Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

КАЗЬМІРУК ОЛЕГ ІВАНОВИЧ

УДК 621.316.1

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ШЛЯХОМ ЗБІЛЬШЕННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ З РПН

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2013

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті,
Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних станцій і систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Назаров Володимир Васильович,
ПАТ «Хмельницькобленерго»,
провідний науковий співробітник

кандидат технічних наук, доцент
Сабадаш Ігор Олександрович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
доцент кафедри електричних систем і мереж

Захист відбудеться « 27 » квітня 2013 р. о 12^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий « 26 » березня 2013 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради В.В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Особливістю електроенергетичних систем (ЕЕС), яка ускладнює процес оптимального керування їх режимами і суттєво зменшує ефективність керуючих впливів, є зростання частки обладнання, яке відпрацювало нормативний термін або близьке до спрацювання свого технічного ресурсу. Для продовження ефективної експлуатації цього обладнання актуальною постає проблема визначення його поточного стану та залишкового ресурсу. Ознакою сьогодення є підвищення вимог до забезпечення безпечної і безаварійної експлуатації такого обладнання. Це викликано спадом темпів створення нового обладнання, зростанням потужності енергооб'єктів і підсиленням конкуренції між енергокомпаніями, викликаної переходом до балансуючого ринку електроенергії та до електропостачання за двосторонніми договорами.

Однією з задач, ефективне розв'язання якої має забезпечити необхідні умови якісного функціонування ЕЕС в сучасних умовах, є вдосконалення системи оптимального керування потоками активної і реактивної потужності в них. Така система повинна забезпечити керування транзитними і власними перетоками потужності за умов мінімуму втрат електроенергії в електричних мережах. Основними засобами такого керування є трансформатори і автотрансформатори з поздовжньо-поперечним регулюванням, а також лінійні регулятори різної конструкції і принципу дії.

Оскільки з оновленням парку трансформаторів і автотрансформаторів, здатних активно приймати участь в керуванні потоками потужності в ЕЕС і сприяти впровадженню нових технологій в ЕЕС, є певні складнощі, то слід шукати інші можливості. Аналіз стану завантаження трансформаторів і автотрансформаторів в магістральних мережах показує, що для частини з них можливо підвищити навантажувальну здатність та інтенсивніше використовувати їх для оптимального керування. Для цього необхідно використовувати результати оперативного діагностування трансформаторів і автотрансформаторів та вдосконалити їх систему охолодження. Перше дозволить оцінити їх реальний технічний стан і можливості щодо участі в оптимальному керуванні, а друге – збільшити їх навантажувальну здатність і розширити тим самим їх керувальні можливості.

На сьогодні це актуальна задача для ЕЕС України. Значний вклад у її вирішення внесли і вносять вчені Інституту електродинаміки НАН України, НУ "Львівська політехніка", НТУУ «Київська політехніка», Донецького НТУ, ДП «ДонОРГРЕС», Запоріжського трансформаторного заводу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, що проводились протягом 2007-2012 років. Науково-дослідна робота проводилась відповідно до наукового напрямку кафедри електричних станцій та систем ВНТУ за держбюджетними темами "Розробка критеріїв оцінки і способів аналізу чутливості оптимальних рішень в електроенергетиці" (№ держреєстрації 0101U004670), "Оптимальне керування взаємними і транзитними перетоками потужності в об'єднаних енергетичних системах" (№ держреєстрації 0107U02091). Автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності оптимального керування потоками потужності в електричних мережах для зменшення в них втрат електроенергії з врахуванням технічного стану трансформаторів з РПН і їх навантажувальної здатності.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі **основні задачі**:

- аналіз сучасних систем автоматизованого керування режимами ЕЕС і ускладнень, які виникають в їх роботі;
- аналіз пошкоджуваності трансформаторів з РПН;
- дослідження існуючих методів визначення коефіцієнту ресурсу трансформатора з РПН;

- розробка методу визначення залишкового ресурсу трансформатора з врахуванням стану системи охолодження;

- розробка методу визначення впливу стану системи охолодження на навантажувальну здатність трансформатора з РПН;

- розробка методу визначення керуючих впливів на трансформатори з РПН з врахуванням зміни їх опору в залежності від технічного стану критеріальним методом з застосуванням нейро-нечіткого моделювання;

- розробка методу аналізу чутливості критерію оптимальності (показника загальносистемних втрат потужності) до зміни навантажувальної здатності трансформаторів з РПН.

- вдосконалення методу визначення керуючих впливів трансформаторами з РПН з урахуванням коефіцієнта якості їх функціонування;

- вдосконалення адаптивного програмно-апаратного комплексу АСК ЕЕС.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є процес оптимального керування потоками потужності в електричних мережах енергосистем.

Предметом дослідження є методи і засоби оцінювання технічного стану трансформаторів з РПН і збільшення їх навантажувальної здатності.

Методи досліджень. В дисертації для вирішення поставлених задач використовувались: математичний апарат варіаційного числення, узагальнювальні методи теорії подібності і моделювання, лінійного та нелінійного програмування, нечіткого моделювання, методи нейронного моделювання, критеріальний метод. Усталені режими моделюються та аналізуються на базі методів контурних струмів та вузлових напруг із застосуванням методів Ньютона. Для розробки алгоритмів і програм аналізу режимів ЕЕС та формування законів оптимального керування ними використовувалися матрична алгебра, теорія графів, декомпозиція та об'єктно-орієнтований аналіз, теорія нечітких множин, нейронечітке моделювання, критеріальний метод.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що показана доцільність і ефективність врахування навантажувальної здатності трансформаторів і автотрансформаторів з РПН під час оптимального керування потоками потужності в ЕЕС. Зокрема:

- вперше запропоновано метод оптимального керування потоками потужності в ЕЕС з врахуванням навантажувальної здатності трансформаторів і автотрансформаторів з РПН, який на відміну від відомих базується на нейронечіткому моделюванні коефіцієнта ресурсу їх системи охолодження, що дозволяє підвищити ефективність оптимальних рішень щодо зменшення втрат електроенергії під час її транспортування;

- отримав подальший розвиток метод визначення зони нечутливості критерію оптимальності до керуючих впливів, який відрізняється врахуванням навантажувальної здатності трансформаторів з РПН, що дозволяє підвищити ефективність заходів зменшення втрат активної потужності в ЕЕС та ощадно використовувати залишковий ресурс трансформаторів з РПН;

- розвинуто метод визначення якості функціонування трансформаторів з РПН, який відрізняється врахуванням коефіцієнта втрат потужності в електричних мережах, коефіцієнта залишкового ресурсу та стану системи охолодження трансформаторів, що дає змогу підвищити ефективність застосування трансформаторів з РПН для керування потоками потужності в ЕЕС.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблено алгоритм оптимального керування потоками потужності в ЕЕС з врахуванням зони нечутливості критерію оптимальності. На основі методу визначення коефіцієнта якості функціонування трансформаторів з РПН розроблено алгоритм їх ранжування за критерієм ефективності оптимального керування ними з метою зменшення втрат активної потужності в ЕЕС. Розроблено спосіб оптимального керування нормальними

режимами ЕЕС з врахуванням коефіцієнта ресурсу системи охолодження трансформаторів з РПН. Вдосконалено структурну схему адаптивного програмно-апаратного комплексу АСК ЕЕС.

