

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

На правах рукопису

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
Рубаненко Олександр Євгенійович
кандидат технічних наук, доцент

Вінниця – 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПРОБЛЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ ВЗАЄМОВПЛИВУ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ.....	15
1.1 Втрати активної потужності в електричних мережах енергосистем та методи їх зменшення.....	16
1.2 Засоби оптимального керування потоками потужності та напругою в ЕЕС.....	22
1.3 Встановлення ФЗТ в електричних мережах для зменшення втрат потужності.....	31
1.3.1 Визначення місця встановлення ФЗТ.....	31
1.3.2 Проблеми реалізації оптимальних режимів електричних мереж енергопостачальних компаній.....	34
1.4 Висновки до розділу 1. Постановки задачі на дослідження.....	35
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НА ВТРАТИ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ДЛЯ ЇХ КОМПЕНСАЦІЇ.....	37
2.1 Вихідні положення.....	37
2.2 Математичне моделювання оптимальних потоків потужності в електричних мережах з врахуванням взаємовпливу їх режимів.....	39
2.2.1 Можливі задачі оптимального керування потоками потужності в паралельно працюючих мережах.....	39
2.2.2 Математична модель для виділення з сумарних втрат в електричній мережі НН втрат від наведених транзитних перетоків	41
2.2.3 Математичне моделювання процесу оптимального керування струморозподілом в електричних мережах з КТ.....	44

2.3 Компенсація негативного впливу режимів електричних мереж засобами коригування поточкорозподілу.....	52
2.4 Формування законів оптимального керування режимами електричних мереж для локальних САК з врахуванням системного ефекту.....	54
2.5 Чутливість втрат електроенергії до кутів КТ.....	59
2.6 Висновки до розділу 2.....	64
РОЗДІЛ 3 АЛГОРИТМИ ТА СТРУКТУРА СИСТЕМИ	
КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ПОТУЖНОСТІ ТА НАПРУГОЮ	
В ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	66
3.1 Вихідні положення.....	66
3.2 Алгоритм визначення втрат потужності у вітках електричної мережі.....	68
3.3 Алгоритми визначення оптимальної вітки встановлення КТ та його оптимального кута.....	71
3.4 Алгоритм оптимального керування додатковими втратами потужності від взаємовпливу електричних мереж.....	79
3.5 Розробка структурної схеми двоконтурної САК нормальними режимами електричних мереж.....	82
3.6 Висновки до розділу 3.....	88
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО	
КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ	
ВЗАЄМОВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	89
4.1 Вихідні положення.....	89
4.2 Визначення оптимального місця встановлення КТ на прикладі тестової схеми мережі IEEE 230/138 кВ.....	91
4.2.1 Визначення оптимального місця встановлення КТ за мінімумом втрат потужності.....	91

4.2.2 Визначення оптимального кута КТ та вплив його на втрати електроенергії.....	103
4.3 Вплив КТ на втрати потужності від транзитних перетоків на прикладі фрагменту схеми 110–750 кВ ПЗЕС.....	107
4.4 Дослідження впливу КТ на перетікання потужностей у вітках РЕМ та МЕМ.....	114
4.5 Висновки до розділу 4.....	118
ВИСНОВКИ.....	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	122
ДОДАТОК А Розрахунок оптимального режиму мережі IEEE 230/138	136
ДОДАТОК Б Контури тестової схеми мережі IEEE 230/138 кВ.....	153
ДОДАТОК В Залежності втрат потужності електричної мережі від номера трансформаторних віток.....	154
ДОДАТОК Г Результати досліджень усталеного режиму при регулюванні оптимальними РПН та кутами КТ для зимового та літнього графіка навантаження.....	162
ДОДАТОК Д Знаходження узагальнених показників неоднорідності віток електричної мережі та побудова характеристики міри впливу параметрів окремих віток на значення неоднорідності ТС IEEE 230/138 кВ.....	181
ДОДАТОК Е Знаходження узагальнених показників неоднорідності електричної мережі та побудова характеристики міри впливу параметрів віток на значення неоднорідності фрагменту схеми 110-750 кВ	187
ДОДАТОК Ж Початкові дані для фрагменту схеми електричної мережі 110-750 кВ Південно-Західної ЕЕС	193
ДОДАТОК И Режим максимального навантаження.....	201
ДОДАТОК К Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	203

