

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

КИЛИМЧУК АНТОН ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.311.161

**КОМПЕНСАЦІЯ ВЗАЄМВПЛИВУ НЕОДНОРІДНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ
МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛІНІЙНИХ РЕГУЛЯТОРІВ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Рубаненко Олександр Євгенійович,
Вінницький національний технічний університет,
доцент кафедри електричних станцій та систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий
співробітник
Павловський Всеволод Віталійович,
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,
старший науковий співробітник відділу
автоматизації електричних систем;

кандидат технічних наук, доцент
Нагул Володимир Іванович
Південно-Західна електроенергетична система,
м. Вінниця, заступник начальника виробничо-
технічної служби.

Захист відбудеться “ 16 ” жовтня 2015 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, ГНК.

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

Автореферат розісланий “ 15 ” вересня 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з результатів реформ в електроенергетиці відбувся розподіл електричних мереж енергосистем на магістральні та розподільні як технічно, так і економічно. Магістральні електричні мережі (МЕМ), адміністративно виділені у окрему енергетичну структуру, стали транзитерами, передаючи своїми мережами електроенергію як суміжним електроенергетичним системам (ЕЕС), так і розподільним електричним мережам (РЕМ) обласних енергопостачальних компаній. При цьому МЕМ і РЕМ як окремі суб'єкти господарювання вирішують свої технічні й економічні проблеми самостійно відповідно до ринкових умов. Разом з тим режими функціонування цих мереж встановлюються згідно законів електротехніки незалежно від форми господарювання і від того, кому вони належать.

Паралельна робота ліній електропередачі (ЛЕП) різної напруги через високу міру неоднорідності викликає ускладнення під час транспортування та розподілу електроенергії. Між електричними мережами ЕЕС через неоднорідність виникають взаємні перетоки потужності, які завантажують мережі суміжних енергопостачальних компаній. При чому відомо, що мережі вищої напруги (ВН) розвантажуються на паралельно працюючі мережі нижчої напруги (НН). Наслідком цього є додаткові втрати електроенергії, а також перевантаження ЛЕП НН та комутаційних апаратів.

Дослідження міри впливу взаємних і транзитних перетоків потужності на рівень втрат потужності та електроенергії є актуальною задачею. Її розв'язання дозволить контролювати та оцінювати вплив перетоків потужності МЕМ на додаткові втрати в розподільних мережах енергопостачальних компаній, а також аналізувати наслідки взаємовпливу електричних мереж. Розв'язанню цієї задачі присвячено ряд робіт вітчизняних і закордонних вчених. Ними розроблено методи визначення втрат від транзитних перетоків в електричних мережах і засоби їх зменшення. Проте вони не повністю відповідають сучасним умовам і потребують розвитку та вдосконалення. Одним із можливих напрямків вдосконалення методів і засобів оптимізації потоків потужності та зменшення додаткових втрат в електричних мережах є використання залежності їх від неоднорідності паралельно працюючих електричних мереж.

Компенсація неоднорідності електричних мереж і зменшення додаткових втрат електроенергії в них можлива шляхом введення в контури електрорушійної сили лінійними регуляторами (ЛР) типу крос-трансформаторів (КТ) та трансформаторами з РПН. Дія КТ та трансформаторних зв'язків, які об'єднують електричні мережі різних напруг, може бути направлена на зменшення втрат електроенергії під час її транспортування шляхом перерозподілу природних потоків електричної потужності і примусового наближення їх до поточкорозподілу в однорідній електричній мережі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в плані наукових досліджень, проведених кафедрою електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету за держбюджетними темами: «Оптимізація режимів електричних

мереж з розосередженими джерелами енергії» (номер державної реєстрації НДР 0113U002260), «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізація їх живлення» (номер державної реєстрації НДР 0110U002161), «Оптимальне керування взаємними і транзитними перетоками потужності в об'єднаних електроенергетичних системах» (номер державної реєстрації НДР 0107U002091).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є зменшення додаткових втрат електроенергії, що викликані неоднорідністю магістральних і розподільних електричних мереж, шляхом компенсації взаємовпливу їх режимів з використанням лінійних регуляторів, встановлених в мережах нижчої напруги.

Відповідно до вказаної мети в роботі вирішуються такі **основні задачі**:

- аналіз існуючих методів зменшення додаткових втрат потужності, що викликані впливом магістральних мереж на режим розподільних електричних мереж;

- аналіз існуючих засобів компенсації взаємовпливу режимів магістральних і розподільних електричних мереж для зменшення додаткових втрат, що викликані неоднорідністю;

- розроблення методу визначення оптимальних місць встановлення крос-трансформатора в розподільних електричних мережах;

- вдосконалення методу визначення оптимального значення складових комплексних коефіцієнтів трансформації трансформаторних зв'язків в розподільних електричних мережах з крос-трансформаторами, які використовуються в оптимальному керуванні потоками потужності;

- розроблення схеми адаптивної системи керування локальними системами автоматичного керування регульовальними пристроями розподільних електричних мереж з крос-трансформаторами;

- розроблення алгоритмів формування законів оптимального керування локальної адаптивної системи автоматичного керування нормальними режимами розподільної електричної мережі та керувальних впливів для окремих крос-трансформаторів з урахуванням взаємовпливу навантажень магістральних електричних мереж на розподільні електричні мережі; визначення місця розташування та оптимального коефіцієнта трансформації крос-трансформатора на етапі реконструкції розподільних електричних мереж;

- розроблення алгоритму оптимального керування додатковими втратами потужності від впливу навантажень магістральної електричної мережі у вітках розподільної електричної мережі.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є процеси оптимального керування нормальними режимами неоднорідних електричних мереж, а *предметом дослідження* – методи та засоби компенсації взаємовпливу магістральних електричних мереж на розподільні мережі.

Методи дослідження. Усталені режими електричної мережі моделюються та аналізуються на базі методів контурних струмів та вузлових напруг із застосуванням методів Ньютона. Для розроблення алгоритмів і програм аналізу

неоднорідності електричних мереж та формування законів оптимального керування ними використовувалися матрична алгебра, теорія графів, декомпозиція та об'єктно-орієнтований аналіз. Математичні моделі, що пов'язують параметри режимів неоднорідних електричних мереж і параметри регульованих пристроїв, формуються з використанням теорії подібності.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що показана можливість і ефективність компенсації негативного впливу магістральних електричних мереж на розподільні мережі за допомогою лінійних регуляторів, які встановлені на підстанціях розподільних мереж. Зокрема:

- вперше встановлено залежність втрат потужності, зумовлених взаємними і транзитними перетоками між магістральними електричними мережами та розподільними електричними мережами, від зміни коефіцієнта трансформації крос-трансформатора, розміщеного в розподільній електричній мережі, що може бути використано для зменшення в них додаткових втрат потужності та електроенергії, викликаних транзитними перетоками потужності;

- вперше запропоновано метод визначення оптимальних місць приєднання крос-трансформатора в розподільній електричній мережі, який оснований на компенсації неоднорідності паралельно працюючих електричних мереж, що дозволяє підвищити ефективність керування потоками потужності магістральних електричних мереж у вітках розподільних електричних мереж;

- вдосконалено метод визначення оптимальних значень реактивної складової коефіцієнтів трансформації трансформаторних зв'язків в розподільних електричних мережах шляхом врахування фазозсувного кута крос-трансформаторів, що дозволяє використовувати ці коефіцієнти в оптимальному керуванні потоками потужності для зменшення втрат потужності й електроенергії в розподільній мережі або, залежно від постановки задачі, в магістральних та розподільних електричних мережах.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що:

- результати наукових досліджень реалізовано у формі алгоритмів та програми визначення втрат потужності від взаємних і транзитних перетоків потужності у розподільних електричних мережах, а також у формі алгоритмів та програми формування законів оптимального керування та керувальних впливів локальної адаптивної системи автоматичного керування транзитними та взаємними перетоками в розподільних електричних мережах;

- розроблено алгоритм та програми визначення місця встановлення та оптимального коефіцієнта трансформації крос-трансформатора на етапі реконструкції розподільної електричної мережі;

- розроблено алгоритми формування законів оптимального керування локальної адаптивної системи автоматичного керування нормальними режимами розподільної електричної мережі та керувальних впливів для окремих крос-трансформаторів з урахуванням взаємовпливу навантажень магістральних електричних мереж на розподільні електричні мережі;

- отримані в дисертаційній роботі результати наукових досліджень впроваджено в ПАТ «Вінницяобленерго» з метою вдосконалення процесу

оптимізації режимів розподільних електричних мереж (акт про впровадження від 2.06.2015 р.), передано у Південно-Західну електроенергетичну систему для узгодженого керування режимами магістральних і розподільних мереж (довідка про впровадження від 3.02.2015 р.) та впроваджено в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету (акт про впровадження від 8.06.2015 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі результати, які становлять основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно.

В роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: у [1] – проведення оптимізації поточкорозподілу активної потужності за допомогою КТ на прикладі фрагменту схеми Південно-Західної ЕЕС; у [2, 3, 8] – метод визначення місця встановлення ВДТ (КТ) в мережі НН за результатами аналізу чутливості, експериментальна частина, висновки; у [4, 11, 12] – закони оптимального керування трансформаторами з РПН та КТ з урахуванням зведення параметрів електричної мережі до напруги базисного вузла; у [5] – аналіз чутливості втрат електроенергії до зміни кутів фазозсувних трансформаторів (ФЗТ) та вибір вітки, в якій зміна кута ФЗТ спричиняє максимальне зменшення сумарних втрат активної електроенергії за певний проміжок часу, експериментальна частина; у [6, 7] – алгоритми визначення оптимальної вітки розташування КТ і поперечної складової його коефіцієнта трансформації, експериментальна частина; у [9] – визначення шляхів зменшення втрат електроенергії, викликаних неоднорідністю магістральних і розподільних електричних мереж, за рахунок компенсації взаємовпливу їх режимів з використанням лінійних регуляторів; у [10] – оцінювання ефективності використання крос-технологій; у [13] – обговорені шляхи зменшення додаткових втрат електроенергії; у [14] – методи оптимального керування нормальними режимами електричних мереж з використанням КТ; у [15] – обґрунтування доцільності використання КТ для зменшення додаткових втрат електроенергії; у [16] – визначення чутливості втрат активної потужності в електричній мережі до параметрів та місця розташування КТ; у [17] – визначення оптимального місця встановлення ФЗТ за узагальненим показником неоднорідності; у [18] – визначення оптимального місця установлення КТ, визначення оптимального модуля зрівнювальної е.р.с. і кута зсуву фаз напруг на шинах контрольованої підстанції, встановлення впливу КТ на сумарні втрати потужності в електричних мережах; у [19] – визначення чутливості узагальненого показника неоднорідності до місця установлення КТ, визначення місця установки КТ, визначення допустимих відхилень по напрузі у вузлах, встановлення реального впливу КТ на сумарні втрати потужності в електричних мережах і втрати від транзитних перетікань.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на X Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 2012 р.), на IV Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах», (м. Луцьк, 2012 р.), на I міжнародній науково-технічній конференції

викладачів, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів» (м. Донецьк, 2013 р.), на II міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2013)» (м. Вінниця, 2013 р.), на Першій всеукраїнській науково-технічній конференції «Електротехнічні системи, електрифікація й автоматизація в агропромисловому комплексі» (м. Вінниця, 2014 р.), на X Міжнародній науково-практичній конференції «Науковий простір Європи» (Республіка Польща, м. Перемишль, 2014 р.), на V Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк, 2014 р.), на XII Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)» (м. Вінниця, 2014 р.), на I Всеукраїнському науковому семінарі «Моніторинг енергота ресурсовикористання в складних виробничих системах» (м. Луцьк, 2015 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 19 наукових праць, з них 6 статей у наукових виданнях, що входять до списку фахових та до наукометричних баз, 2 статті в іноземних журналах, 7 статей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій та 2 статті у збірниках всеукраїнських конференцій. За результатами дисертаційної роботи отримано 2 патенти на корисну модель.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (100 найменувань), додатків. Основний зміст викладений на 121 сторінках друкованого тексту, містить 29 рисунків, 9 таблиць. Загальний обсяг дисертації 206 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовані мета, наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, а також наведені відомості щодо апробації отриманих результатів.

У **першому розділі** з метою визначення перспективних напрямків зменшення втрат активної потужності, а також обґрунтування задач наукового дослідження наведено аналіз існуючих методів і засобів оптимізації нормальних режимів та автоматизації оптимального керування режимами електричних мереж. При цьому враховується, що задачі розв'язуються в умовах ринку електроенергії та обмежених можливостях застарілого обладнання з практично відпрацьованим ресурсом.

Серед складових втрат електроенергії в електричних мережах енергосистем особливе місце займають втрати, які виникають через взаємовплив неоднорідних електричних мереж, що працюють паралельно. Зокрема, це стосується магістральних і розподільних мереж. Пояснюється це тим, що задача зменшення втрат в них неоднозначна. По-перше, ці мережі мають різних власників, інтереси яких, як правило, суперечливі. По-друге, ця задача може розв'язуватися за різних критеріїв оптимальності – мінімізація сумарних втрат електроенергії в магістральних і розподільних мережах або зменшення втрат в розподільних мережах, які викликаються в них транзитними

потоками потужності з магістральних мереж.

Режими електричних мереж різних класів напруг, які об'єднані в електричну систему, є взаємопов'язаними і будь-які зміни режиму в одній мережі впливають на стан в інших, тобто у електричних мережах спостерігається взаємовплив їх режимів. Однією з першопричин неоптимальності режиму є неоднорідність електричних мереж. Наслідком взаємовпливу режимів електричних мереж є додаткові втрати електроенергії, які зменшують їх економічну ефективність. Взаємовплив режимів електричних мереж різної приналежності змінюють поточкорозподіл та призводять до збільшення втрат потужності під час транспортування та розподілу електроенергії порівняно з їх нормативним значенням.

Через організаційне розділення енергетичної системи України на магістральні мережі та мережі енергопостачальних компаній проблемою реалізації оптимальних режимів стало погіршення якості та інформативності обміну оперативною режимною інформацією між компаніями та підприємствами, які обслуговують ці мережі. Ускладнює проблему оптимального керування поточкорозподілом між МЕМ і РЕМ також те, що регулюючі пристрої знаходяться у підпорядкуванні магістральних мереж. Такий стан призводить до завантаження ЛЕП РЕМ струмами транзитних перетікань МЕМ і, як наслідок, призводить до зростання втрат активної потужності та електроенергії, особливо в мережах НН. Залишається розвивати безпосередньо в РЕМ методи і засоби компенсації дії неоднорідності мереж і, відповідно, зменшувати втрати електроенергії та покращувати умови експлуатації розподільних мереж.

На сьогоднішній день оптимальне регулювання режимами здійснюється наявними регулювальними пристроями: автотрансформаторами (трансформаторами) з РПН, трансформаторами з поперечним регулюванням та ін. Однак можливостей таких регулювальних пристроїв в мережах енергопостачальних компаній може бути недостатньо для реалізації оптимального керування режимами. За таких умов бажано використовувати додаткові засоби, а саме ЛР, які б краще наблизили поточний режим до оптимального за критерієм мінімуму втрат потужності. Тому необхідно розробити методи знаходження оптимального місця розташування та оптимального коефіцієнта трансформації ЛР в мережах НН.

У **другому розділі** розроблено метод визначення оптимальних місць приєднання КТ в РЕМ та вдосконалено метод визначення оптимального значення складових комплексних коефіцієнтів трансформації трансформаторних зв'язків в РЕМ з КТ, які використовуються в оптимальному керуванні потоками потужності.

Зменшення втрат потужності в мережі НН, що є результатом паралельної роботи мереж ВН та НН і, як наслідок, зростання сумарних втрат в мережах НН, залишається справою тільки РЕМ. Тому задача оптимізації режиму в мережі НН зводиться до «витіснення» транзитних перетоків потужності з мережі НН у мережу ВН. Тобто розв'язується така задача:

$$\min \left\{ \Delta P_{\text{НН}} = \Delta P_{\text{НН РМ}} + \Delta P_{\text{ВН РМ}} \right\}, \quad (1)$$

де $\Delta P_{\text{HH PM}}$ – втрати активної потужності в мережах РЕМ, викликані власним навантаженням; $\Delta P_{\text{ВН PM}}$ – втрати активної потужності в мережах РЕМ, викликані транзитними потужностями МЕМ.