Отримані в дисертаційній роботі результати наукових досліджень використовуються у Південно-Західній електроенергетичній системі з метою вдосконалення процесу оптимізації режимів електричних мереж енергосистеми (довідка від 13 липня 2012 р.) та в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету (довідка від 4 вересня 2012 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – показано вплив на якість функціонування АСК ЕЕС трансформаторів з РПН і обґрунтована доцільність врахування їх навантажувальної здатності, запропонована математична модель; [2] – показано, що постійні коефіцієнти, які характеризують теплові процеси в системі охолодження трансформаторів, мають зміст вторинних критеріїв подібності; [3] – математична модель навантажувальної здатності в методі оптимального керування й аналізу чутливості оптимальних рішень; [4] – проведено дослідження пошкоджуваності систем охолодження трансформаторів; [5] – вдосконалено метод визначення зони нечутливості критерію оптимальності до керуючих впливів для врахуванням навантажувальної здатності трансформаторів з РПН; [6] – алгоритм визначення коефіцієнта якості функціонування регулюючих пристроїв з використанням критеріального методу; [7] – використання вторинних критеріїв подібності для формування законів керування режимом ЕЕС; [8] – математична модель визначення якості функціонування трансформатора з врахуванням технічного стану системи охолодження трансформатора; [9] – спосіб регулювання режиму роботи ЕЕС з врахуванням вартості відновлення технічного стану трансформатора; [10] – метод визначення зміни опору автотрансформатора в залежності від стану його системи охолодження.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1–10], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

Апробація результатів дисертації. Головні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися: на XIII Міжнародній науково-технічній конференції “Автоматика 2006” (Вінниця, 2006); на Міжнародній науково-технічній конференції “Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації” (Кременчук, 2007); на V і VI Міжнародних науково-технічних конференціях «Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці» (Львів, 2006, 2009); на Міжнародній науково-технічній конференції “Контроль і управління в складних системах” (Вінниця 2010); на III Міжнародній науково-технічній Інтернет–конференції “Нові технології в електроенергетиці” (Харків, 2010); на I та VI Міжнародних науково-технічних конференціях “Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах” (Луцьк, 2006, 2012); на Міжнародній науковій конференції «Моделювання–2010» («Simulation-2010») (Київ, 2010); на I Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками – 2011» (Вінниця, 2011); на Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки, ПСЕ-2012» (Вінниця, 2012); на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів ВНТУ з участю працівників науково-дослідних організацій та працівників інженерно-технічних підприємств м. Вінниці та області у 2006–2012 роках.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 5 статей у фахових наукових журналах та 5 статей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій, отримано позитивне рішення по заявці на патент.

Структура дисертації. Дисертаційна робота містить вступ, 4 розділи, висновки, список використаних джерел з 109 найменувань, 4 додатки. Загальний обсяг дисертації 162 сторінки, з яких основний зміст викладений на 118 сторінках і містить 20 рисунків та 5 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі. Наведено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також подано відомості щодо апробації роботи, особистого внеску здобувача та публікацій. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

У першому розділі проведено аналіз методів оптимального керування потоками потужності в ЕЕС. Показано, що в сучасних умовах автоматизованого керування режимами ЕЕС недостатньо уваги приділяється оперативному діагностуванню трансформаторів з РПН і визначенню їх реальної навантажувальної здатності. Обґрунтовано і сформульовано завдання наукового дослідження.

Показано, що розглядати засоби покращання умов для оптимального керування режимами ЕЕС доцільно розглядати в рамках концепції *SMART Grid*. Серед задач, які мають розв'язуватися для переходу енергосистеми на базі концепції *SMART Grid*, знаходяться в тому числі задачі, розв'язок яких покликаний удосконалити систему керування потоками потужності. Для цього необхідно покращити технічний стан і розширити регулювальні можливості відповідного обладнання. В першу чергу це стосується трансформаторів і автотрансформаторів з РПН, для яких повинні бути створені сучасні системи оперативного діагностування, а також покращені умови їх експлуатації для того, щоб можна було оптимально використовувати їх навантажувальну здатність.

Проаналізовано причини пошкоджуваності трансформаторів і автотрансформаторів та фактори, що найбільш впливають на їх технічний стан та залишковий ресурс. Показано, що найчастіше причиною пониження можливостей трансформаторів в оптимальному керуванні є погіршення якості функціонування їх системи охолодження. Тому актуальним є розроблення методів оперативного моніторингу за станом системи охолодження трансформаторів та розроблення заходів її вдосконалення в умовах експлуатації. Для дослідження теплообмінних процесів в трансформаторах обґрунтовано застосування методів і засобів теорії подібності і моделювання.

У другому розділі розроблено математичні моделі для врахування технічного стану трансформаторів в задачах оптимального керування режимами ЕЕС. Розроблено математичну модель коефіцієнта ресурсу трансформатора з врахуванням стану охолоджувача, нейро-нечітку модель навантажувальної здатності трансформатора в залежності від коефіцієнта ресурсу системи охолодження. Запропоновано математичну модель розрахункового активного опору трансформатора з врахуванням стану його системи охолодження для представлення в моделі оптимізації режиму ЕЕС.

Розглянуто передумови використання нечіткого моделювання для визначення технічного стану системи охолодження трансформаторів. Методи контролю систем охолодження силових трансформаторів (СОСТ), що існують на даний час, використовують у своїх розрахунках математичні моделі, які мають досить суттєвий недолік – вони не дозволяють визначити і врахувати функціональні зв'язки між всіма вхідними величинами. Тому для встановлення таких зв'язків конструктивною є технологія нейро-нечіткого моделювання. Таке моделювання дозволяє одержувати більш достовірні результати в порівнянні з результатами роботи систем діагностування, які вже існують.

Під час експлуатації стан системи охолодження погіршується, що призводить до зростання температури верхніх шарів масла і впливає на навантажувальну здатність трансформатора. Знаючи прогнозований графік навантаження потрібно передбачити можливе передаварійне або аварійне зростання температури верхніх шарів масла і вжити заходів, щодо очищення охолоджувачів, а в разі необхідності – і ремонту маслонасосів, вентиляторів, систем керування вентиляторами і маслонасосами, заміни ущільнень і т.п.

Для системи охолодження розроблена схема впливу контрольованих параметрів на залишковий ресурс системи охолодження, яка показана на рис. 1. В ній враховуються коефіцієнти залишкового ресурсу маслонасосів $k_{\text{ì í }3}$ та вентиляторів $k_{\text{âåí ò}^3}$.

