

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

На правах рукопису

**Малогулко Юлія Володимирівна**

УДК 621.316.1: 313.322

**ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ  
ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ**

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.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ.....	15
1.1 Проблеми формування інтелектуальних електричних мереж, відповідно до концепції Smart Grid.....	15
1.1.1 Принципи функціонування локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії в концепції Smart Grid.....	17
1.1.2 Стандартизація функціонування інтелектуальних локальних енергосистем при їх інтеграції в системи централізованого живлення.....	20
1.2. Порівняльний аналіз задач оптимізації розподільних електричних мереж з ВДЕ.....	24
1.3 Задачі оптимізації функціонування відновлюваних джерел енергії в локальних електричних системах.....	26
1.4 Дослідження методів оптимізації функціонування відновлюваних джерел енергії в локальних електричних системах.....	30
1.4.1 Оптимальна реконфігурація локальної електричної системи....	30
1.4.2 Математична модель реконфігурації локальної електричної системи.....	31
1.4.3 Метод простого перебору віток при оптимальній реконфігурації локальної електричної системи.....	32
1.4.4 Модель реконфігурації електричної мережі на основі розрахунку оптимального поточкорозподілу.....	33
1.4.5 Розширена модель реконфігурації електричної мережі на основі розрахунку моделі оптимального поточкорозподілу.....	34
1.4.6 Комплексний підхід до реконфігурації електричної мережі.....	34
1.5 Висновки по розділу 1. Постановка задач дослідження.....	36
РОЗДІЛ 2 ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМ ПРИЄДНАННЯ ТА РЕЖИМІВ	

ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ.....	38
2.1 Задача визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ у локальній електричній системі за комплексним критерієм.....	39
2.1.1 Метод визначення оптимальної встановленої потужності відновлюваних джерел енергії в локальній електричній системі.....	39
2.1.2 Метод оптимізації добових режимів генерування відновлюваних джерел енергії в локальній електричній системі.....	41
2.1.3 Оцінювання імовірності забезпечення нормативного відхилення напруги для заданого звітного періоду.....	44
2.1.4 Оцінювання імовірності забезпечення нормативних втрат електроенергії та потужності.....	46
2.1.5 Визначення вагових коефіцієнтів рівнянь регресії комплексного критерію оптимальності функціонування локальної електричної системи	52
2.2 Метод визначення оптимального місця приєднання відновлюваних джерел енергії за критерієм мінімуму втрат потужності в локальних електричних системах.....	56
2.2.1 Математична модель для оцінювання чутливості втрат потужності в локальних електричних системах до змін потужності генерування відновлюваних джерел енергії.....	58
2.2.2 Коефіцієнти чутливості втрат потужності у вітках локальних електричних систем до зміни напруги у вузлах з відновлюваними джерелами енергії.....	61
2.3 Моделювання умов оптимальності конфігурації локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії за критерієм мінімуму втрат електроенергії.....	63
2.4 Висновки по розділу 2.....	68
РОЗДІЛ 3 АВТОМАТИЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ.....	70

3.1. Алгоритми практичної реалізації методів визначення оптимальної потужності відновлюваних джерел енергії в локальних електричних системах.....	71
3.1.1 Алгоритм визначення оптимальної встановленої потужності відновлюваних джерел енергії у локальній електричній системі за комплексним критерієм.....	71
3.1.2 Алгоритм оптимізації добових режимів генерування відновлюваних джерел відповідно до прогнозованого графіка навантажень за комплексним критерієм.....	74
3.2 Алгоритм визначення оптимального місця приєднання відновлюваних джерел енергії в локальних електричних системах.....	78
3.3 Оперативне керування схемами видачі потужності відновлюваних джерел енергії локальних електричних систем.....	81
3.3.1 Спосіб узгодження графіків генерування відновлюваних джерел енергії та споживачів енергії локальних електричних систем.....	81
3.3.2 Закон оптимального керування засобами реконфігурації схеми видачі потужності ВДЕ у локальних електричних системах.....	84
3.3.3 Алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою керування схемою видачі потужності ВДЕ у локальних електричних системах.....	86
3.3.4 Визначення меж зони нечутливості мікропроцесорного пристрою керування схемою видачі потужності відновлюваних джерел енергії на основі аналізу чутливості оптимальних рішень.....	89
3.4 Автоматизована система керування схемою видачі потужності відновлюваних джерел енергії в локальних електричних системах.....	91
3.4.1 Особливості апаратної реалізації автоматизованої системи керування схемою видачі потужності відновлюваних джерел енергії в локальних електричних системах.....	91
3.4.2 Дослідження функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією локальної електричної системи.....	94