Складність реалізації результатів розв’язання задачі (1) полягає в тому, що засоби, за допомогою яких вони можуть бути практично досягнуті (трансформатори, автотрансформатори зв’язку, лінійні регулювання і т. п.), як правило, знаходяться в МЕМ і тому оперативний персонал підприємств РЕМ не може здійснювати керування режимом за допомогою цього обладнання. Отже, з позиції РЕМ одним із шляхів вирішення задачі оптимізації режиму є встановлення ЛР типу КТ в своїх мережах.

Для оцінювання ефективності використання КТ в РЕМ спочатку необхідно виділити з сумарних втрат потужності втрати від власних перетоків мереж НН, які визначаються потужностями власних вузлів $\Delta \dot{S}_{\text{HH } i}^{\text{HH}}$ та від перетоків, які викликані впливом мережі ВН, $\Delta \dot{S}_{\text{HH } i}^{\text{ВН}}$:

$$\Delta \dot{S}_{\text{HH } i} = \Delta \dot{S}_{\text{HH } i}^{\text{HH}} + \Delta \dot{S}_{\text{HH } i}^{\text{ВН}} = \left| \begin{matrix} \dot{T}_{k \text{ КТ } i}^{\text{HH}} & \dot{T}_{ki}^{\text{ВН}} \\ \dot{S}_{\text{ВН}} \end{matrix} \right| \begin{matrix} \dot{S}_{\text{HH}} \\ \dot{S}_{\text{ВН}} \end{matrix} = \dot{T}_{k \text{ КТ } i}^{\text{HH}} \dot{S}_{\text{HH}} + \dot{T}_{ki}^{\text{ВН}} \dot{S}_{\text{ВН}}, \quad (2)$$

де $\dot{T}_{k \text{ КТ } i}^{\text{HH}}$, $\dot{T}_{ki}^{\text{ВН}}$ – відповідно коефіцієнти розподілу втрат потужності для i -ої вітки мережі НН від потужностей вузлів мереж НН і ВН; \dot{S}_{HH} , $\dot{S}_{\text{ВН}}$ – відповідно вектори потужностей вузлів мереж НН і ВН.

Знаючи втрати потужності, які викликані впливом мережі ВН в кожній вітці мережі НН, можна визначити сумарні втрати в мережі НН, які викликаються впливом мережі ВН:

$$\Delta \dot{S}_{\text{HH}}^{\text{ВН}} = \sum_{i \in \mathbf{M}_{\text{HH}}} \Delta \dot{S}_{\text{HH } i}^{\text{ВН}}$$

або з врахуванням (2)

$$\Delta \dot{S}_{\text{HH}}^{\text{ВН}} = \sum_{i \in \mathbf{M}_{\text{HH}}} \dot{T}_{ki}^{\text{ВН}} \dot{S}_{\text{ВН}}, \quad (3)$$

де \mathbf{M}_{HH} – множина номерів віток мережі НН.

Для того, щоб визначити оптимальне місце встановлення КТ, визначається матриця показників неоднорідності, в якій враховується неоднорідність кожної вітки $\mathbf{x}_{\text{В}} \mathbf{r}_{\text{В}}^{-1}$ і коефіцієнти трансформації трансформаторів з РПН та КТ:

$$\gamma = \mathbf{k}_{\text{КТ+РПН}} \left(\mathbf{M}_t^- \mathbf{x} \mathbf{r}^{-1} - \mathbf{x}_{\text{В}} \mathbf{r}_{\text{В}}^{-1} \mathbf{M}_t^- \right) + \left(\mathbf{M}_t^+ \mathbf{x} \mathbf{r}^{-1} - \mathbf{x}_{\text{В}} \mathbf{r}_{\text{В}}^{-1} \mathbf{M}_t^+ \right), \quad (4)$$

де \mathbf{M}_t^+ – матриця, яка містить фрагмент матриці з’єднань, елементами якої є нулі та одиниці зі знаком “+”; \mathbf{M}_t^- – та ж матриця, але її елементами є нулі та одиниці зі знаком “-”; $\mathbf{k}_{\text{КТ+РПН}}$ – діагональна матриця коефіцієнтів трансформації КТ $\mathbf{k}_{\text{КТ}}$ (якщо в i -й вітці КТ відсутній, то i -й діагональний елемент $k_{i,i} = 0 \cdot j$) та коефіцієнтів трансформації трансформаторів з РПН ($\mathbf{k}_{\text{РПН}}$)

(якщо в i -й вітці трансформатор з РПН відсутній, то i -й діагональний елемент $k_{i,i} = 1$); \mathbf{x} , \mathbf{r} – реактивна і активна складові матриці вузлових опорів.

Оптимальною віткою для встановлення КТ буде та, яка є найбільш впливовою на узагальнений показник неоднорідності $|\gamma|$, який визначається як евклідова норма матриці γ . Метод вибору оптимальної вітки для встановлення КТ за $|\gamma|$ був перевірений простим перебором можливих варіантів і показано збіг результатів.

Для реалізації оптимального струморозподілу в РЕМ необхідно вводити в контури зрівнювальні е.р.с. Їх введення здійснюється за допомогою трансформаторів з РПН та КТ, який встановлений у попередньо вибрану вітку. Контурні зрівнювальні е.р.с. пов'язані з коефіцієнтами трансформації трансформаторів з РПН та фазозсувними кутами КТ неоднозначно. Для досягнення однозначності зв'язку зрівнювальних е.р.с. з коефіцієнтами трансформації, е.р.с. визначаються для системи базисних контурів. Причому система базисних контурів формується так, щоб трансформаторні вітки з КТ знаходилися в її хордах. Тоді для i -го контуру, в якому встановлено трансформатор з поздовжнім регулюванням коефіцієнта трансформації і КТ, коефіцієнт трансформації трансформатора та кут КТ будуть мати вигляд:

$$k_i = 1 - E_{*зр\ p\ i}, \quad (5)$$

$$\delta_i = \arctg\left(-\frac{E_{*зр\ a\ i}}{1 - E_{*зр\ p\ i}}\right), \quad (6)$$

де $E_{*зр\ a\ i}$, $E_{*зр\ p\ i}$ – активна і реактивна складові відносних значень зрівнювальної е.р.с. i -го контура, які є відношенням їх значень до напруги базисного вузла; k_i – коефіцієнт трансформації трансформатора, що входить в i -й контур; δ_i – фазозсувний кут КТ i -го контуру.

З метою вдосконалення САК потоками потужності, викликаними впливом режиму магістральних мереж на розподільні електричні мережі, отримано залежності зрівнювальних контурних е.р.с. від коефіцієнтів трансформації трансформаторів з РПН і КТ. В критеріальній формі вони мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{*зр.\ a\ \Sigma}^*(t) &= \mathbf{E}_{*зр.\ a\ РПН}^*(t) + \mathbf{E}_{*зр.\ a\ КТ}^*(t) = \boldsymbol{\pi}_{a\Sigma}^E \mathbf{J}_{*p}^*(t); \\ \mathbf{E}_{*зр.\ p\ \Sigma}^*(t) &= \mathbf{E}_{*зр.\ p\ РПН}^*(t) + \mathbf{E}_{*зр.\ p\ КТ}^*(t) = \boldsymbol{\pi}_{p\Sigma}^E \mathbf{J}_{*a}^*(t), \end{aligned} \quad (7)$$

де $\mathbf{E}_{*зр.\ a\ \Sigma}^*$, $\mathbf{E}_{*зр.\ p\ \Sigma}^*$ – вектори активних і реактивних складових відносних значень зрівнювальних е.р.с. трансформаторів з РПН та КТ, якими вводяться

зрівнювальні струми; $\mathbf{J}_{*p}^*(t), \mathbf{J}_{*a}^*(t)$ – вектори активних і реактивних складових відносних значень струмів у вузлах; $\boldsymbol{\pi}_{a\Sigma}^E, \boldsymbol{\pi}_{p\Sigma}^E$ – матриці критеріїв подібності.