ВСТУП

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 [1-3]. Разом з тим режими функціонування цих мереж встановлюються відповідно до 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) [4-7]. Наслідком цього є додаткові втрати електроенергії, а також перевантаження ЛЕП НН та комутаційних апаратів.

Відомо, що електрична мережа всієї України з весни до осені працює за ремонтною схемою, це пояснюється плановими чищеннями трас, реконструкціями та замінами опор та ЛЕП службою ліній, плановими ремонтами та замінами високовольтного обладнання службою підстанцій, плановими та післяаварійними перевірками пристроїв

релейного захисту та автоматики службою релейного захисту та автоматики та ін. Варто згадати, що істотний вплив на техніко-економічні показники експлуатації мереж ЕЕС справляє масове старіння об'єктів електричної мережі. В цілому в мережах 110–750 кВ підлягає реконструкції майже 40% ЛЕП та біля 60% обладнання, що встановлене на діючих підстанціях зазначених класів напруги [8–10].

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 можливі шляхом введення в контури електрорушійної сили лінійними регуляторами (ЛР) типу крос-трансформаторів (КТ) [11–13] 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 [14, 15].

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 потоками 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 регулювальних пристроїв, формуються з використанням теорії подібності.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що показано 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 для дослідної експлуатації у Південно-Західній електроенергетичній системі (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 [80] – проведення оптимізації поточкорозподілу активної потужності за допомогою КТ на прикладі фрагменту схеми Південно-Західної ЕЕС; у [14, 72, 73,] – метод визначення місця встановлення ВДТ (КТ) в мережі НН за результатами аналізу чутливості, експериментальна частина, висновки; у [82, 90, 92] – закони оптимального керування трансформаторами з РПН та КТ з урахуванням зведення параметрів електричної мережі до напруги базисного вузла; у [71] – 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 [69, 70] – алгоритми визначення оптимальної вітки розташування КТ і поперечної складової його коефіцієнта трансформації, експериментальна частина; у [81] – визначення шляхів зменшення втрат електроенергії, викликаних неоднорідністю магістральних і розподільних електричних мереж, за рахунок компенсації взаємовпливу їх режимів з використанням лінійних регуляторів; у [15] – оцінювання ефективності використання крос-технологій; у [43] – обговорені шляхи зменшення додаткових втрат електроенергії; у [89] – методи оптимального керування нормальними режимами електричних мереж з використанням КТ; у [44] – обґрунтування доцільності використання КТ для зменшення додаткових втрат електроенергії; у [96] – визначення чутливості втрат активної потужності в електричній мережі до параметрів та місця розташування КТ; у [97] – визначення оптимального місця встановлення ФЗТ за узагальненим показником неоднорідності; у [83] – визначення оптимального місця встановлення 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 [84] –

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 енерго- та 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Власюк В. Реформування ринку електроенергетики в Україні: відокремлення видів діяльності [Електронний ресурс] / В. Власюк, І. Кузь // Право і громадське суспільство. – 2014. – № 1. – С. 232-237. – Режим доступу: <http://lcslaw.knu.ua/2014-1.pdf>
2. Кириленко О. В. Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови / О. В. Кириленко, А. В. Праховник // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск. – Київ, 2010. – С. 10 – 16.
3. Анастасьєва Л. Економіка після Майдану. Контакти закисли. На якому етапі в Україні застрягла реформа ринку електроенергії [Електронний ресурс] / Л. Анастасьєва // Українська правда економічна правда. – 2015. – Режим доступу: <http://www.epravda.com.ua/publications/2015/07/22/551791/>.
4. Сулейманов В. М. Электрические сети и системы / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – К. : НТУУ «КПІ», 2008. — 456 с.
5. Terzija V. Wide-Area Monitoring, Protection and Control of Future Electric Power Networks / V. Terzija, V. Valverde, G. Deyu Cai, P. Regulski, V. Madani, J. Fitch, S. Skok, M. M. Becovic, A. Phadce // Proceedings of the IEEE. – 2011. – Vol. 99, Issue 1. – P. 80–93.
6. Jakushokas, R. Power Network Optimization Based on Link Breaking Methodology / R. Jakushokas, E. G. Friedman // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2013. – Vol. 21, Issue 5. – P. 983–987.
7. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей / Василий Григорьевич Холмский.– М. : Высшая школа, 1975.–280 с.