3.5 Висновки по розділу 3.....	99
РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ.....	102
4.1 Дослідження ефективності застосування методу визначення оптимальної встановленої потужності відновлюваних джерел енергії за комплексним критерієм.....	103
4.1.1. Аналіз режимів роботи ЛЕС на прикладі електричних мереж 10 кВ Ямпільського району та Цекинівської сонячної електричної станції .....	103
4.1.2 Розрахунок ефективності використання встановленої потужності відновлюваних джерел енергії за комплексним критерієм в ЛЕС на прикладі Цекинівської сонячної електричної станції.....	108
4.1.3 Визначення оптимальної встановленої потужності відновлюваних джерел енергії за комплексним критерієм в ЛЕС на прикладі Цекинівської сонячної електричної станції №1.....	113
4.2 Результати дослідження ефективності застосування вдосконаленого методу визначення оптимальних місць приєднання відновлюваних джерел енергії в локальних електричних системах.....	114
4.3 Результати оптимізації добових режимів генерування відновлюваних джерел енергії та споживачів енергії в локальних електричних системах на прикладі Цекинівської сонячної електричної станції .....	118
4.4 Оцінка функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією локальної електричної системи.....	121
4.5 Висновки по розділу 4.....	127
ВИСНОВКИ.....	128
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	130
Додаток А Аналіз задач оптимізації розподільних електричних мереж.	144
Додаток Б Результати розрахунків з дослідження впливу Слобода- Бушанської СЕС на режими EM 10 кВ Ф-45 ПС «Михайлівка».....	149

Додаток В Файл вихідних даних для розрахунку режиму Ф-31 підстанції 110/10 кВ «Слобода-Підлісівська».....	151
Додаток Г Оцінка функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією локальної електричної системи.....	153
Додаток Д Довідки про впровадження результатів.....	156

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасні світові тенденції щодо децентралізації електропостачання споживачів, які пов'язані зі збільшенням вартості традиційних паливних ресурсів і проявляються у підвищенні частки розосередженого виробництва електроенергії за допомогою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), призводять до ускладнення планування режимів електроенергетичних систем (ЕЕС) та оперативного керування ними [1-3]. Крім того, поєднання означених вище процесів з реформуванням економіки енергетики – впровадженням системи двосторонніх договорів – фактично унеможлиблює організацію ефективного функціонування ЕЕС без вдосконалення їх інформаційної інфраструктури з поступовим переходом до концепції інтелектуальних електричних мереж (Smart Grid) [4-6].

Державна підтримка розбудови відновлюваної енергетики стимулює дослідження питань проектування та експлуатації ВДЕ з метою підвищення рівня енергетичної безпеки країни та зниження впливу енергетики на довкілля. Однак питаннями транспортування електроенергії виробленої ВДЕ та функціонування районних електричних мереж (РЕМ) у нових експлуатаційних умовах часто нехтують вже на етапі проектування ВДЕ та вибору місця їх приєднання до електричних мереж (ЕМ).

Недослідженість питань проектування та експлуатації ВДЕ в сучасних умовах, їх впливу на режими роботи електричних ЕМ, неузгодженість номінальних параметрів основного обладнання з потребами таких джерел, відсутність типових рішень стосовно засобів захисту та автоматизації процесу виробництва електроенергії не дозволяє приймати обґрунтовані проектні рішення під час їх розбудови, крім того, не дозволяє ефективно їх експлуатувати. [7–10]. Тому, актуальним є розвиток методичного, інформаційного і технічного забезпечення їх експлуатації. Важливим в цьому напрямку є комплексність та методологічна єдність в прийнятті рішень щодо покращення експлуатаційних характеристик ВДЕ при їх роботі в електричних

мережах.

Під час проектування схеми видачі електроенергії від джерела до кінцевого споживача постає необхідність узгодження їх роботи з енергосистемою, від якої здійснюється централізоване живлення. Така схема повинна відповідати як вимогам надійності, щоб забезпечити стабільну видачу електроенергії, так і забезпечити підключення джерела максимально наближено до центра споживання електроенергії, що дозволить забезпечити мінімум втрат електроенергії на її транспортування.