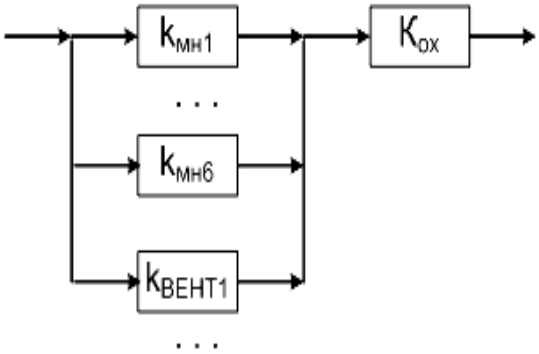

Рисунок 1 – Схема впливу контрольованих параметрів на залишковий ресурс системи охолодження трансформатора

Під час експлуатації є можливість контролювати температуру верхніх шарів масла ($t_{\text{âåðõ ø}}$) з виходом на мікроконтролер постійного спостереження, а з нього на автоматизоване робоче місце (АРМ) диспетчера підстанції. Температура верхніх шарів масла залежить від навантаження P трансформатора, час роботи з цим навантаженням T, різниці температур між входом і виходом охолоджувача Δt, температури повітря $t_{\text{ï î â}}$, коефіцієнта ресурсу охолоджувача $k_{\text{ðåñ}}$. Для отримання залежності

$$t_{\text{âåðõ ø}} = f\left(Ð, T, t_{\text{ï î â}}, k_{\text{ðåñ}}\right) \quad (1)$$

і прогнозування температури використовується математичний апарат нечіткого моделювання.

Як приклад, для АТ АОДЦТН–333/750/330 підстанції «Вінницька–750» під час навчання за даними з журналів багаторічних спостережень отримані висновки правил, фрагмент яких має наступний вигляд:

…

ЯКЩО “навантаження”=“середнє” **ТА** “час” = “середній” **ТА** “температура повітря”=“велика” **ТА** “коефіцієнт залишкового ресурсу”=“малий” **ТО** “температура верхніх шарів” = -33,8·P ·$k_{\text{рес}}$+ 0,1646· $t_{\text{пов}}$·$k_{\text{рес}}$+4,5381· $k_{\text{рес}}^2$ - 0,8· $k_{\text{рес}}$ – 0,013· P·$t_{\text{пов}}$+0,008·$t_{\text{пов}}^2$- 0,078·$t_{\text{пов}}$+1,083· P- 1,017-0.00105· P^2;

ЯКЩО “навантаження”=“середнє” **ТА** “час” = “великий” **ТА** “температура повітря”=“велика” **ТА** “коефіцієнт залишкового ресурсу”=“малий” **ТО** “температура верхніх шарів” = -29,8·P ·$k_{\text{рес}}$+ 0,11· $t_{\text{пов}}$·$k_{\text{рес}}$+2,81· $k_{\text{рес}}^2$ - 0,4· $k_{\text{рес}}$ – 0,0198· (10) P·$t_{\text{пов}}$+0,007·$t_{\text{пов}}^2$- 0,06·$t_{\text{пов}}$+1,24· P- 11,92-0.0009· P^2;

ЯКЩО “навантаження”=“середнє” **ТА** “час” = “малий” **ТА** “температура повітря”=“велика” **ТА** “коефіцієнт залишкового ресурсу”=“малий” **ТО**

“температура верхніх шарів” = -42,5·P ·$k_{\text{рес}}$+ 0,121· $t_{\text{пов}}$·$k_{\text{рес}}$+2,963· $k_{\text{рес}}^2$ - 14,93· $k_{\text{рес}}$ – 0,0123· P·$t_{\text{пов}}$+0,0046·$t_{\text{пов}}^2$- 0,0924·$t_{\text{пов}}$+0,976· P- 0,262-0.000745· P^2.

Значення термів «малий», «середній», «великий» задаються. Наприклад, для навантаження трансформатора: «мале» – менше 40% від номінального, «середнє» – 40–75% і «велике» – більше 75%.

Оскільки математичного виразу для встановлення залежності навантажувальної здатності трансформатора з РПН від стану його системи охолодження не має, то побудована відповідна нейро-нечітка модель процесу. Вона дозволяє визначати допустиме навантаження

трансформатора з РПН в залежності від технічного стану охолоджувачів і вентиляторів, тобто від значення коефіцієнта ресурсу системи охолодження, у вигляді:

$$Ð_{âîï} = f\left(T, t_{ïîâ}, k_{âåðõ\,ø}, k_{ðåñ}\right) \quad (2)$$

Для вирішення такого типу задач використовується модель Мамдані.

Як приклад, розглянемо випадок, коли для АТ АОДЦТН-333000/750/330 підстанції «Вінницька–750» у відповідності до добового графіка навантаження заплановано збільшити потужність навантаження до P = 214 МВА і тримати таку потужність T = 3 години, а в цей час температура повітря $t_{ïîâ} = 36°C$ і забруднення поверхонь охолоджувачів відповідає коефіцієнту залишкового ресурсу охолоджувачів $k_{ðåñ} = 0{,}355$ в.о. Прогнозована температура верхніх шарів масла у відповідності до (1) становитиме $t_{âåðõ\,ø} = 80°C$, що перевищує максимальне нормативне значення 75°С і вимагає зменшення навантаження. Тому потрібно очистити охолоджувачі. Якщо після очистки $k_{ðåñ} = 1$ в.о., то температура верхніх шарів масла становитиме $t_{âåðõ\,ø} = 65°C$. Для цих же умов є можливість збільшити навантаження трансформатора на 36%, тобто до номінального 333 МВА. При цьому температура $t_{âåðõ\,ø}$ зросте лише до 70°С, що не перевищує нормованих значень.

Показано, що в алгоритмі та програмі АЧП, де розрахунок оптимальних нормальних режимів ЕЕС здійснюється з використанням заступної *r*–схеми електричних мереж, перерозподіляти навантаження між трансформаторами можливо зміною їх активних опорів. З цією метою встановлена залежність розрахункового активного опору трансформатора від його навантажувальної здатності і якості функціонування системи охолодження. Розроблено алгоритми оцінювання чутливості критерію оптимальності нормальних режимів ЕЕС до зміни активних опорів трансформаторів в розрахунковій моделі ЕЕС. Пряма і зворотна задачі чутливості критерію оптимальності до активного опору трансформаторів розв'язуються критеріальним методом, що дозволяє визначити області нечутливості для САК у відповідності до можливостей трансформаторів.

На рис. 2 проілюстровано випадок, коли допустима зона нечутливості критерію оптимальності δF до зміни коефіцієнтів трансформації визначається двома складовими, які формуються в залежності від двох причин. Перша – це необхідність створити нормальні умови для функціонування САК, а друга – допустиме навантаження трансформатора, яким здійснюються керуючі впливи. Тобто,

$$\delta F = \delta F_{\text{САК}} + \delta F_{\text{нав}},$$

де $\delta F_{\text{САК}}$ – складова зони нечутливості, зумовлена похибками телевимірів та похибками розрахунку, якою САК відстроюються від хибних спрацювань; $\delta F_{\text{нав}}$ – складова зони нечутливості, зумовлена зниженням навантажувальної здатності трансформаторів з РПН, в тому числі і в залежності від технічного стану системи охолодження трансформатора.