8. Энергетична стратегія України на період до 2035 року (Біла книга Енергетичної політики України «Безпека та конкурентоспроможність») [Електронний ресурс] / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. – Київ, 2014. – 40 с. – Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>.

9. Кузнецов В. Г. Підвищення надійності та ефективності магістральних електричних мереж [Електронний ресурс] / В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. – К. : ІЕД НАНУ, 2009. – Вип. 23. – С. 110–117. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/63710/14-Kuznetsov.pdf?sequence=1>.

10. Чернецька Ю. В. Система моніторингу технічного стану розподільних електричних мереж [Електронний ресурс] / Ю. В. Чернецька, А. І. Замулко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 9(91). – С. 28–37. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/ecee_2011_9_6.pdf

11. Кулаков А. В. Кросс-трансформаторная технология оптимизации потоков передачи и распределения энергии в сетях 110-765 кВ и ее технико-экономическое обоснование [Електронний ресурс] / А. В. Кулаков, М. В. Ольшванг, Д. А. Савкин // VII Симпозиум: Электротехника 2010 год: Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии. Сб. докл. – М. : ВЭИ-ТРАВЕК, 2003. – С. 1–6. – Режим доступу: <http://mvo.ipc.ru/KrossTranTe/KrossTranTe.htm>.

12. Ольшванг М. В. Ступенчато регулируемые фазосдвигающие автотрансформаторы как средство оптимизации потокораспределения в электрических сетях / М. В. Ольшванг, Е. И. Остапенко, Г. А. Кузнецова, Е. К. Лоханин // IV Симпозиум: Электротехника 2010 год: Перспективные

виды электро-технического оборудования для передачи и распределения электроэнергии. Сб. докл. – М. : ВЭИ-ТРАВЕК, 1997. – С. 1–6.

13. Ольшванг М. В. Особенности кросс-трансформаторной технологии транспортирования энергии по сетям 110–765 кВ / М. В. Ольшванг // Электро. – 2004. – № 2. – С. 6–12.

14. 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.

15. 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–Шацкі озера, 2012. – С. 119–122.

16. Оржель О. Кілька міфів про енергетику [Електронний ресурс] / Оржель Олексій // Українська правда економічна правда. – 2014 – Режим доступу: <http://www.epravda.com.ua/columns/2014/12/17/513913/>.

17. Здановський В. Глобальні проблеми енергетики. Як нам їх розв'язати? [Електронний ресурс] // Володимир Здановський // zn.ua. – 2013 – Режим доступу: http://gazeta.dt.ua/energy_market/globalni-problemi-energetiki-yak-nam-yih-rozv-yazati-teplova-energetika-ukrayini-maye-buti-bezpechnoyu-.html.

18. Железко Ю. С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст] / Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. – М. : ЭНАС, 2003. – 280 с.

19. Таласов А. Г. Потери на транзит электроэнергии и их распределение между участниками энергообмена / А. Г. Таласов // Электрические станции. – 2002. – № 1. – С. 20–25.

20. Стогний Б. Определение транзитных потерь мощности во фрагментированных электрических сетях областных энергоснабжающих компаний / Б. Стогний, В. Павловский // Энергетическая политика Украины. – 2004. – № 5. – С. 60–65.