Таким чином, актуальну задачу оптимізації функціонування ВДЕ в локальних електричних системах можна розв'язувати як задачу проектування – для визначення оптимальної встановленої потужності, та як експлуатаційну задачу – для оптимізації добових режимів генерування відновлюваних джерел та схеми видачі електроенергії мережами локальних електричних систем з ВДЕ. Це дозволить підвищити прибутковість енергопостачальних та енергогенерувальних компаній за рахунок покращення експлуатаційних характеристик електрообладнання ЛЕС.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана згідно плану наукових досліджень, проведених кафедрою електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету за держбюджетними темами: «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізації їх живлення» (№ держреєстрації 0110U002161) та «Методи та засоби оптимізації сумісної роботи локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії та систем централізованого електропостачання» (№ держреєстрації 0113U003138). Автор брала участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

**Метою роботи** є підвищення ефективності функціонування відновлюваних джерел енергії в розподільних електричних мережах шляхом вдосконалення методів та засобів оптимізації транспортування виробленої електроенергії.



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

– дослідження та аналіз нормативних документів щодо функціонування відновлюваних джерел енергії у локальних електричних системах на основі концепції *Smart Grid*;

– аналіз відомих методів оптимізації функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії;

– розроблення методів визначення оптимальної встановленої потужності та оптимального місця приєднання відновлюваних джерел енергії у локальній електричній системі за комплексним критерієм оптимальності;

– розроблення методу оптимізації добових режимів генерування відновлюваних джерел відповідно до прогнозованого графіка навантажень локальної електричної системи;

– розроблення математичної моделі умов оптимальності конфігурації ЛЕС, а також способу та законів оптимального керування схемами видачі потужності відновлюваних джерел енергії;

– розроблення алгоритмів оптимізації встановленої потужності та місць приєднання ВДЕ у локальній електричній системі;

– розроблення алгоритму оптимізації добових режимів генерування ВДЕ відповідно до прогнозованого графіка навантажень ЛЕС;

– розроблення алгоритму оптимального керування засобами зміни конфігурації схем видачі електроенергії ВДЕ за критерієм мінімуму втрат електроенергії.

**Об'єктом дослідження** дисертаційної роботи є нормальні режими розподільних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, а **предметом дослідження** – методи і засоби оптимізації транспортування електроенергії у розподільних електричних мережах шляхом зміни схем приєднання відновлюваних джерел та оперативного керування режимами їх роботи.

**Методи дослідження.** Для розроблення методів визначення оптимальної встановленої потужності та оптимізації добових режимів генерування ВДЕ в

локальній електричній системі використані методи математичного моделювання та чисельні методи. Статистичні методи оброблення інформації використано для аналізу результатів розрахунків. Методи лінійного та нелінійного програмування застосовано для формування алгоритмів пошуку оптимальних розв'язків поставлених задач. Усталені режими моделюються та аналізуються з використанням методу вузлових напруг. Для розроблення алгоритмів і програм аналізу режимів ВДЕ та їх впливу на режими роботи ЛЕС, а також формування алгоритмів оптимізації транспортування електроенергії в ЛЕС використовувалися матрична алгебра, теорія графів, декомпозиція та об'єктно-орієнтований аналіз. Для розроблення структурних схем автоматизованих систем керування (АСК) ВДЕ було використано основні положення теорії автоматичного керування та теорії мікропроцесорних систем.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у тому, що:

- вперше запропоновано аналітичні умови оптимальності схем транспортування електроенергії в локальних електричних системах за критерієм мінімуму втрат електроенергії та розроблено закони оперативного керування засобами реконфігурації схем приєднання відновлюваних джерел енергії на базі концепції *Smart Grid*, що дозволяє узгоджувати використання керованих та умовно-керованих джерел;

- вперше розроблено метод оптимізації добових графіків роботи відновлюваних джерел енергії відповідно до прогнозованого графіка навантажень за комплексним критерієм оптимальності, що враховує показники якості та втрати електроенергії. Узгодження функціонування керованих й умовно-керованих джерел дозволяє отримувати максимальний прибуток від їх експлуатації за заданий період часу;