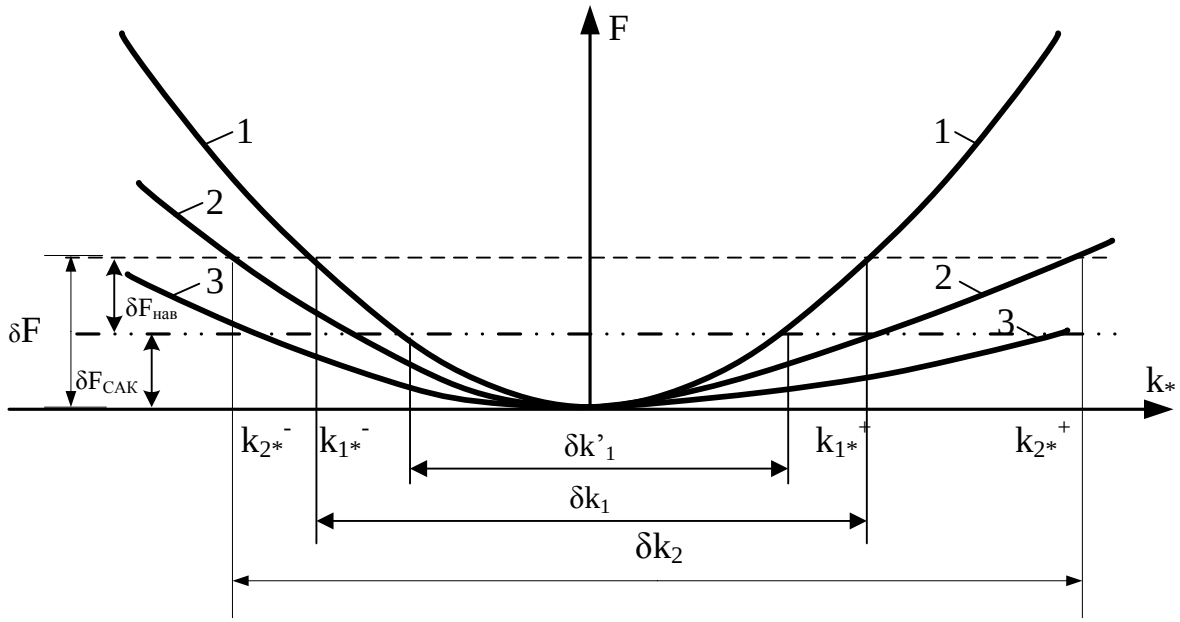

Рисунок 2 – Залежності критерію оптимальності від зміни коефіцієнтів трансформації трансформаторів з РПН з врахуванням навантажувальної здатності

Для трансформатора 1 показано два випадки. В першому – є обмеження на навантаження трансформатора і зона нечутливості по критерію оптимальності F для нього складається як сума $\delta F_{\text{ÑÀÊ}} + \delta F_{\text{í àâ}}$ і, відповідно, зона нечутливості коефіцієнта трансформації буде дорівнювати δk_1. Якщо для цього трансформатора, покращивши умови охолодження, зняти обмеження на навантаження, то $\delta F = \delta F_{\text{CAÊ}}$ і зона нечутливості коефіцієнта трансформації зменшиться з δk_1 до $\delta k_1^{'}$. Це означає, що, змінивши зону нечутливості для САК цим трансформатором з δk_1 на $\delta k_1^{'}$, інтенсивність перемикань його відпайок може збільшитись. Тобто, цей трансформатор може більш ефективно використовуватися для керування потоками потужності і зменшення втрат потужності в ЕЕС.

Третій розділ присвячено критеріальному моделюванню теплообмінних процесів в трансформаторах та їх оптимізації. Приведені експериментальні дані впливу системи охолодження на тепловий стан трансформатора. Показано, що для моделювання впливу на теплообмінні процеси в трансформаторі можливо і доцільно використовувати програмний комплекс *FLUENT*. Для аналізу теплопередачі між елементами трансформатора використовується параметрична подібність між параметрами теплових процесів.

Експериментально показано, що поверхня бака трансформатора за нормальних умов роботи системи охолодження нагрівається не рівномірно. Для покращання відбору тепла з поверхні і, відповідно, збільшення його навантажувальної здатності доцільно цілеспрямовано змінювати потоки охолоджуючого повітря від вентиляторів.

Для того, щоб визначитися з черговістю увімкнення–вимкнення вентиляторів, а можливо і з реконструкцією охолоджувача, досліджено процес теплообміну трансформатора. Теплообмін за існуючої і модернізованої системи охолодження трансформатора досліджувався і оцінювався з застосуванням програмного комплекса математичного моделювання гідро-газодинамічних середовищ *FLUENT*. При цьому коефіцієнт тепловіддачі

випромінюванням, який залежить від температури повітря, перепаду температур між поверхнею й повітрям, фарбування поверхні, умов випромінювання навколишнього середовища, визначається законом Стефана- Больцмана:

$$q_k = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{ï}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{â}}}{100} \right)^4 \right], \qquad (3)$$

де $T_{\text{ï}}$ і $T_{\text{â}}$ – абсолютні температури поверхні й повітря; C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; ε – ступінь чорності тіла.

Для визначення коефіцієнтів тепловіддачі для ламінарного і турбулентного потоків використовуються основні стійкі закономірності між параметрами, що характеризують теплообмін і теплопередачу між елементами системи охолодження трансформатора.

У четвертому розділі розроблено спосіб оптимального керування потоками потужності в ЕЕС з врахуванням навантажувальної здатності трансформаторів та їх коефіцієнтів ресурсу системи охолодження. Вдосконалено програмно-апаратний комплекс АСК ЕЕС з врахуванням навантажувальної здатності трансформаторів з РПН і технічного стану їх системи охолодження. На прикладах тестової схеми IEEE і схеми ПЗЕС визначено керуючі впливи з врахуванням стану системи охолодження трансформаторів.

В запропонованому способі оптимального керування режимами ЕЕС враховується відхилення потужності, яка передається лініями електропередачі, від максимальних допустимих значень. Регулювання здійснюється трансформатором, у якого більше значення коефіцієнта якості функціонування в нормальних режимах ЕЕС. При визначенні цих коефіцієнтів враховуються: коефіцієнти залишкового ресурсу РПН за параметрами: «накопичений комутований струм», «кількість перемикань»; коефіцієнт впливу трансформатором на загальносистемні втрати потужності, вартість втраченої електричної енергії в результаті роботи за ремонтною схемою; вартість ремонту РПН трансформатора в разі його пошкодження при оперативних перемиканнях; обмеження за напругою, за пропускною здатністю ліній електропередачі; зона нечутливості АРН РПН; технічний стан охолоджувачів трансформаторів, що дає можливість врахувати навантажувальну спроможність трансформаторів і підвищити ефективність керування режимом ЕЕС; зона нечутливості втрат потужності до регулювання трансформаторами з РПН.