21. Добровольська Л. Н. Аналіз методів розподілу втрат потужності в електроенергетичних системах [Текст] / Л. Н. Добровольська, І. В. Ярошук // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 5. – С. 58-62.

22. Потребич А. А. Расчет потерь электроэнергии, возникающих вследствие ее транзита между энергокомпаниями / А. А. Потребич, Г. Н. Катренко // Энергетика и Электрификация. – 2004. – № 4. – С. 29–34.

23. Идельчик В. И. Электрические системы и сети / Виталий Исаакович Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

24. Лежнюк П.Д. Додаткові втрати електроенергії в електричних мережах, що працюють паралельно / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін // Електроінформ. – 2006. – № 1. – С. 15–17.

25. Трач И. В. Оптимизация активных потерь и улучшение профиля напряжения в распределительных сетях / И. В. Трач // Электрические сети и системы. – 2014. – № 3. – С. 24–31.

26. Идельчик В. И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / Виталий Исаакович Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

27. Маркович И. М. Режимы энергетических систем / Исаак Моисеевич Маркович. – М. : Энергия. – 1969. – 352 с.

28. Потребич А. А. Методы расчета потерь энергии в питающих электрических сетях энергосистем / А. А. Потребич // Электричество. – 1995. – № 9. – С. 8–12.

29. Лежнюк П.Д. Определение и анализ потерь мощности от транзитных потоков в электрических сетях энергосистем методом линеаризации / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, А. Б. Бурыкин // Электрические сети и системы. – 2006. – № 1. – С. 5–11.

30. Лежнюк П. Д. Розподіл допусків на параметри регулюючих пристроїв в системі автоматичного керування режимом електроенергетичної системи / П. Д. Лежнюк, Н. В. Остра, Ю. В. Петрушенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 1. – С. 80 – 85.

31. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем / Г. В. Дружинин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.

32. Астахов Ю. Н. Применение критериального метода в электроэнергетике / Ю. Н. Астахов, П. Д. Лежнюк. – К. : УМК ВО, 1989. – 137 с.

33. Лежнюк П. Д. Оцінка якості оптимального керування критеріальним методом / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар: моногр. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 107 с.

34. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування нормальними режимами електроенергетичних систем критеріальним методом з використанням нейро нечіткого моделювання / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 127 – 130.

35. Пентегов И. В. Лагранжиан электрической цепи с сосредоточенными параметрами и его применение / И. В. Пентегов, И. В. Волков // Электричество. – 1969. – № 5. – С. 59–63.

36. Лежнюк П. Д. Принцип найменшої дії в задачах оптимізації електроенергетичних систем / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, В. В. Нетребський // Технічна електродинаміка. – 2006. – № 3. – С. 35–41.

37. Лежнюк П.Д. Оптимальне керування нормальними режимами електроенергетичних систем критеріальним методом з застосуванням нейронечіткого моделювання : Монографія / П.Д. Лежнюк, О.О. Рубаненко – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012. – 136 с.

38. Рубаненко О. О. Розв'язання двоїстої задачі оптимального керування нормальними режимами ЕЕС з застосуванням нейро-нечіткого моделювання / О. Ю. Петрушенко, Ю. В. Петрушенко, О. О. Рубаненко // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С.26–27.

39. Лежнюк П. Д. Чутливість втрат потужності в електроенергетичних системах до зміни транзитних перетікань [Електронний ресурс] / П. Д. Лежнюк, О. Б. Бурикін, В. О. Лесько // Наукові праці ВНТУ – 2008. – № 1. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1323>.

40. Кравцов К. І. Формування умов оптимальності нормальних режимів електроенергетичних систем засобами автоматичного керування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.02 “Електричні станції, мережі та системи” / К. І Кравцов. – Вінниця, 2005. – 20 с.

41. Бурикін О. Б. Взаємовплив електричних мереж електроенергетичної системи в процесі оптимального керування їх режимами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.02 “Електричні станції, мережі та системи” / О. Б. Бурикін. – Вінниця, 2007. – 20 с.