Елементи векторів $\mathbf{E}_{*зр.а\Sigma}^E, \mathbf{E}_{*зр.р\Sigma}^E, \mathbf{J}_{*a}^E, \mathbf{J}_{*p}^E$ визначаються як відношення відповідних значень параметрів поточного до базисного режимів (по г-схемі).

Під час оперативного керування спочатку визначається доцільність використання КТ з метою зменшення $\mathbf{E}_{*зр.аКТ}^E$ при поточних положеннях РПН трансформаторів (відомі $\mathbf{E}_{*зр.аРПН}^E$), а далі визначаються оптимальні коефіцієнти трансформації трансформаторів з РПН за наявності або відсутності КТ.

Матриці критеріїв подібності в (7) визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\pi}_{a\Sigma}^E &= -\left[\mathbf{E}_{зр.аРПН}^{(6)} + \mathbf{E}_{зр.аКТ}^{(6)} \right]_{\text{д}}^{-1} (\mathbf{v}_{\text{РПН}} + \mathbf{v}_{\text{КТ}}) (\mathbf{r}_{\text{вРПН}} + \mathbf{r}_{\text{вКТ}}) \mathbf{M}_{\alpha}^{-1} \left[\mathbf{J}_{\text{р}}^{(6)} \right]_{\text{д}}; \\ \boldsymbol{\pi}_{\text{р}\Sigma}^E &= \left[\mathbf{E}_{зр.рРПН}^{(6)} + \mathbf{E}_{зр.рКТ}^{(6)} \right]_{\text{д}}^{-1} (\mathbf{v}_{\text{РПН}} + \mathbf{v}_{\text{КТ}}) (\mathbf{r}_{\text{вРПН}} + \mathbf{r}_{\text{вКТ}}) \mathbf{M}_{\alpha}^{-1} \left[\mathbf{J}_{\text{а}}^{(6)} \right]_{\text{д}}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $\mathbf{E}_{зр.аРПН}^{(6)}, \mathbf{E}_{зр.аКТ}^{(6)}, \mathbf{E}_{зр.рРПН}^{(6)}, \mathbf{E}_{зр.рКТ}^{(6)}$ – активна та реактивна складові зрівнювальних е.р.с. трансформаторів з РПН та КТ для базисного режиму електричної мережі; $\mathbf{v}_{\text{РПН}}, \mathbf{v}_{\text{КТ}}$ – матриці показників неоднорідності для контурного представлення е.р.с. електричних мереж відповідно з врахуванням трансформаторів з РПН та КТ; $\mathbf{r}_{\text{вРПН}}, \mathbf{r}_{\text{вКТ}}$ – матриці активних опорів віток відповідно з трансформаторами з РПН і з КТ; \mathbf{M}_{α} – матриця з'єднань віток у вузлах дерева схеми; $\mathbf{J}_{\text{а}}^{(6)}, \mathbf{J}_{\text{р}}^{(6)}$ – складові вектору задаючих струмів для базисного режиму електричної мережі.

Розрахункові формули для визначення оптимальних значень коефіцієнтів трансформації трансформаторів з РПН та КТ з урахуванням зведення параметрів електричної мережі до напруги базисного вузла мають вигляд:

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_{a\Sigma}(t) &= 1 - \left[\mathbf{E}_{зр.аРПН}^{(6)} + \mathbf{E}_{зр.аКТ}^{(6)} \right]_{\text{д}} \cdot \left(\mathbf{U}_{\text{д}}^{(6)} \right)^{-1} \cdot \boldsymbol{\pi}_{\text{а}}^E \cdot \mathbf{J}_{*p}^*(t) \\ \mathbf{k}_{\text{р}\Sigma}(t) &= - \left[\mathbf{E}_{зр.рРПН}^{(6)} + \mathbf{E}_{зр.рКТ}^{(6)} \right]_{\text{д}} \cdot \left(\mathbf{U}_{\text{д}}^{(6)} \right)^{-1} \cdot \boldsymbol{\pi}_{\text{р}}^E \cdot \mathbf{J}_{*a}^*(t), \end{aligned} \quad (9)$$

де $\mathbf{U}_{\text{д}}^{(6)}$ – діагональна матриця, кожний елемент якої дорівнює напрузі базисного вузла.

На завершальному етапі вибору оптимального кута КТ проводиться оцінювання чутливості втрат електроенергії до змінення кута КТ, що дає можливість точніше визначити оптимальний кут КТ, встановлений у попередньо вибраній вітці. Цей кут необхідно виставити для максимального зменшення втрат потужності в РЕМ.

У **третьому розділі** розглядається практична реалізація методів оцінювання та аналізу взаємовпливу неоднорідних електричних мереж різної

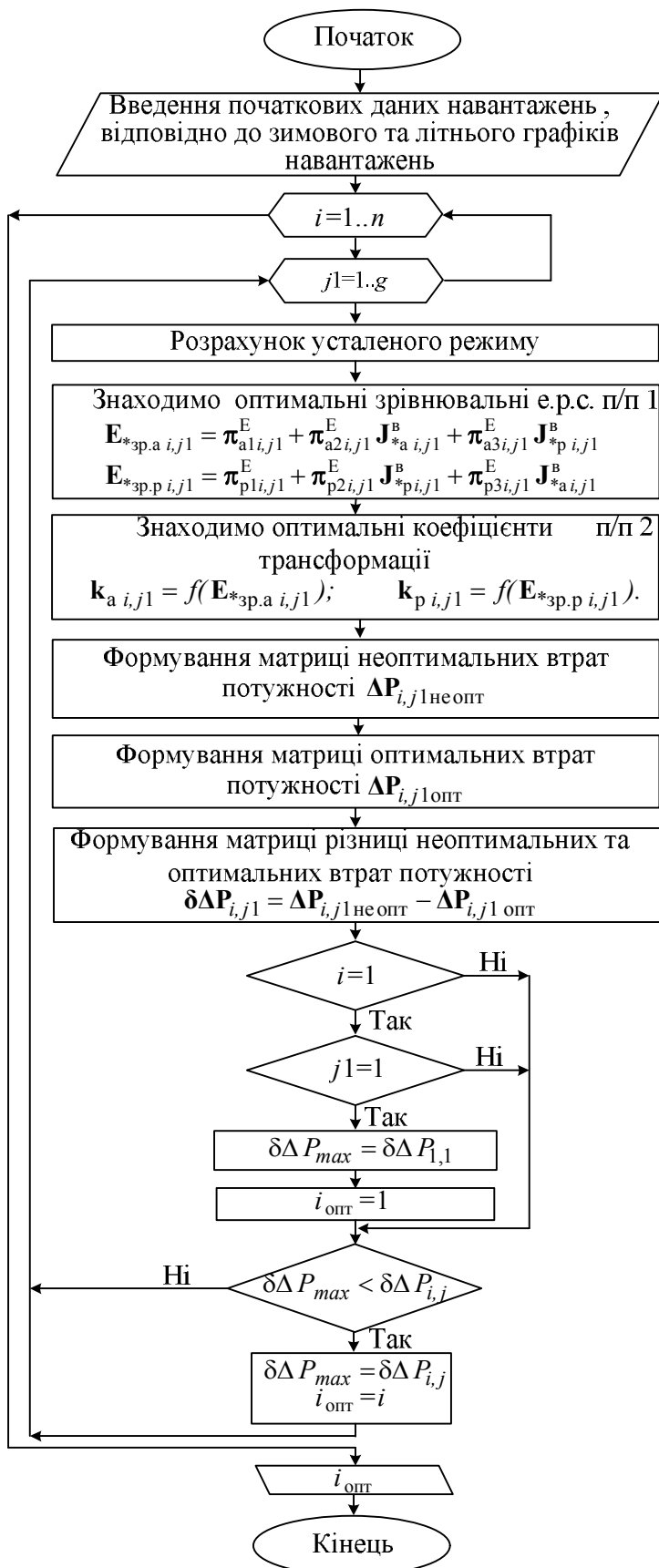


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму визначення вітки оптимального розміщення КТ

балансової належності з використанням трансформаторів з РПН та КТ в мережах енергопостачальних компаній.