При цьому коефіцієнт залишкового ресурсу по параметру «накопичений комутований струм» визначається за формулою

$$\text{k}_{\text{ðåñ}I} = \frac{I_{\text{çàë}} - n \cdot I_{\text{êî ì}}}{I_{\text{ï àñï}}}, \qquad (4)$$

залишковий струм комутації визначається як

$$I_{\text{çàë}} = I_{\text{ï àñï}} - I_{\text{í àê}}, \qquad (5)$$

а коефіцієнт ресурсу по кількості перемикань

$$k_{\text{ðåñ n}} = \frac{n_{\text{çàë}} - n}{n_{\text{ï àñï}}}, \qquad (6)$$

де $I_{\text{êî ì}}$ – струм, який комутується при одному перемиканні; $I_{\text{ï àñï}}$ – струм, який повинен комутуватися згідно паспорту; $I_{\text{í àê}}$ – накопичений комутований струм; n – кількість потрібних перемикань для досягнення оптимального режиму; $n_{\text{ï àñï}}$ – допустима кількість перемикань за паспортом; $n_{\text{çàë}}$ – залишковий ресурс перемикань.

Коефіцієнт якості функціонування трансформатора розраховується за виразом:

$$k_{\text{ÿê.ô óí ê.}} = (a_1 + a_2) \cdot k_{\text{ðåñ}n} \cdot k_{\text{ðåñ î õî ë}} \cdot k_{\text{ðåñI}} \cdot a_3 \cdot k_{\text{âòðàò}}, \qquad (7)$$

де коефіцієнт залишкового ресурсу для одного охолоджувача по параметру «різниця температур між входом і виходом охолоджувача» визначається за виразом:

$$k_{\text{ðåñî õî ë}.j} = \frac{\Delta t_{\text{ï î ò}\,j}}{\Delta t_{j\ \text{ñï ðàâ}}} \tag{8}$$

де $\Delta t_{\text{ï î ò}\,j}$ – поточне значення різниці температур для j-го режиму, $\Delta t_{j\ \text{ñï ðàâ}}$ – значення різниці температур справного трансформатора для j-го режиму; вагові коефіцієнти визначаються за виразами:

$$a_i = B_i / B_S \ ,$$

де B_1, B_2 – вартості втраченої електричної енергії при роботі по ремонтній схемі та ремонту РПН трансформатора при його пошкодженні; $B_3 = \left(\Delta P_{\text{ï î ò}} - \Delta P_{\text{í î ðì}}\right)\tau\tilde{n}$ – вартість наднормативних технічних втрат; $B_\Sigma = B_1 + B_2 + B_3$; $\Delta P_{\text{ï î ò}}$ – поточне значення втрат активної потужності; $\Delta P_{\text{î ï ò}}$ – оптимальне значення втрат активної потужності; c – вартість електроенергії; τ – тривалість періоду між перемиканнями.

Коефіцієнт $k_{\text{ðåñ î õî ë.j}}$ змінюється в процесі експлуатації від 1 до 0 для одного охолоджувача. Замість коефіцієнта залишкового ресурсу кожного охолоджувача по параметру «різниця температур між входом і виходом охолоджувача» використовується загальний коефіцієнт залишкового ресурсу всіх охолоджувачів

$$k_{\text{ðåñ.î õî ë.}} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_{\text{j}} \cdot k_{\text{ðåñ}\,j} \ , \tag{9}$$

де λ_{j} – коефіцієнт, який враховує вплив кожного охолоджувача окремо.

Регулюючий сигнал на РПН трансформаторів формується пропорційно до відхилення поточних сумарних втрат потужності в ЕЕС від їх оптимальних значень. Сформований сигнал узгоджується з сигналом, який враховує обмеження: за напругою, за максимальним допустимим струмом ліній електропередач, за зоною нечутливості РПН, за нормованими загальносистемними втратами потужності в лініях електропередач.

На рис. 3 приведена структурна схема адаптивного програмно-апаратного комплексу АСК ЕЕС, в якому добавлено блок «Розрахунок навантажувальної здатності трансформаторів». Він розроблений відповідно розглянутого вище методу визначення залишкового ресурсу трансформаторів.

Керуючі впливи зміною коефіцієнтів трансформації визначені для схеми, приведеної на рис. 4, з врахуванням стану системи охолодження трансформаторів 4–7 і 4–9, якими здійснюється керування потоками потужності. Визначені оптимальні коефіцієнти трансформації:

$$k_{\text{òð.4-7î ï ò.}} = 0,51818 - j0,03222\,, \qquad k_{\text{òð.4-9î ï ò.}} = 0,63504 - j0,03224\,.$$

Коефіцієнти ресурсу з врахуванням струму, який потрібно комутувати при виконанні керуючих впливів:

$$k_{\text{ðåñ_òð4-7}} = 0,039,\ k_{\text{ðåñ_òð4-9}} = 0,934\,.$$

Коефіцієнти втрат, які показують, як кожен трансформатор впливає на втрати:

$$k_{\text{âàòðàò_òð4-7}} = 0,13,\ k_{\text{âàòðàò_òð4-9}} = 0,167\,.$$

Коефіцієнт залишкового ресурсу $k_{\text{ðåñ î õî ë.}i,j}$ для охолоджувача по параметру «різниця температур між входом і виходом охолоджувача»:

$$k_{\text{ðåñî õî ë.4-7}} = 0,598,\ k_{\text{ðåñî õî ë.4-9}} = 0,655.$$

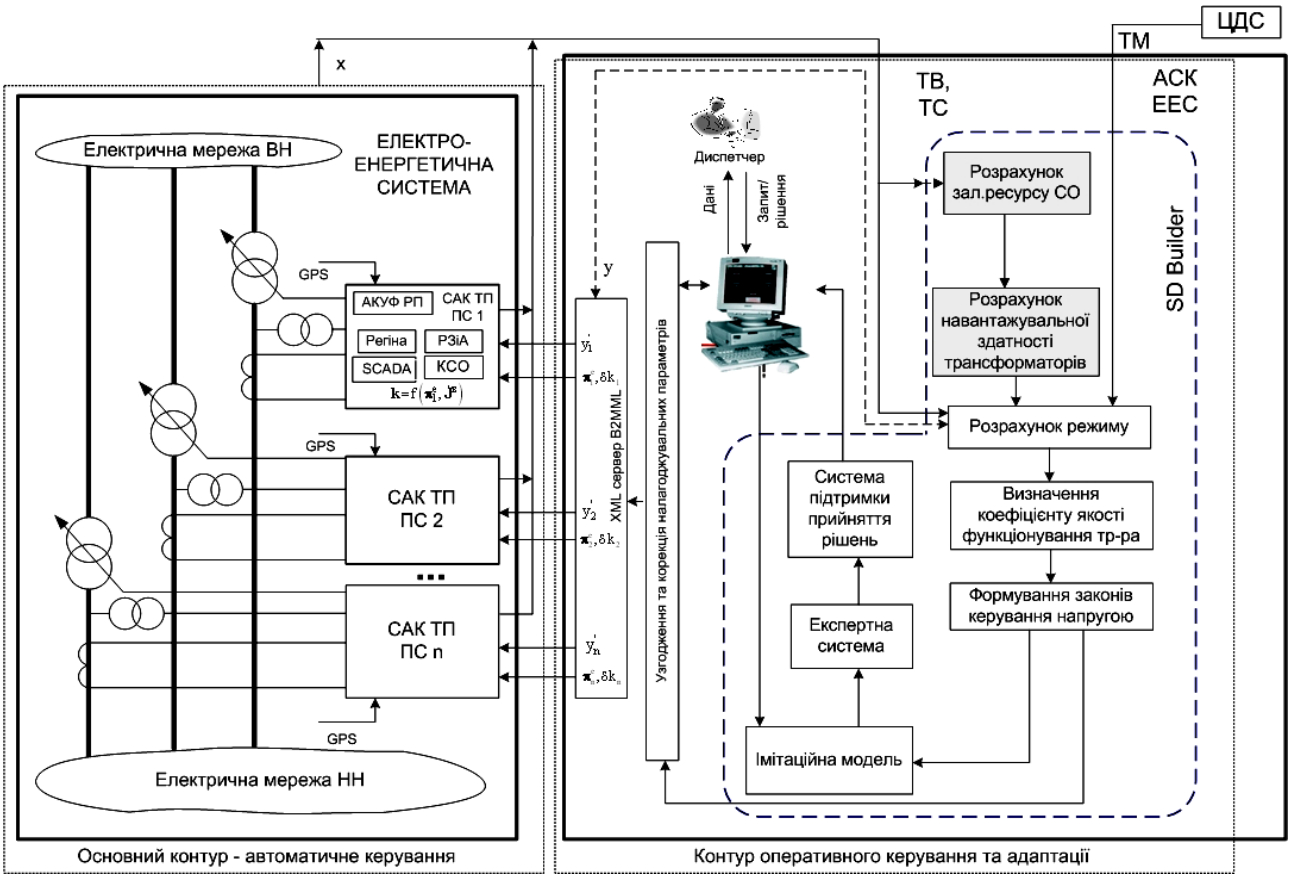

Рисунок 3 – Структурна схема адаптивного програмно-апаратного комплексу АСК ЕЕС

В табл. 1 приведені результати розрахунків вартості втраченої електроенергії для розрахунку вагових коефіцієнтів.

Коефіцієнти якості функціонування трансформаторів:

$$k_{\text{ÿê_ô ói ê4-7}} = 0{,}101; \quad k_{\text{ÿê_ô ói ê4-9}} = 0{,}938.$$

Чим більший коефіцієнт якості функціонування, тим ефективніше цей трансформатор виконує керуючі впливи. Вибирати потрібно той трансформатор, у якого коефіцієнт якості функціонування більший. Трансформатор 4–9 має більший коефіцієнт якості функціонування, ніж трансформатор 4–7, тому керуючі впливи потрібно виконувати трансформатором 4–7.

Таблиця 1 – Вагові коефіцієнти для розрахунку коефіцієнта якості функціонування

Транс-фор-матори	B_1	B_2	B_3	B_Σ	a_1	a_2	a_3
4–7	$0{,}127\cdot10^6$	$1{,}32\cdot10^6$	$0{,}7092\cdot10^4$	$2{,}66\cdot10^6$	0,48	0,496	0,0267
4–9	$0{,}125\cdot10^5$	$1{,}32\cdot10^6$	$0{,}7087\cdot10^4$	$2{,}69\cdot10^6$	0,475	0,499	0,0268

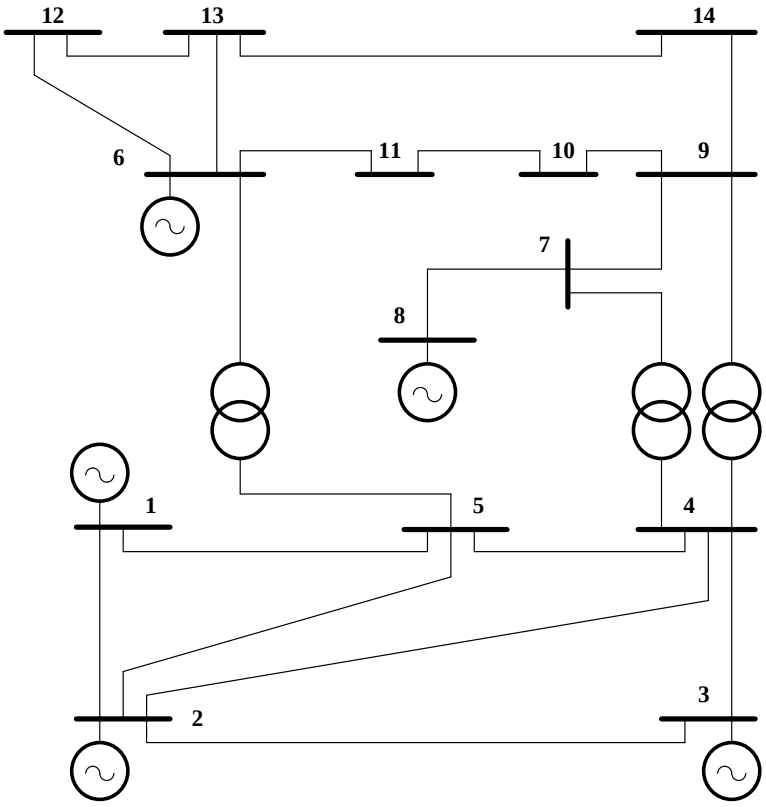

Рисунок 4 – Схема тестової ЕЕС 220-110 кВ IEEE на 14 вузлів

Подібний розрахунок проведений для фрагменту схеми ПЗЕС 750-110 кВ. Коефіцієнт ресурсу розраховувався за кількістю перемикань, а не за комутованим струмом, тому що в ПЗЕС комутований струм фіксується лише для вимикачів. Для РПН трансформаторів фіксується залишкова кількість гарантованих заводом перемикань. Результати розрахунків приведені в табл. 2.

Таким чином, в режимі, що розраховувався, в першу чергу мають задіюватися трансформатори 810-811 та 818–819. Перемикання найкраще розпочинати з автотрансформатора 810-811, який знаходиться на підстанції «Хмельницький – 330 кВ».

Таблиця 2 – Результати розрахунку коефіцієнтів якості функціонування трансформаторів ПЗЕС

№ тр-ра	Назва	$k_{ðåñ}$	$k_{âòðàò}$	$k_{ÿê_ô\,ói\,ê}$
801-802	«Вінниця-330кВ»	0,41	0,112	0,4124
826-825	«Вінниця-750 кВ»	0,58	0,03	0,5458
840-830	«Козятин-330 кВ»	0,52	0,032	0,5013
810-811	«Хмельницький - 330 кВ»	0,97	0,067	0,9676
803-804	«Шепетівка - 330 кВ»	0,34	0,102	0,5325
822-823	«Ладижинська ТЕС - 330 кВ»	0,01	0,03	0,6024
813-814	«Тернопіль - 330 кВ»	0,61	0,09	0,3874
818-819	«Бар - 330 кВ»	0,85	0,087	0,7406

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі оптимального керування потоками потужності в електроенергетичних системах з врахуванням технічного стану трансформаторів і автотрансформаторів з РПН і їх навантажувальної здатності. Для розв'язування задач оптимального керування перетоками в ЕЕС розроблено математичну модель впливу якості функціонування системи охолодження трансформаторів на їх навантажувальну здатність. Отримано такі нові результати.