42. Лежнюк П. Д. Регулювання напруги в електричних системах / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар. – 2-е вид. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 171 с.

43. 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.

44. Лежнюк П. Д. Зменшення додаткових втрат електроенергії в електричних мережах за допомогою крос-трансформаторів [Текст] / 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 – Шацькі озера, Україна, 2014. – С. 136–137.

45. Аристов К. В. Опыт применения линейных управляемых шунтирующих реакторов. Возможные проблемы и пути их решения / К. В. Аристов, А. Г. Долгополов, Д. В. Кондратенко, Ю. В. Соколов // Электро. – 2012. – № 4 – С. 37–44.

46. Кузнецов В. Н. Определение параметров схемы замещения автотрансформаторов и ВДТ, включаемых для продольно-поперечного регулирования напряжения и снижения потерь / В. Н. Кузнецов, Н. Д. Кузнецов // Электрические станции. – 1992. – № 1 – С. 17-22.

47. Холмский В. Г. Применение регулируемых трансформаторов в электрических сетях / Василий Григорьевич Холмский. – М. : Госэнергоиздат, 1950. – 151 с.

48. Воротницкий В. Э. Методика и программа оценки эффективности применения РПН и АРПН в замкнутых электрических сетях / В. Э. Воротницкий, П. Д. Лежнюк, И. А. Серова // Электрические станции. – 1992. – № 1. – С. 60–66.

49. Tirupathi Reddy Application of Phase Shifting Transformer in Indian Power System / Tirupathi Reddy, Aruna Gulati, M. I. Khan, Ramesh Koul // International Journal of Computer and Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 4, № 2. – P. 242 -245.

50. Carlos Grande-Moran Phase-shifting Transformer Modeling in PSS®E [Electronic resource] / Carlos Grande-Moran // Siemens Energy, Inc., Power Technology – 2012. – P. 1–7. – Mode of access: World Wide Web:

http://ewh.ieee.org/soc/pes/newyork/NewSite/PDFs/Protection%20Related/Phase_Shifting_Transformer_Modeling.pdf.

51. Verboomen J. Influence of phase shifting transformers and HVDC on power system losses / J. Verboomen, W. L. Kling, D. van Hertem, S. Cole, R. Belmans // IEEE Power Engineering Society General Meeting 2007. – 2007. – P. 1–8.

52. W. L. Kling Phase shifting transformers installed in the Netherlands in order to increase available international transmission capacity [Electronic recourse] / W. L. Kling, D.A.M. Klaar // CIGRE Session. – 2004. – Paper C2 207. – Mode of access: World Wide Web: <http://www.transform.ru/articles/pdf/sigre/c2-207.pdf>.

53. Hurllet P. French experience in phase shifting transformers / P. Hurllet, J-C. Riboud, J. Margoloff, A. Tanguy // Cigre 2006. – 2006. – A2-204.

54. Bekaert D. How to increase cross border transmission capacity? A case study: Belgium / D. Bekaert, L. Meeus, D. Van Hertem, E. Delarue, B. Delvaux, G. Kupper, R. Belmans, W. D'haeseleer, K. Deketelaere, S. Proost, // Energy Market, 2009. EEM 2009. 6th International Conference on the European. – 2009. – P. 1–6.

55. Belvanis M. Use of phase-shifting transformers on the Transmission Network in Great Britain / M. Belvanis, K. R. W Bell // Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International. – 2010. – P. 1–5.

56. Jarman Paul The specification and application of large quadrature boosters to restrict post-fault power flows / Paul Jarman, Patrick Hynes, Trevor Bickley, Alan Darwin, Nigel Thomas // Cigre 2006. – A2-207.

57. Siddiqui A. S. Application of phase shifting transformer in Indian Network / A. S. Siddiqui, S. Khan, S. Ahsan, M. I. Khan, A. Annamalai // Green Technologies (ICGT), International Conference. – 2012. – P. 186–191.