Вдосконалено програмно-апаратний комплекс САК режимами електричних мереж з трансформаторами з РПН і крос-трансформаторами з метою адаптувати його для керування потоками потужності в РЕМ, причиною яких є неоднорідність магістральних і розподільних електричних мереж. Для цього розроблено алгоритми і програми визначення втрат потужності в окремих вітках електричної мережі та оптимального керування додатковими втратами потужності, а також розроблено алгоритм і програми визначення оптимальної вітки розміщення КТ та визначення оптимального значення його кута. В алгоритмах використовується матриця показників неоднорідності електричних мереж і метод компенсації негативного впливу неоднорідності на потоки потужності та додаткові втрати потужності й електроенергії в них за допомогою трансформаторів з позовжньо-поперечним регулюванням коефіцієнтів трансформації, зокрема крос-трансформаторів.

Серед розроблених алгоритмів і програм особливу увагу приділено визначенню місця встановлення КТ і обґрунтуванню оптимального значення його кута. На рис. 1 наведено алгоритми визначення

оптимальної вітки для розташування КТ за очікуваним зменшенням втрат активної потужності. Відповідно до рис. 1: i – умовні номери трансформаторних віток (за винятком вітки, яка розташована в дереві графа), в яких розглядається можливість розташування КТ; $j1$ – номер ступеня добового графіка навантаження (спочатку зимового, а потім літнього); $E_{зр а}$, $E_{зр р}$ – відносні значення активних і реактивних складових зрівнювальних е.р.с., які необхідно ввести в контури схеми електричної мережі для компенсації впливу неоднакових параметрів трансформаторів контуру та неоднорідності віток; $\pi_{a1i,j}^E$, $\pi_{a2i,j}^E$, $\pi_{a3i,j}^E$, $\pi_{p1i,j}^E$, $\pi_{p2i,j}^E$, $\pi_{p3i,j}^E$ – критерії подібності параметрів поточного режиму параметрам економічного режиму однорідної мережі; $k_{a i,j}$, $k_{p i,j}$ – поздовжні та поперечні складові коефіцієнтів трансформації досліджуваних трансформаторних віток; $\Delta P_{i,j \text{ неопт}}$, $\Delta P_{i,j \text{ опт}}$ – втрати активної потужності у вітках електричної мережі, викликані неоптимальними та оптимальними (відповідно) коефіцієнтами трансформації трансформатора досліджуваної вітки під час роботи електричної мережі на $j1$ ступені графіка навантаження; $\delta P_{i,j \text{ опт}}$ – зменшення втрат активної потужності у вітках.

Показано, що при автоматизації оптимального керування потоками потужності та напругою в електричних мережах з метою зменшення в них транзитних втрат можливо і доцільно застосовувати методи теорії подібності та моделювання. Такий підхід дозволяє побудувати адаптивну САК з розподіленням функцій трансформаторів з РПН і крос-трансформаторів в оптимальному керуванні режимами електричних мереж з метою зменшення втрат потужності та електроенергії від транзитних потоків.

У **четвертому розділі** показується ефективність використання розроблених математичних моделей та алгоритмів шляхом обчислювального експерименту. Виконуються розрахунки на прикладі тестових схем і схем реальних електричних мереж. Розраховані оптимальні зрівнювальні е.р.с. для різних ступенів річного графіка навантаження, розраховано матриці критеріїв подібності, за допомогою яких формуються закони оптимального керування перетоками потужності в електричних мережах. Перевірено дієвість та ефективність розроблених алгоритмів для визначення оптимальної вітки для встановлення КТ та його оптимального кута в процесі оптимального керування втратами потужності та втратами електроенергії в електричних мережах.

Виконано обчислювальний експеримент на прикладі тестової схеми електричної мережі IEEE 230/138 кВ, що містить 23 вузли та 33 вітки (рис. 2). Вибір оптимальної вітки для встановлення КТ та кута КТ здійснено відповідно до добового графіка навантаження (рис. 3). Визначення оптимальної вітки для встановлення КТ проведено двома методами: шляхом введення в контури зрівнювальної е.р.с. та за узагальненим показником неоднорідності.

За першим методом розраховується усталений режим електричної мережі для отримання інформації про її стан. Для цього використовується програма “ГрафСканер”. Для прикладу розрахуємо оптимальний режим електричної мережі на першому інтервалі добового графіка навантаження для зимового періоду (для всіх інтервалів зимового та для літнього графіків навантаження

розрахунок проводиться аналогічно).

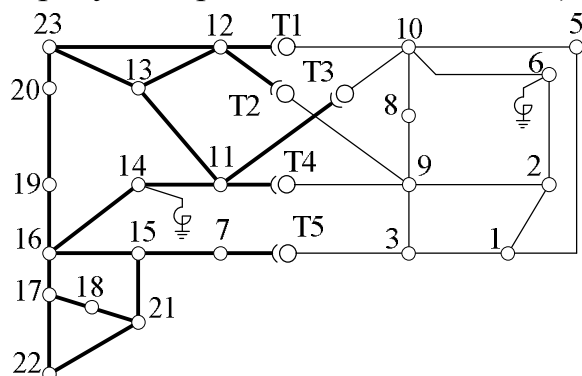


Рисунок 2 – Тестова мережа IEEE
230/138 кВ на 23 вузли

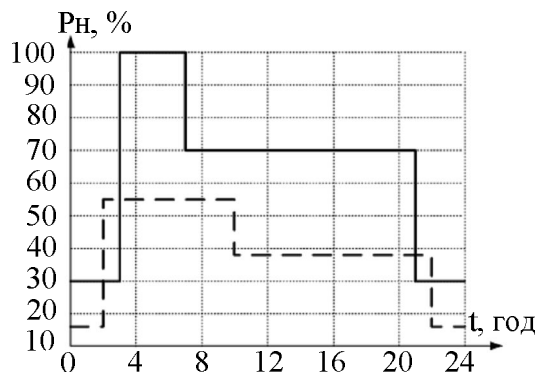


Рисунок 3 – Добовий графік
навантажень: — зима, --- літо

Визначаються оптимальні зрівнювальні е.р.с. контурів для розглядуваного режиму. Для цього від контурних е.р.с. поточного режиму \dot{E}_k віднімаються контурні е.р.с. базисного режиму $\dot{E}_{зр}^{(6)}$ (для r -схеми). Звідси зрівнювальні е.р.с. контурів будуть мати значення:

$$\dot{E}_{зр} = \dot{E}_k - \dot{E}_{зр}^{(6)} = \begin{vmatrix} -0,072 & -3,572 + j4,494 & 3,5 - j4,494 \\ -0,469 & -2,316 + j11,011 & 1,847 - j11,011 \\ -0,758 & -2,964 + j7,738 & 2,206 - j7,738 \\ 0,866 & -1,992 + j9,446 & 2,858 - j9,446 \\ 0 & 2,529 + j11,777 & -2,529 - j11,777 \\ 0 & -3,635 + j5,539 & -3,635 - j5,539 \\ 0 & -1,472 + j3,343 & 1,472 - j3,343 \\ 0 & -1,468 + j3,47 & 1,468 - j3,47 \\ 0 & -0,846 + j2,288 & 0,846 - j2,288 \\ 0 & -0,728 + j1,645 & 0,728 - j1,645 \\ 0 & -0,539 + j1,98 & 0,539 - j1,98 \end{vmatrix} \text{ кВ.}$$

У відповідності до визначених зрівнювальних е.р.с. розраховуються оптимальні коефіцієнти трансформації трансформаторів та КТ у хордах системи базисних контурів:

$$k_{a12-9 \text{ опт}} = 0,6401, k_{p12-9 \text{ опт}} = 0,0125;$$

$$k_{a11-10 \text{ опт}} = 0,6436, k_{p11-10 \text{ опт}} = 0,0306;$$

$$k_{a11-9 \text{ опт}} = 0,6419, k_{p11-9 \text{ опт}} = 0,0216;$$

$$k_{a12-10 \text{ опт}} = 0,6444, k_{p12-10 \text{ опт}} = 0,0260.$$

В результаті розрахунку оптимального режиму на кожному ступені графіка навантажень отримуються значення оптимальних коефіцієнтів трансформації трансформаторів та кути КТ за умови почергового розміщення останніх в трансформаторних вітках, які є хордами в системі базисних контурів (вітки 12–10, 11–9, 12–9, 11–10). Результати розрахунку

наведені на рис. 4. На графіку зображені залежності втрат активної потужності в електричній мережі від номерів трансформаторних віток, в які по черзі вводились розраховані оптимальні $k_{РПН}$ та δ для максимального добового навантаження. На рис. 4: 1 – неоптимальні $k_{РПН}$ і відсутній КТ; 2 – оптимальні $k_{РПН}$ і відсутній КТ; 3 – оптимальний $k_{РПН}$ та оптимальний кут КТ δ для відповідної трансформаторної вітки; 4 – неоптимальні $k_{РПН}$ та оптимальний кут КТ δ для відповідної трансформаторної вітки).