- вдосконалено метод визначення оптимальної встановленої потужності для заданого місця приєднання відновлюваного джерела енергії в локальній електричній системі, що проявляється у використанні комплексного критерію оптимальності, який враховує показники якості та втрати електроенергії й дозволяє підвищувати техніко-економічну ефективність функціонування

локальних електричних систем;

- отримав подальший розвиток метод визначення оптимального місця приєднання відновлюваного джерела енергії заданої потужності в локальній електричній системі за критерієм мінімуму втрат електроенергії, що проявляється у застосуванні коефіцієнтів розподілу втрат потужності для ранжування потенційних вузлів приєднання джерел та дозволяє отримати рішення, які забезпечують зменшення втрат електроенергії й підвищення її якості для множини ймовірних режимів електричних мереж.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність роботи полягає в тому, що на підставі виконаних досліджень, розв'язана задача оптимізації функціонування відновлюваних джерел енергії в локальних електричних системах, що полягає у виборі оптимальної конфігурації схем та параметрів приєднання ВДЕ, автоматизації керування їх функціонуванням в складі локальної електричної системи, дозволяє зменшувати собівартість й збільшувати обсяги виробленої електроенергії.

За результатами проведених теоретичних досліджень вдосконалено програмний комплекс аналізу втрат електроенергії та формування електроощадних заходів в розподільних електричних мережах «ВТРАТИ-10/0,4 (РДЕ)» у напрямку аналізу ефективності функціонування електромереж 10(6)-0,4 кВ з розосередженим генеруванням шляхом доповнення алгоритмами визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ, визначення оптимальних місць їх приєднання за критерієм мінімуму втрат потужності в розподільних електричних мережах.

Використовуючи отримані у роботі умови оптимальності, методи та алгоритми вдосконалено комплекс програм інтелектуальної підтримки дій диспетчера розподільних електричних мереж, який передано для дослідної експлуатації до ПАТ «Вінницяобленерго» (довідка про впровадження від 08.09.2014 р.). Під час дослідної експлуатації встановлено, що за рахунок прийняття обґрунтованих рішень щодо місць та параметрів приєднання відновлюваних джерел енергії до ЕМ 10 кВ з урахуванням технічних втрат

електроенергії та параметрів її якості, можна досягти зменшення втрат в окремих ЕМ на 5–10%, а також забезпечити нормативні відхилення напруги. Результати досліджень впроваджено в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету для підвищення якості лекційних та лабораторних занять (довідка про впровадження від 22.09.2014 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові положення, які є основним змістом дисертаційної роботи, розроблено та обґрунтовано здобувачем особисто. У роботах, що опубліковано у співавторстві, внесок автора наступний. В [11] показано переваги формування інтелектуальних електричних мереж, відповідно до концепції *Smart Grid*, використання яких дозволяє створити передумови для ефективної експлуатації ВДЕ. В [12] систематизовано досвід розв'язання задач оптимізації розподільних електричних мереж з ВДЕ розглянуті задачі та досліджено можливості застосування відомих підходів для оптимізації режимів ЛЕС, запропоновано цільову функцію для оптимізації режиму ЛЕС з ВДЕ, що дозволяє враховувати зміни втрат та якості електроенергії. В [13] запропоновано математичну модель оптимального розподілу активного та реактивного навантаження електричних мереж між ВДЕ та отримано метод формування перспективного плану розвитку електричних мереж з поетапним визначенням оптимальних місць приєднання ВДЕ. В [14] запропоновано метод визначення оптимальної потужності та місць приєднання ВДЕ до розподільних електричних мереж, що покладений в основу алгоритму програмного забезпечення систем керування їх режимами. В [15] запропоновано алгоритм визначення узагальненого показника ефективності експлуатації електричної мережі за критерієм мінімуму втрат електроенергії та алгоритм визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ. В [16] запропоновано спосіб визначення узагальнених показників ефективності проектних рішень щодо схеми транспортування електроенергії ВДЕ у ЛЕС. В [17] показано переваги розроблення єдиного стандарту, який би регламентував приєднання ВДЕ на паралельну роботу з електроенергетичною системою України, в контексті впровадження технологій концепції *Smart Grid*. В [18]

показано переваги розвитку інформаційної інфраструктури та інтелектуалізації систем керування з використанням *Smart Grid*. В [19] показано необхідність розроблення єдиного стандарту, який би регламентував приєднання ВДЕ на паралельну роботу з ЕЕС України. В [20] підтверджено ефективність методу узгодження графіків генерування ВДЕ з місцевим електроспоживанням шляхом оперативного керування режимами роботи розосередженого генерування без погіршення їх прибутковості.