58. Евдокунин Г. Фазоповоротный трансформатор впервые в СНГ применен в Казахстане [Электронный ресурс] / Г. Евдокунин, Р. Николаев,

А. Искаков, Б. Оспанов, Н. Утегулов // Новости электротехники – 2008. – № 6(48) 2008. – Режим доступа <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/48/06.php>.

59. Babu P. R. Operation and control of electrical distribution system with extra voltage to minimize the losses / P. R. Babu, B. Sushma // Power, Energy and Control (ICPEC), 2013 International Conference on. – 2013. – P. 165–169.

60. Marinakis A. Minimal Reduction of Unscheduled Flows for Security Restoration: Application to Phase Shifter Control / A. Marinakis, M. Glavic, T. Van Cutsem // IEEE Transactions on Power Systems. – 2010. – P. 506–515.

61. Mohsin Q. K. Iraq Network 400kV, 50Hz Interconnect with Iran, Turkey and Syria Using Phase-Shifting Transformers in Control and Limit Power Flow of Countries / Q. K. Mohsin, Xiangning Lin, Zhicheng Wang, O. Sunday, M. S. Khalid, Peiwen Zheng // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2014 IEEE PES Asia-Pacific. – 2014. – P. 1–6.

62. Bocovich M. Overview of series connected flexible AC transmission systems (FACTS) / M. Bocovich, K. Iyer, R. M. Terhaar, N. Mohan // North American Power Symposium (NAPS). – 2013. – P. 1–6.

63. Kolcun M. Transformer use for active power flow control in the electric power system / M. Kolcun, D. Hlubeň, L. Beňa, N. Djagarov, Z. Grozdev // Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010 9th International Conference on. – 2010. – P. 246–249.

64. Constantin C. Power flow control solutions in the Romanian power system under high wind generation conditions / C. Constantin, M. Eremia, L. Toma // PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble. – 2013. – P. 1–6.

65. El Hraiech A. Control of parallel EHV interconnection lines using Phase Shifting Transformers / El Hraiech A., Ben-Kilani K., Elleuch M. // Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), 2014 11th International. – 2014. – P. 1–7.

66. Ogahara R. Power Flow Adjustment Planning Using Phase Shifting Transformers for Long-Term Generation Outages [Electronic resource] /

R. Ogahara, Y. Kawaura, S. Iwamoto, N. Kamikawa, M. Namba // *Electrical Engineering in Japan*. – 2015. – Vol.192, Issue 2. – P. 12–21. – Mode of access: World Wide Web: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eej.22719/full>.

67. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 188 с.

68. Электрические системы и сети / Буслова Н. В., Винославский В. Н., Денисенко Г. И., Перхач В. С. – К. : Высшая школа, 1986. – 584 с.

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

70. 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.

71. Kylymchuk A. Reduction of Additional Losses of Electric Energy in Parallel Operating Non-Uniform Electrical Grids Taking into Account Non-Uniformity and Sensitivity [Electronic resource] / A. Kylymchuk, P. Lezhnyuk, O. Rubanenko // *International Journal of Energy Policy and Management*. – 2015. – № 1(1). – P. 1–5. – Mode of access: World Wide Web: <http://article.aascit.org/file/html/8950726.html>.

72. 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. – P. 43–50.

73. 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.

74. FACTS Modelling and Simulation in Power Networks / [Enrique Acha, Claudio R., Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles-Camacho]. – John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2004. – 420 p.

75. Кузнецов В. Г. Оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Кузнецов, Ю. И. Тугай, В. А. Баженов – К.: Наукова думка, 1992. – 216 с.

76. Лежнюк П. Д. Расчет токораспределения в электрической сети / П. Д. Лежнюк, Л. В. Ярных // Электричество. – 1982. – № 8. – С. 10–14.

77. Лежнюк П. Д. Моделювання та формування умов самооптимізації режимів електроенергетичної системи / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, К. І. Кравцов // Технічна електродинаміка / Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки, ч.3. – 2002. – С. 96–101.