Почергово змінюючи розташування КТ з оптимальним для досліджуваного режиму δ в кожній з трансформаторних віток для всіх ступенів графіків навантаження, вибираємо ту вітку, в якій втрати є мінімальними. Такою віткою для розглядуваного прикладу є вітка 11–10.

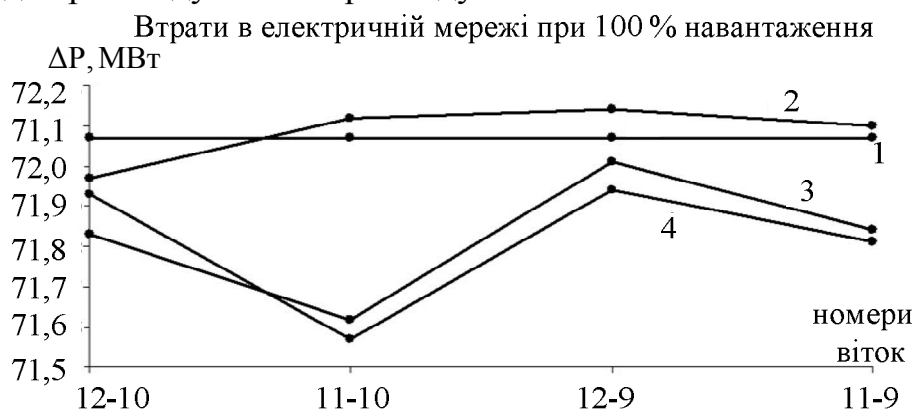


Рисунок 4 – Залежності втрат потужності від місця встановлення КТ

Оптимальну вітку для встановлення КТ можна визначити також методом, що базується на використанні узагальнених показників неоднорідності віток електричної мережі. Найбільші значення оцінок впливу параметрів окремих віток на значення узагальненого показника неоднорідності мережі IEEE 230/138 кВ наведена на рис. 5.

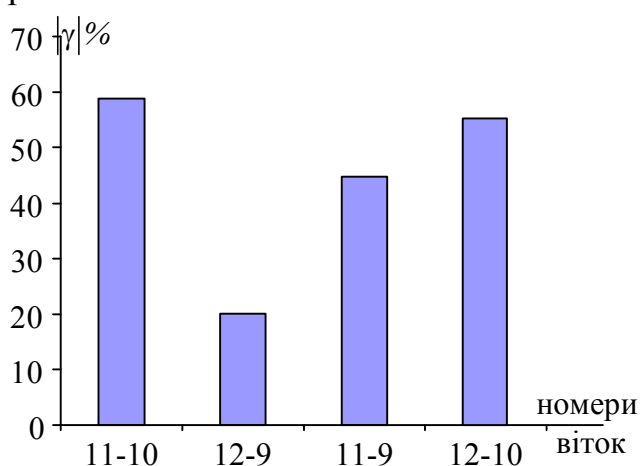


Рисунок 5 – Оцінки впливу параметрів окремих віток на значення показника неоднорідності тестової електричної мережі IEEE 230/138 кВ

Як видно з рис. 5, в першу чергу КТ необхідно встановити у вітці 11–10. Отже, обидва методи по відшукуванню оптимальної вітки встановлення КТ дали однаковий результат. Проте, за другим методом потрібно значно менше

обчислень. З метою регулювання потоками потужності в електричних мережах найефективніше встановити КТ у вітці 11-10. Залишається визначити оптимальний кут КТ.

Якщо проводити вибір оптимального δ за мінімальним значенням втрат активної потужності, то при зміні графіка навантаження може змінюватись оптимальне значення кута КТ. Отже, оптимальний δ КТ вибирається за критерієм мінімальних річних втрат електроенергії. Для цього переходимо від розглянутих добових графіків навантаження до річного графіка навантаження за тривалістю. Розрахунок режиму проводиться з урахуванням оперативних перемикачів (введенням або виведенням КТ) протягом року. За результатами розрахунку режимів будуються залежності різниці втрат електроенергії при введеному та виведеному КТ. Для прикладу на рис. 6 подано таку залежність.

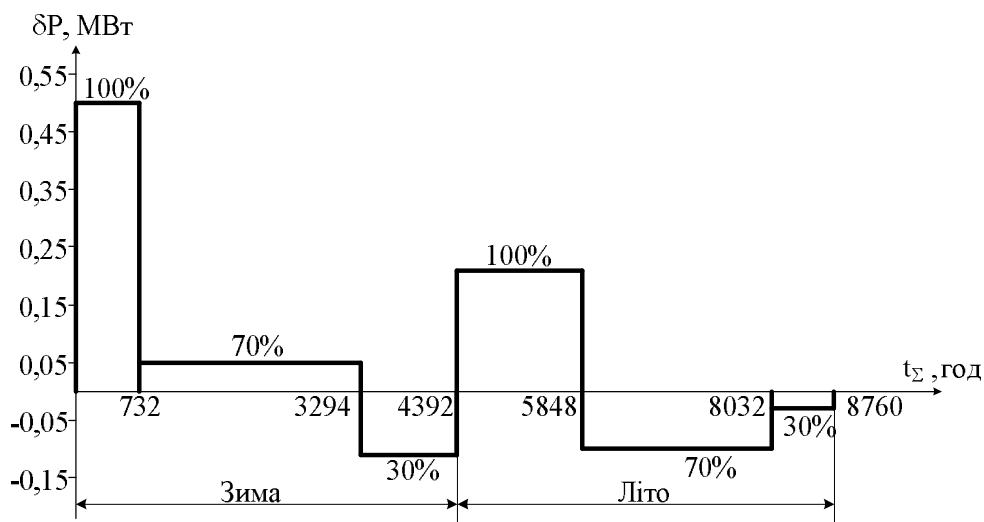


Рисунок 6 – Графік залежності різниці втрат електроенергії за рік при $\delta = 0,048$ рад

На рис. 6 ширина стовпчиків відповідає річній тривалості зменшень втрат електроенергії (відповідно до добового графіка навантажень) при зимовому та літньому режимах роботи електричної мережі. Висота стовпчика діаграми відповідає значенню економії потужності при використанні КТ. Від'ємні значення втрат потужності свідчать про необхідність вимкнення КТ. Інакше його використання в запропонованій вітці та з заданим δ замість зменшення втрат електроенергії призведе до їх зростання. Для визначення оптимального δ додаються всі різниці втрат енергії і отримуються зменшення втрат енергії за рік ($\Sigma\delta W$). З табл. 1 видно, що найбільше зменшення річних втрат електроенергії очікується, коли у вітку 11–10 встановлюється КТ з $\delta = 0,036$ рад.

Як впливає з результатів розрахунків, встановлення КТ значно поліпшує роботу електричної мережі, а саме, зменшуються втрати електроенергії, зменшується кількість перемикачів РПН трансформаторів, а в деяких випадках і взагалі їх не потрібно робити. Подібні розрахунки в роботі проведено для електричних мереж 750/330/110 кВ Південно-Західної електроенергетичної системи.