**Апробація результатів дисертації.** Головні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися: на XXX науково-технічній конференції «Моделювання» (м. Київ, 2011 р.); на XII та XV Міжнародних науково-практичних конференціях «Відновлювальна енергетика XXI століття» (АР Крим, 2011 р., м. Київ, 2014 р.); на I та II Міжнародних науково-технічних конференціях «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2011, 2013 р.р.); на IV та V Міжнародних науково-технічних конференціях «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк – Шацькі озера, 2012, 2014 р.р.); на XII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Вінниця, 2012 р.); на XI Міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця, 2012 р.); на науково-технічних семінарах НАН України «Електричні мережі енергосистем з нетрадиційними і відновлюваними джерелами енергії», (м. Вінниця, 2013, 2014 р.р.); на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем – 2013» (м. Донецьк, 2013 р.); на VI міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (м. Київ, 2014 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 11 робіт, з них: 5 статей у наукових фахових виданнях, що включені до наукометричних баз даних, 4 статті у збірниках матеріалів міжнародних конференцій та дві статті в інших виданнях України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. R. W. Wies, R. A. Johnson, J. Aspnes. DESIGN OF AN ENERGY EFFICIENT STANDALONE DISTRIBUTED GENERATION SYSTEM EMPLOYING RENEWABLE ENERGY SOURCES AND SMART GRID TECHNOLOGY // Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting. – 2010. – P. 1-8.
2. Кириленко О. В., Трач І. В. Технічні особливості функціонування енергосистем при інтеграції джерел розподіленої генерації / О. В. Кириленко, І. В. Трач // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2009. – Вип. 24. – С. 3–7. – ISSN 1727-9895.
3. Тугай Ю.І. Інтеграція поновлюваних джерел енергії в розподільні електричні мережі сільських регіонів / Ю.І. Тугай, В.В. Козирський, О.В. Гай, В.М. Бодунов // Технічна електродинаміка.– 2011.– № 5. – С. 63-67.
4. Стогній Б.С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, С.П. Денисюк // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44–50.
5. NIST Releases Report on Smart Grid Development // National Institute of Standards and Technology (USA) – Recognized Standards for Inclusion In the Smart Grid Interoperability Standards Framework, Release 1.0 (електронний ресурс). Режим доступу: [http://collaborate.nist.gov/twiki-sggrid/bin/view/\\_SmartGridInterimRoadmap/InterimRoadmapFinal](http://collaborate.nist.gov/twiki-sggrid/bin/view/_SmartGridInterimRoadmap/InterimRoadmapFinal).
6. European Smart Grids Technology Platform // European Commission. Directorate-General for Research Sustainable Energy System, EUR 22040, 2006. – 44 p.
7. Sharat Ranjan. DECENTRALISED POWER GENERATION AND DISTRIBUTION // Proceedings of the Himalayan Small Hydropower Summit. – Dehradun, India. – 2006. – P. 147-155.
8. Taro Kondo, Jumpei Baba, Akihiko Yokoyama. VOLTAGE CONTROL

OF DISTRIBUTION NETWORK WITH A LARGE PENETRATION OF PHOTOVOLTAIC GENERATIONS USING FACTS DEVICES // IEEE Transactions on Power and Energy. – 2006. – Vol. 126. – № 3. – P. 347-358.

9. B. Mahdad, K. Srairi and T. Bouktir. OPTIMAL COORDINATION AND PENETRATION OF DISTRIBUTED GENERATION WITH SHUNT FACTS USING GA/FUZZY RULES // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2009. – Vol. 4. – № 1. – P. 1-12.

10. H. Hatta, S. Uemura and H. Kobayashi. COOPERATIVE CONTROL OF DISTRIBUTION SYSTEM WITH CUSTOMER EQUIPMENTS TO REDUCE REVERSE POWER FLOW FROM DISTRIBUTED GENERATION // Proceedings of IEEE Power&Energy Society General Meeting. – 2010. – P. 1-6.