78. Лежнюк П. Д. Моделирование и компенсация влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, Д. И. Оболонский // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 2–8.

79. Оболонский Д. И. Разработка на основе критериального метода алгоритмов решения задач оперативного управления нормальными режимами электрической системы: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.14.02 “Электрические станции, сети и системы” / Д. И. Оболонский. – М.: МЭИ, 1990. – 18 с.

80. 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> – ISSN 1681-7893.

81. Килимчук А. В. Компенсація взаємовпливу неоднорідних електричних мереж з використанням лінійних регуляторів /

А. В. Килимчук // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: X Міжнарод. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів: матеріали конференції. – Кременчук, 2012. – С. 340–341.

82. 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.

83. 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.

84. 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.

85. Астахов Ю. Н. Определение оптимальных режимов электрических сетей / Ю. Н. Астахов, П. Д. Лежнюк, В. И. Нагул, Л. В. Ярных // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1983. – № 1. – С. 48–59

86. Лежнюк П. Д. Автоматизация управления потоками мощности в электрических системах на основе критериального метода / П. Д. Лежнюк // В кн.: Сборник комплексов электротехнического оборудования высоковольтной, преобразовательной, силовой и полупроводниковой техники. Тез. докл. Всеросс. научн.-техн. конф. – М. : Гос. научн. центр РФ, ВЭИ. – 1994. – С. 339-341.

87. Лежнюк П. Д. Автоматизация управления режимом электрических сетей на основе критериального метода / П. Д. Лежнюк // В кн.: Микропроцессорные системы управления электроэнергетическими объектами. Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф., ч. 1. – К. : ИЭД АН УССР, 1990. – С.178-182.

88. Лежнюк П. Д. Подобие и расчет оптимального токораспределения в электрических сетях / П. Д. Лежнюк, Л. Р. Пауткина // Изв. вузов. Энергетика. – 1989. – № 2. – С. 51–53.

89. Лежнюк П. Д. Оптимальное управление нормальными режимами электроэнергетической системы [Текст] / 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.

90. Лежнюк П. Д. Оптимальное управление режимами электрических сетей для локальных САК с учетом системного эффекта / 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.

91. Методика по оценке эффективности применения трансформаторов с РПН и автоматического регулирования напряжения в замкнутых электрических сетях / [Воротницкий В. Э., Лежнюк П. Д., Серова И. А., Стан В. В.]. – М. : СПО Союзтехэнерго, 1990. – 36 с. – (РД 34.46.504-90).

92. Рубаненко О. Є. Оптимальное управление режимами электрических сетей локальными САК с учетом системного эффекта [Электронный ресурс] / О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук, А. В. Зла-Шелест // Оптимальное управление электроустановками (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.

93. Розенвассер Е. Н. Чувствительность систем управления / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов. – М.: Наука, 1981. – 464 с.

94. Горнштейн В. М. Методы оптимизации режимов энергосистем / В. М. Горнштейн, Б. П. Мирошниченко, А. В. Пономаренко – М.: Энергия, 1981. – 336 с.

95. Розенвассер Е. Н. Чувствительность систем автоматического управления / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов – Л. : Энергия, 1969. – 208 с.

96. 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.

97. 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.

98. Ледин С. С. Развитие промышленных стандартов внутри- и межсистемного обмена данными интеллектуальных энергетических систем / С. С. Ледин, А. В. Игнатичев // Автоматизация и IT в энергетике. – 2010. – № 10(15). – С. 39–43.

99. Goel Nidhi Smart grid networks: A state of the art review / Goel Nidhi, Agarwal, Megha // International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC). – 2015. – P. 122–126. – ISBN: 978-1-4799-6760-5.

100. Boustani Arash Optimal resource allocation in Cognitive Smart Grid Networks / Boustani Arash, Jadliwala Murtuza, Kwon, Hyuck M., Alamatsaz Navid // Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2015 12th Annual IEEE. – 2014. – P. 499–506.