1. Встановлено, що в сучасних умовах експлуатації у зв'язку зі старінням трансформаторів і автотрансформаторів з РПН, які використовуються в енергосистемах для керування потоками потужності, а також з переходом до балансуючого ринку електроенергії та електропостачання за двосторонніми договорами активізувалася необхідність визначення реальної навантажувальної здатності й залишкового ресурсу трансформаторів. Наявність такої інформації дозволяє більш обґрунтовано використовувати трансформатори та автотрансформатори з РПН в системі оптимального керування режимами ЕЕС для зменшення втрат електроенергії під час її транспортування.

2. Розроблено метод оптимального керування потоками потужності в ЕЕС з врахуванням навантажувальної здатності трансформаторів і автотрансформаторів з РПН, в якому навантажувальна здатність визначається в залежності від стану системи охолодження. Показано, що для трансформаторів з великим регулювальним ефектом, але недостатньою навантажувальною здатністю, доцільно вдосконалювати їх систему охолодження шляхом модернізації, в першу чергу, охолоджувача.

3. Для дослідження теплообмінних процесів в трансформаторах можливо застосувати програмний комплекс математичного моделювання гідро-газодинамічних середовищ *FLUENT*. Показана можливість і ефективність використання для дослідження системи охолодження трансформатора методів теорії подібності і моделювання. Ці методи, які традиційно застосовуються для вивчення теплових процесів, дозволяють встановити основні стійкі закономірності між параметрами, що характеризують теплообмін і теплопередачу між елементами системи охолодження трансформатора.

4. Розроблено нейро-нечітку модель навантажувальної здатності трансформатора в залежності від його коефіцієнта ресурсу. Допустиме навантаження трансформатора визначається в залежності від його коефіцієнта ресурсу, температури повітря і часу навантаження. Для оцінювання технічного стану системи охолодження трансформаторів використовуються засоби нейрон-нечіткого моделювання, завдяки чому враховуються функціональні зв'язки між впливовими факторами. Для визначення чіткого значення використовується модель логічного висновку Сугено.

5. Запропоновано метод визначення зони нечутливості критерію оптимальності – втрат активної потужності в ЕЕС до керуючих впливів на перетоки потужності в ній трансформаторами з РПН з врахуванням їх навантажувальної здатності. На основі методу визначення коефіцієнта якості функціонування трансформаторів з РПН розроблено алгоритм їх ранжування за критерієм ефективності оптимального керування ними з метою зменшення втрат активної потужності в ЕЕС. Це створює умови для підвищення ефективність заходів зменшення втрат активної потужності в ЕЕС та ощадного спрацьовування залишкового ресурсу трансформаторів з РПН.

6. Вдосконалено алгоритм розрахунку оптимальних режимів ЕЕС, в якому використовується заступна *r*-схема електричних мереж, шляхом перерозподілу навантаження між трансформаторами зміною їх активних опорів. З цією метою встановлена залежність розрахункового активного опору трансформатора від його навантажувальної здатності і якості функціонування системи охолодження. Розроблено алгоритми оцінювання чутливості критерію оптимальності нормальних режимів ЕЕС до зміни активних опорів

трансформаторів в розрахунковій моделі ЕЕС. Пряма і зворотна задачі чутливості критерію оптимальності до активного опору трансформаторів розв'язуються критеріальним методом.

7. Розроблено спосіб оптимального керування нормальними режимами ЕЕС з врахуванням коефіцієнту ресурсу системи охолодження трансформаторів з РПН, на який отримано патент України. Вдосконалено схему адаптивного програмно-апаратного комплексу АСК ЕЕС. Отримані в дисертаційній роботі результати наукових досліджень використовуються у Південно-Західній електроенергетичній системі з метою вдосконалення процесу оптимізації режимів електричних мереж енергосистеми та в навчальному процесі кафедри ЕЕС Вінницького національного технічного університету.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Комар В.О. Моделювання якості функціонування автоматизованих систем управління в задачах оптимального керування ЕЕС / В. О. Комар, О. І. Казьмірук, В. В. Нетребський. – Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Частина 1. – 2007. – №4(45). – С. 84–88.

2. Лежнюк П. Д. Вторинні критерії та індикатори подібності в задачах моделювання оптимальних режимів ЕЕС / П. Д. Лежнюк, Н. В. Собчук, О. І. Казьмірук // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2007. – № 597. – С. 152–157. – ISSN 0321-0499.

3. Лежнюк П. Д. Математичне моделювання навантажувальної спроможності трансформаторів з РПН в задачах оптимального керування режимами ЕЕС / П. Д. Лежнюк, В. М. Лагутін, О. І. Казьмірук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2009. – №637. – С. 39–44. – ISSN 0321-0499.

4. Рубаненко О. Контроль та покращення навантажувальної здатності трансформатора / Олександр Рубаненко, Олег Казьмірук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 6. – С. 63–68. – ISSN 1997-9266.

5. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування нормальними режимами ЕЕС з урахуванням технічного стану трансформаторів із РПН [Електронний ресурс] / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, О. І. Казьмірук // Наукові праці ВНТУ. – 2012. – №4. Режим доступу: http://www.nbuv.gov.ua/e–journals/VNTU/2012_4/2012–4.files/uk/12pdlott_ua.pdf.

6. Комар В. О. Крітеріальне моделювання в задачах оцінки якості функціонування електрообладнання / В. О. Комар, О. І. Казьмірук // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: І міжнар. наук.–техн. конф.: тези доповіді. – Луцьк, 2006. – С. 61–62.

7. Лежнюк П. Д. Формування законів оптимального керування з використанням вторинних критеріїв подібності / П. Д. Лежнюк, Н. В. Собчук, О. І. Казьмірук // Автоматичне керування (Автоматика–2006): XIII міжнар. наук.-техн. конф.: тези доповіді. – Вінниця, 2006 – С. 48.

8. Рубаненко О. Контроль та покращення навантажувальної здатності трансформатора [Електронний ресурс] / Олександр Рубаненко, Олег Казьмірук // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010): X міжнар. наук.-техн. конф.: тези доповіді. – Вінниця, 2010. – С. 209. Режим доступу: http://www.vstu.vinnica.ua/ mccs2010/materials/subsection_3.1.pdf.

9. Казьмірук О. І. Оптимальне керування режимами електроенергетичних систем з використанням нормативного значення технічних втрат потужності / О. І. Казьмірук, В. О. Лесько, О. О. Рубаненко // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації: міжнар. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – Кременчук, 2012. – С. 338–339.

10. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування нормальним режимом ЕЕС з урахуванням зміни опору автотрансформатора при погіршені стану системи охолодження / П. Д. Лежнюк,

О. Є. Рубаненко, О. І. Казьмірук // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електричних пристроях і системах: IV міжнар. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – Луцьк: Луцький національно технічний університет, 2012. – С. 124 – 125.

