденсаторів три фазних струми неоднакові, хоча їх сума дорівнює нулю. Ці струми мають велику величину. Отже, для зниження струму небалансу ПЗВ, який може викликати хибне відключення, потрібно розташовувати 3 фазні провідники точно в геометричному центрі тороїдального сердечника трансформатора струму нульової послідовності ПЗВ.

- Захист пристроїв компенсації автоматичними вимикачами та запобіжниками

- Захист пристрою компенсації автоматичним вимикачем

Всі пристрої компенсації реактивної потужності повинні мати надійний захист від перевантажень і коротких замикань.

Автоматичний вимикач пристрою компенсації повинен бути обраний таким чином, щоб захист від перевантажень мав уставку:

$1,36 I_{\text{ном}}$ для обладнання типу CLASSIC;

$1,5 I_{\text{ном}}$ для обладнання типу COMFORT;

$1,12 I_{\text{ном}}$ для обладнання типу HARMONY (з реактором), частота налаштування 2,7 (135 Гц);

1,19 $I_{\text{ном.}}$ для обладнання типу HARMONY (з реактором), частота налаштування 3,8 (190 Гц);

1,31 $I_{\text{ном.}}$ для обладнання типу HARMONY (з реактором), частота налаштування 4,3 (215 Гц).

Уставка захисту від короткого замикання повинна бути відлаштована від кидка струму при ввімкненні конденсаторів: 10 $I_{\text{ном.}}$ для обладнання CLASSIC, COMFORT або HARMONY (з реактором).

Номінальний струм можна розрахувати за формулою[9]:

$$I_{\text{ном.}} = \frac{Q_c}{1,732 \cdot U_{\text{ном.}}}$$

Захист пристрою компенсації запобіжником

Необхідно використовувати запобіжники з високою вимикаючою здатністю типу Gg:

тип CLASSIC: 1,4 $I_{\text{ном.}}$;

тип COMFORT: 1,6 $I_{\text{ном.}}$;

тип HARMONY: 1,4 ном..

Для пристрою компенсації типу HARMONY номінальний струм автоматичного вимикача або плавкої вставки обирається за діючим значенням номінального струму пристрою з урахуванням струмів вищих гармонік.

Діюче значення струму з урахуванням вищих гармонік:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I_1^2 + \dots + I_i^2 + \dots},$$

де I_1 – струм основної гармоніки 50 Гц, I_i – струм гармоніки номер i .

Можна помітити, що підвищуючі коефіцієнти струмів автоматичних вимикачів і запобіжників пристроїв компенсації типу HARMONY менші за величиною, ніж у випадку пристроїв типу COMFORT, оскільки реактор обмежує струм вмикання.

- Захист ступенів запобіжником

Необхідно використовувати запобіжники з високою вимикаючою здатністю типу Gg з номінальним струмом не менше:

Тип Classic або Comfort: $1,6 I_{\text{ном.}}$;

Тип Harmony (з реакторами): $1,5 I_{\text{ном.}}$

Примітка: коли для захисту двох ступенів використовується один комплект запобіжників, коефіцієнти мають бути наступні:

для ступені типу Classic або Harmony: $1,4 I_{\text{ном.}}$;

для ступені типу Comfort: $1,6 I_{\text{ном.}}$

- Захист кабелів

Живильні кабелі повинні вибиратися за нагріванням таким же чином, як і апарати захисту та комутації. Вони повинні бути також захищені від коротких замикань в самих кабелях і в конденсаторах» [17].

Висновки по третьому розділу

Пристрій автоматичної компенсації реактивної потужності дозволяє регулювати генеровану в мережу енергопостачання реактивну енергію, контролювати поточні значення струму, напруги та коефіцієнта потужності в мережі, вимірювати значення реактивної енергії, що віддається в систему, і підтримувати задану споживачем величину коефіцієнта потужності в мережі.

ВИСНОВОК

Одним із головних питань, що вирішуються при проектуванні та експлуатації систем електропостачання, є питання про компенсацію реактивної енергії, яке включає розрахунок і вибір компенсуючих пристроїв, їх регулювання та розміщення на території підприємства.

Під час роботи багатьох промислових пристроїв з'являється реактивна складова, яку неможливо виключити зовсім, але можна застосовувати засоби, що зменшують її споживання з живильної мережі. Щоб цього досягти, необхідно наблизити джерело реактивної потужності до місця її споживання, та зменшити її отримання з енергосистеми. Це розвантажить живильні лінії та трансформатори від реактивної складової.

У випускній кваліфікаційній роботі розглянуто питання компенсації реактивної потужності підстанції 10/0,4 на Коростенському заводі МДФ.

Зменшення споживання реактивної енергії на досягається шляхом компенсації реактивної енергії, як природними заходами (суть яких полягає в обмеженні впливу приймача на живильну мережу за рахунок впливу на сам приймач), так і за рахунок спеціальних компенсуючих пристроїв у відповідних точках системи, в даному випадку на цехових трансформаторних підстанціях.

У даній роботі проведено синтез пристрою компенсації реактивної потужності. За прототип була взята система автоматичної компенсації відхилень напруги трансформаторної підстанції, яка призначена для електротехнічних систем і комплексів. Вона забезпечує швидкодіючу компенсацію реактивної потужності та стабілізацію трифазної синусоїдальної напруги в системах енергопостачання промислових підприємств, об'єктів агропромислового та оборонного комплексів, міського житлово-комунального господарства та електрифікованого транспорту.

Основною перевагою даної системи є те, що реактивна енергія, що генерується в систему, надходить плавно, без стрибків. Досягається це за допомогою установки, в якості комутуючих елементів, тиристорних перетворювачів.

Пристрій автоматичної компенсації реактивної потужності дозволяє регулювати генеровану в мережу енергопостачання реактивну енергію, контролювати поточні значення струму, напруги та коефіцієнта потужності в мережі, вимірювати значення реактивної енергії, що віддається в систему, та підтримувати задану споживачем величину коефіцієнта потужності в мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 50160:2023 Допустимі рівні сумісності в напрузі живлення громадських мереж низької, середньої та високої напруги
2. Постанова НКРЕКП № 310 від 14.03.2018 «Про затвердження Кодексу систем розподілу»
3. Правила улаштування електроустановок/ МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ/ Наказ №476 від 21.07.2017р.- Київ, 2017.
4. Б. С. Рогальський, С. О. Кузьмінська, Визначення оптимального ступеня компенсації реактивних навантажень для електричних мереж з урахуванням чутливості// Вісник ВПІ, 2004, № 5
5. Рогальський Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. І частина. Навчальний посібник. — Вінниця: 2002. — 119 с.
6. Резніченко Т.П., Омельчук А.О. Про ефективність компенсації реактивної потужності в районних електричних мережах// Енергетика и электрификация. –2001. – №6. – С. 26 – 29. 6. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях.– М.: Энергия, 1974. – 73 с.
7. Реактивна потужність в електричних мережах : монографія / І. В. Жежеленко, Г. Г. Півняк, Г. Г. Трофімов, Ю. А. Папайка ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. у-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 72 с.
8. Конспект лекцій з дисципліни «Організація виробництва» для студентів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка». / Укл.: Коваленко О.В., Дніпродзержинськ. ДДТУ, 2015 р. – 77 с.
9. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Структура енергетичного господарства підприємства та ресурсне планування енерговикористання» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка/ Укл.: к.т.н., доцент Хмельницький Є.Д. - Кам'янське:
ДДТУ, 2022. – 42 стор.