Таблиця 1 – Значення зменшення втрат енергії за рік

Оптимальний δ , рад	Зменшення втрат енергії, $\Sigma\delta W$, МВт·год
0,048	6657,6
0,036	<u>10687,2</u>
0,015	5869,2
0,030	5256,0
0,020	8847,6
0,010	4642,8

Визначені оптимальна вітка встановлення КТ в мережі 110 кВ і його оптимальне значення (вітка 825-826, підстанція Вінниця-750, $\delta=4$ ел.град.). При цьому річні втрати електроенергії зменшуються в мережі 110 кВ на 7,3 млн. кВт·год за рік. Якщо транзит мережею 750 кВ збільшується на 500–1000 МВт, то втрати в мережі 110 кВ значно збільшуються і встановлення КТ дозволяє зменшити втрати майже на 10 млн. кВт·год за рік.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі наведено нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі зменшення додаткових втрат електроенергії, викликаних неоднорідністю паралельно працюючих магістральних і розподільних електричних мереж, шляхом компенсації взаємовпливу їх режимів з використанням крос-трансформаторів, що встановлені в розподільних мережах.

1. Проведено аналіз існуючих методів та засобів зменшення втрат потужності в розподільних електричних мережах як прояву впливу магістральних електричних мереж на режим розподільних електричних мереж через їх неоднорідність та показано доцільність досліджень можливості використання крос-трансформаторних технологій для компенсації неоднорідності шляхом перерозподілу потоків потужності між магістральними та розподільними мережами.

2. Встановлено залежність втрат потужності, зумовлених взаємними і транзитними перетоками між магістральними електричними мережами та розподільними електричними мережами, від зміни коефіцієнта трансформації крос-трансформатора в розподільній електричній мережі, що може бути використано для підвищення ефективності оптимального керування нормальними режимами магістральних електричних мереж та розподільних електричних мереж і зменшення в них додаткових втрат електроенергії.

3. Запропоновано метод визначення оптимальних місць встановлення крос-трансформатора в розподільних електричних мережах, який враховує неоднорідність паралельно працюючих електричних мереж, що дозволяє підвищити ефективність керування потоками потужності магістральних електричних мереж у вітках розподільних електричних мереж.

4. Вдосконалено метод визначення оптимальних значень реактивної складової коефіцієнтів трансформації трансформаторних зв'язків в розподільних електричних мережах шляхом врахування фазозсувного кута

крос-трансформаторів, що дозволяє керувати потоками потужності використовуючи ці коефіцієнти трансформації, для зменшення втрат потужності й електроенергії в розподільній мережі або, залежно від постановки задачі, в магістральних та розподільних електричних мережах.

5. Показано, що коли в розподільній електричній мережі встановлюється крос-трансформатор з нерегульованим кутом, а місце його розміщення і значення кута визначаються за типовими добовими графіками навантаження зими і літа, то можливі випадки як зменшення втрат потужності в мережі, так і їх збільшення. Щоб досягалось зменшення річних втрат електроенергії, то в останньому випадку крос-трансформатор має відключатись. Для цього в схемі підстанції така можливість повинна бути передбачена.

6. Вдосконалено схему адаптивної системи керування локальними САК розподільних електричних мереж з крос-трансформаторами. Розроблено алгоритми: формування законів оптимального керування локальної адаптивної САК нормальними режимами розподільних електричних мереж та керувальних впливів для окремих крос-трансформаторів з урахуванням впливу магістральних електричних мереж на розподільні електричні мережі; визначення місця розташування та оптимального коефіцієнта трансформації крос-трансформатора на етапі реконструкції розподільних електричних мереж.

7. Розроблені в дисертаційній роботі методи, моделі та алгоритми передано для дослідної експлуатації в Південно-Західну електроенергетичну систему та ПАТ «Вінницяобленерго» з метою вдосконалення процесу оптимізації режимів розподільних електричних мереж. Очікується, що використання результатів наукових досліджень дозволить визначити оптимальні параметри нормальних режимів розподільних електричних мереж і зменшити в них додаткові втрати електроенергії та більш ефективно керувати потоками електричної потужності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лежнюк П. Д. Автоматизація керування потоками потужності в ЕЕС з використанням крос-трансформаторів та подібності оптимальних режимів [Електронний ресурс] / П. Д. Лежнюк, Жан-П'єр Нгома, А. В. Килимчук // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2009. – №4. – С. 1–11. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1048>.

2. Лежнюк П. Д. Зменшення додаткових втрат електроенергії в електричних мережах, викликаних їх взаємовпливом / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – №5. – С. 48–52.

3. Лежнюк П. Д. Зменшення додаткових втрат електроенергії в неоднорідних електричних мережах / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – №5. – С. 194 – 201.

4. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування режимами електричних мереж для локальних САК з врахуванням системного ефекту / П. Д. Лежнюк,

О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – №5. – С. 110–113.

5. Kylymchuk A. Reduction of Additional Losses of Electric Energy in Parallel Operating Non-Uniform Electrical Grids Taking into Account Non-Uniformity and Sensitivity [Електронний ресурс] / A. Kylymchuk, P. Lezhnyuk, O. Rubanenko // International Journal of Energy Policy and Management. – 2015. – № 1(1). – Р. 1–5. – Режим доступу: <http://article.aascit.org/file/html/8950726.html>.

6. Лежнюк П. Д. Зменшення додаткових втрат електроенергії в електричних мережах за допомогою крос-трансформаторів / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – №3. – С. 7–14.

7. Lezhniuk P. Optimal control of mutual impact of electric grids for the reduction of their electric energy losses / P. Lezhniuk, O. Rubanenko, A. Kylymchuk // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/8(70). – С. 4–11.

8. Kylymchuk A. Reduction of additional losses of electric energy in parallel operating non-uniform electrical grids / A. Kylymchuk, P. Lezhnyuk, O. Rubanenko // Nauka I Studia. – 2015. – NR 5 (136) 2015. – Р. 43–50.

9. Килимчук А. В. Компенсація взаємовпливу неоднорідних електричних мереж з використанням лінійних регуляторів / А. В. Килимчук // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: Х Міжнарод. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів: матеріали конференції. – Кременчук, 2012. – С. 340–341.

10. Рубаненко О. Є. Крос-технології як засіб оптимізації потоків потужності в електричних мережах / О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: IV Міжнарод. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – Луцьк, 2012. – С. 119–122.

11. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування режимами електричних мереж для локальних САК з врахуванням системного ефекту / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів: I Міжнарод. наук.-техн. конф. викладачів, аспірантів і студентів: матеріали конференції. – Донецьк, 2013. – С. 156–157.

12. Рубаненко О. Є. Оптимальне керування режимами електричних мереж локальними САК з врахуванням системного ефекту [Електронний ресурс] / О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук, А. В. Зла-Шелест // Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2013): II Міжнарод. наук.-техн. конф.: тези доповіді. – Вінниця, 2013. – С. 88. – Режим доступу http://conf.vntu.edu.ua/energo/2013/tezy_dopov_okey-2013.pdf.

13. Лежнюк П. Д. Зменшення додаткових втрат електроенергії в електричних мережах за допомогою лінійних регуляторів / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Електротехнічні системи, електрифікація й автоматизація в агропромисловому комплексі: Перша всеукраїнська наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – Вінниця, 2014. – С. 54–56.

14. Лежнюк П. Д. Оптимальное управление нормальными режимами электроэнергетической системы / П. Д. Лежнюк, А. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Naukowa przestrzen Europy – 2014: X Міжнарод. наук.-практ. конф., технічні науки: матеріали конференції. – Перемишль, Nauka i studia, 2014. – № 35. – С. 62–66.

15. Лежнюк П. Д. Зменшення додаткових втрат електроенергії в електричних мережах за допомогою крос-трансформаторів / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: V Міжнарод. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – Луцьк, 2014. – С. 136–137.

16. Лежнюк П. Д. Визначення чутливості втрат активної потужності в ЕЕС до параметрів та місця розташування крос-трансформаторів / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014): XII Міжнарод. конф.: тези доповіді. – Вінниця, 2014. – С. 139.