11. Отримано позитивне рішення по заявці №I201209804 від 14.08.2012 на патент на корисну модель. Україна, МПК8 HO2J3/24. Спосіб оптимального керування режимами роботи електроенергетичної системи. / Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Казьмірук О.І., Рубаненко О.О.; заявник і патентоутримувач Вінницький національний технічний університет – заявл. 21.06.12.

АНОТАЦІЯ

Казьмірук О.І. Підвищення ефективності оптимального керування потоками потужності в електричних мережах шляхом збільшення навантажувальної здатності трансформаторів з РПН. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи. – Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2013.

Запропоновано метод оптимального керування потоками потужності в ЕЕС з врахуванням навантажувальної здатності трансформаторів і автотрансформаторів з РПН, яка залежить від технічного стану системи охолодження. Показано, що для трансформаторів з великим регулювальним ефектом, але недостатньою навантажувальною здатністю, доцільно вдосконалювати їх систему охолодження шляхом модернізації охолоджувача.

Розроблено математичну модель і метод визначення зони нечутливості критерію оптимальності – втрат активної потужності в ЕЕС до керуючих впливів на перетоки потужності в ній трансформаторами з РПН з врахуванням їх навантажувальної здатності. На основі методу визначення коефіцієнта якості функціонування трансформаторів з РПН розроблено алгоритм їх ранжування за критерієм ефективності оптимального керування ними з метою зменшення втрат активної потужності в ЕЕС. Результати роботи використовуються у Південно-Західній електроенергетичній системі для підвищення ефективності процесу оптимізації режимів електричних мереж енергосистеми.

Ключові слова: електроенергетична система, оптимальне керування потоками потужності, втрати електроенергії, навантажувальна здатність трансформаторів, система охолодження, залишковий ресурс.

ABSTRACT

Kazmiruk O.I. The optimal control of power flow efficiency improvement in electrical networks by increasing the load capacity of transformers. - Manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Candidate of Science (Engineering) on specialty 05.14.02 – Electric power stations, networks and systems. – Vinnitsa National Technical University. Vinnitsa, 2013.

The method of optimal control of power flow in electrical power system with regard to load capacity of transformers and autotransformers with regulation under stress, which depends on the technical condition of the cooling system. It is shown that transformers with large regulatory effect, but insufficient load capacity, should improve their cooling system by upgrading the cooler. The mathematical model and method for determining the dead zone optimality criterion - active power losses in EPS to managing impacts on power flows, it transformers considering their load capacity. Based on the method of determining the coefficient of quality of transformers algorithm to rank the performance criterion for the optimal management to reduce active power losses in EPS. The results are used in the Southwest Power System to strengthen the optimization of electrical power supply networks.

Keywords: electrical power system, optimal control of power flow, electric power losses, load capacity transformers, cooling system, residual resource.

АННОТАЦИЯ

Казьмирук О.И. Повышение эффективности оптимального управления потоками мощности в электрических сетях путем увеличения нагрузочной способности трансформаторов с РПН. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной ступени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции, сети и системы. – Винницкий национальный технический университет. – Винница, 2013.

В роботе получено новое решение актуальной задачи оптимального управления потоками мощности в электроэнергетических системах с учетом технического состояния трансформаторов и автотрансформаторов с РПН и их нагрузочной способности. Для решения задач оптимального управления перетоками в ЭЭС разработана математическая модель влияния качества функционирования системы охлаждения трансформаторов на их нагрузочную способность.

Показано, что в современных условиях эксплуатации в связи со старением трансформаторов и автотрансформаторов с РПН, используемых в энергосистемах для управления потоками мощности, а также с переходом к балансирующему рынку электроэнергии и электроснабжения по двусторонним договорам активизировалась необходимость определения реальной нагрузочной способности и остаточного ресурса трансформаторов. Наличие таких данных позволяет более обосновано использовать трансформаторы и автотрансформаторы с РПН в системе оптимального управления режимами ЭЭС для уменьшения потерь электроэнергии при ее транспортировании.

Объект исследования диссертационной работы – процесс оптимального управления потоками мощности в электрических сетях электроэнергетических систем. Предмет исследования – методы и средства оценивания технического состояния трансформаторов с РПН и увеличения их нагрузочной способности. Целью диссертационной работы является повышение эффективности оптимального управления потоками мощности в электрических сетях для уменьшения в них потерь электроэнергии с учетом технического состояния трансформаторов с РПН и их погрузочной способности.

Разработан метод оптимального управления потоками мощности в ЭЭС с учетом нагрузочной способности трансформаторов и автотрансформаторов с РПН, в котором их нагрузочная способность определяется в зависимости от состояния системы охлаждения. Показано, что для трансформаторов с большим регулирующим эффектом, но недостаточной нагрузочной способностью, целесообразно улучшать их систему охлаждения путем модернизации, в первую очередь, охладителя.

Показана возможность и эффективность использования для исследования системы охлаждения трансформатора методов теории подобия и моделирования. Для исследования теплообменных процессов в трансформаторах возможно применять программный комплекс математического моделирования гидро-газодинамических сред *FLUENT*. Эти методы и средства позволяют установить основные устойчивые закономерности между параметрами, характеризующие теплообмен и теплопередачу между элементами системы охлаждения трансформатора.

Допустимая нагрузка трансформатора определяется в зависимости от его коэффициента ресурса, температуры воздуха и времени нагрузки. Для определения нагрузочной способности трансформаторов используется нейро-нечеткое моделирование. Функциональные связи между влияющими факторами при оценке технического состояния системы охлаждения трансформаторов также определяются средствами нейро-нечеткого моделирования.

В системе автоматического управления зоны нечувствительности критерия оптимальности (потерь активной мощности в ЭЭС) к управляющим воздействиям на перетоки мощности трансформаторами с РПН, определяются с учетом их нагрузочной способности. Используя метод определения коэффициента качества функционирования

трансформаторов с РПН, разработан алгоритм их ранжирования по критерию эффективности оптимального управления с целью уменьшения потерь активной мощности в ЭЭС. Таким образом, создаются условия для повышения эффективности мероприятий по уменьшению потерь электроэнергии в ЭЭС и для оптимального использования остаточного ресурса трансформаторов с РПН.

В алгоритме расчета оптимальных режимов ЭЭС при использовании *r*-схемы замещения электрических сетей перераспределять нагрузку между трансформаторами возможно изменяя их активные сопротивления. Расчетные активные сопротивления трансформаторов определяются в зависимости от их нагрузочной способности и качества функционирования системы охлаждения.

Разработан способ оптимального управления режимами ЭЭС с учетом коэффициента ресурса системы охлаждения трансформаторов с РПН. Усовершенствована схема адаптивного программно-аппаратного комплекса АСУ ЭЭС. Результаты диссертационных исследований используются в Юго-Западной электроэнергетической системе для оптимизации режимов электрических сетей.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, оптимальное управление потоками мощности, потери электроэнергии, нагрузочная способность трансформаторов, система охлаждения, остаточный ресурс.

Підписано до друку 25.03.2013 р. Формат 29.7 × 42 ¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2013-076
Віддруковано в комп’ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-87-38