17. Килимчук А. В. Зменшення загальносистемних втрат активної потужності в неоднорідних електричних мережах з врахуванням неоднорідності та чутливості фазо-зсувних трансформаторів / А. В. Килимчук, П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко // Моніторинг енерго- та ресурсовикористання в складних виробничих системах: I всеукраїнський наук. семінар: матеріали конференції. – Луцьк, 2015. – С. 55–58.

18. Пат. 68719 Україна, МПК H02J3/24. Спосіб компенсації взаємовпливу неоднорідних електричних мереж / Лежнюк П. Д., Килимчук А. В.; заявник і патентоутримувач Вінницький національний технічний університет; заявл. 12.09.11; опубл. 10.04.12, Бюл. № 7. – 4 с.

19. Пат. 70914 Україна, МПК H02J3/24. Спосіб компенсації взаємовпливу неоднорідних електричних мереж / Лежнюк П. Д., Килимчук А. В.; заявник і патентоутримувач Вінницький національний технічний університет; заявл. 26.12.11; опубл. 25.06.12, Бюл. № 12. – 4 с.

АНОТАЦІЯ

Килимчук А.В. Компенсація взаємовпливу неоднорідних електричних мереж з використанням лінійних регуляторів. – 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, 2015.

Дисертацію присвячено проблемі підвищення ефективності роботи мереж енергопостачальних компаній шляхом оптимального керування потоками потужності, фазозсувними кутами та напругою в електричних мережах з використанням трансформаторів з РПН та крос-трансформаторів. Встановлено залежність втрат потужності, зумовлених взаємними і транзитними перетоками між магістральними електричними мережами та розподільними мережами, від зміни коефіцієнта трансформації крос-трансформатора, розміщеного в розподільній електричній мережі. Розроблено метод визначення раціонального

місця приєднання крос-трансформатора в розподільній електричній мережі та оптимального значення його кута, на який зсувається вектор напруги. Метод оснований на компенсації неоднорідності паралельно працюючих електричних мереж.

Ключові слова: вплив магістральних електричних мереж на розподільні, неоднорідність, додаткові втрати електроенергії, крос-технології, оптимальне керування.

ABSTRACT

Kylymchuk A.V. Compensation of the mutual impact of the nonuniform electric grids using linear regulators. – A manuscript.

A thesis for scientific degree of Candidate of Science (Engineering) in speciality 05.14.02 – Electric Power Stations, Grids and Systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2015.

The thesis is devoted to the solution of the problem of improving the operating efficiency of the electric grids of the energy supply companies by means of the optimal control of power flows, phase-shifting angles and voltages in the electric grids using transformers with top-charging and cross-transformers. The dependence of power losses, which are caused by mutual and transit flows between the main electric grids and distribution grids, on the change of transformation ratio of the cross-transformer located in the electric distribution grid has been determined. The method to determine the reasonable joining place for the cross-transformer in the electric distribution grid and the optimal value of the cross-transformer angle at which the voltage vector is moved has been developed. This method is based on the compensation of the nonuniformity of the electric grids working in parallel.

Keywords: the impact of the main electric grids on the distribution grids, nonuniformity, additional electric energy losses, cross-technology, optimal control.

АННОТАЦИЯ

Килимчук А.В. Компенсация взаимовлияния неоднородных электрических сетей с использованием линейных регуляторов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции, сети и системы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2015.

Исследование степени влияния взаимных и транзитных перетоков мощности на уровень потерь электроэнергии является актуальной задачей. Ее решение позволит контролировать и оценивать влияние перетоков мощности магистральных электрических сетей (МЭС) на дополнительные потери в распределительных сетях энергоснабжающих компаний, а также анализировать последствия взаимовлияния электрических сетей. Компенсация дополнительных потерь электроэнергии в электрических сетях, вызванных их взаимовлиянием, возможна путем введения в контуры ЭДС линейными регуляторами типа кросс-трансформаторов (КТ) и трансформаторами с РПН. То есть действие КТ и трансформаторных связей электроэнергетической системы (ЭЭС), которые

объединяют электрические сети разных напряжений в электрическую систему, направлены на уменьшение потерь электроэнергии при ее транспортировке в электрические сети путем перераспределения природных потоков электрической мощности и принудительного приближения их к потокораспределению в однородной электрической сети.

Объектом исследования диссертационной работы являются процессы оптимального управления нормальными режимами электрических сетей, а предметом исследования – методы и средства компенсации взаимовлияния МЭС на распределительные сети.

Научная новизна исследования заключается в том, что показана возможность и эффективность компенсации негативного влияния магистральных сетей на распределительные сети линейными регуляторами, установленными на подстанциях распределительных сетей. В частности: впервые установлена зависимость потерь мощности, обусловленных взаимными и транзитными перетоками между МЭС и распределительными электрическими сетями (РЭС), от изменения коэффициента трансформации КТ установленного в РЭС, что может быть использовано для уменьшения в них дополнительных потерь электроэнергии, вызванных транзитными перетоками мощности; впервые предложен метод определения оптимальных мест присоединения КТ в РЭС, основанный на компенсации неоднородности параллельно работающих электрических сетей, что позволяет повысить эффективность управления токами нагрузок МЭС в ветках РЭС; усовершенствован метод определения оптимального значения комплексной составляющей коэффициентов трансформации трансформаторных связей в РЭС с КТ, которые используются в оптимальном управлении потоками мощности.

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что: усовершенствована двухконтурная схема адаптивной системы управления локальными системами автоматического управления, регулирующими устройствами РЭС с целью адаптации к использованию КТ; разработаны алгоритмы формирования законов оптимального управления локальной адаптивной системы автоматического управления нормальными режимами РЭС и управляющих воздействий для отдельных КТ с учетом взаимовлияния нагрузок МЭС на РЭС; разработан алгоритм определения местоположения и оптимального коэффициента трансформации КТ на этапе реконструкции РЭС; результаты научных исследований реализованы в форме алгоритма и программы определения потерь мощности от взаимных и транзитных перетоков мощности в РЭС, а также в форме алгоритма и программы формирования законов оптимального управления и управляющих воздействий локальной адаптивной системы автоматического управления транзитными и взаимными перетоками в РЭС; полученные в диссертационной работе результаты научных исследований внедрены в учебном процессе Винницкого национального технического университета и в ПАО "Винницаоблэнерго" с целью совершенствования процесса оптимизации режимов РЭС.

В первом разделе диссертационной работы исследуются различные

методы уменьшения потерь в электрических сетях, средства оптимального управления потоками мощности и напряжения в ЕЭС, а также места установок фазосдвигающих трансформаторов в электрических сетях для уменьшения потерь мощности.

Во втором разделе разработана математическая модель для выделения из суммарных потерь мощности в РЭМ потерь от приведенных транзитных перетоков. Представлено математическое моделирование процесса оптимального управления токораспределения в электрических сетях с КТ. Определение оптимального места установки КТ с помощью общесистемного показателя неоднородности. Формирование законов оптимального управления режимами электрических сетей для локальных САУ с учетом системного эффекта. А также чувствительность потерь электроэнергии от углов КТ.

В третьем разделе рассматривается практическая реализация методов оценки и анализа взаимовлияния неоднородных электрических сетей различной балансовой принадлежности с использованием КТ и трансформаторов с РПН в сетях энергоснабжающих компаний. Усовершенствовано программно-аппаратный комплекс САУ режимами электрических сетей с трансформаторами с РПН и КТ с целью адаптации его для управления потоками мощности в РЭС, причиной которых есть неоднородность магистральных и распределительных сетей. Для этого разработаны алгоритмы и программы определения потерь в отдельных ветках электрической сети и оптимального управления дополнительными потерями мощности. Разработан алгоритм и программа определения оптимальной ветки размещения КТ и определение оптимального значения его угла.

В четвертом разделе представлена практическая реализация оптимального управления потоками мощности для компенсации взаимовлияния электрических сетей с использованием разработанных математических моделей и алгоритмов.

Ключевые слова: влияние магистральных электрических сетей на распределительные, неоднородность, дополнительные потери электроэнергии, кросс-технологии, оптимальное управление.

Підписано до друку 14.09.2015 р. Формат 29,7 × 42 ¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2015-087
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-87-38