11. Кулик В.В. Оптимальне керування розосередженими джерелами електроенергії з асинхронними генераторами засобами Smart Grid [Електронний ресурс] / В.В. Кулик, Т.Є. Магас, Ю.В. Малогулко // Наукові праці ВНТУ. Енергетика та електротехніка. – 2011. – №4. – С. 1-6. Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1404/999>. – ISSN 2307-5376.

12. Бурикін О.Б. Оптимізація режиму локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії [Текст] / О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка та електротехнології». – 2013. – №2. - Вип. 15 (338). – С. 42-46. – ISSN 2074-2630.

13. Кулик В.В. Оптимізація перетікань активної та реактивної потужностей у розподільних електромережах засобами розосередженого генерування [Текст] / В.В. Кулик, О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Вісник Вінницького політехнічного університету. Енергетика та електротехніка. – 2014. – №1. – С. 90-93. – ISSN: 1997-9274.

14. Рубаненко О.Є. Вдосконалення математичного забезпечення комп'ютерних систем оптимізації режимів локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії [Текст] / О.Є. Рубаненко, О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Науковий вісник Чернівецького університету. Серія

«Комп'ютерні системи та компоненти». – 2014. - №2 (5). – С. 85-93. – ISSN 2311-9276.

15. Лежнюк П.Д. Оптимізація функціонування розосереджених джерел енергії в локальних електричних системах. енергії [Текст] / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, Ю.В. Малогулко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2014. – №60 (1102). – С. 68-77. – ISSN 2079-4525.

16. Кулик В.В. Дослідження ефективності сумісної експлуатації локальних електричних мереж з ВДЕ та систем централізованого електропостачання [Текст] / В.В. Кулик, О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво». Електрифікація та автоматизація гірничих робіт». – 2014. – Вип. 25. – С. 113-120. – ISSN 2079-5688.

17. Бурикін О.Б. Стандартизація функціонування локальних енергосистем при їх інтеграції у системи централізованого живлення на базі концепції Smart Grid [Текст] / О.Б. Бурикін, Ю.В. Томашевський, Ю.В. Малогулко // Энергетика и электрификация. – 2012. - № 12. – С. 46-48. – ISSN 0424-9879.

18. Кулик В.В. Оптимальне керування відновлюваними джерелами електроенергії на підставі Smart Grid / В.В. Кулик, О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Відновлювана енергетика XXI століття: XII міжнарод. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – АР Крим: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2011.

19. Бурикін О.Б. Перспективи інтеграції розподілених джерел енергії у локальні енергосистеми на базі концепції Smart Grid / О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». IV міжнарод. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2012. – С. 37 – 40.

20. Бурикін О.Б. Спосіб узгодження графіків генерування сонячних



електростанцій та споживачів енергії локальних електричних систем / О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко, О.В. Нікіторович // Відновлювана енергетика XXI століття: XV міжнарод. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – Київ: Інститут відновлювальної енергетики НАН України, 2014. – С. 52-55.

21. Малогулко Ю.В. Ефективність сумісної експлуатації локальних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії / Ю.В. Малогулко // «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». V міжнарод. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2014. – С. 146-149.

22. European Smart Grid, 2011 [Online]. Available: <http://www.smartgrids.eu/>.

23. National Institute of Standards and Technology, Standards Identified for Inclusion in the Smart Grid Interoperability Standards Framework, Release 1.0, Sept. 2009, [Online]. Available: <http://www.nist.gov/smartgrid/standards.html>.

24. M. Uslar, S. Rohjans, R. Bleiker, J. González, M. Specht, T. Suding and T. Weidelt. SURVEY OF SMART GRID STANDARDIZATION STUDIES AND RECOMMENDATIONS // Proceedings of 2010 Innovative Smart Grid Technologies Conf. Europe (ISGT Europe), Gothenburg, Oct. 2010.

25. Electric Power Research Institute Tech. Rep. - THE SMART GRID INTEROPERABILITY STANDARDS ROADMAP. - Aug. 2009, [Online]. Available:[http://collaborate.nist.gov/twikisggrid/pub/SmartGridInterimRoadmap/InterimRoadmapFinal/Report\\_to\\_NIST1August10.pdf](http://collaborate.nist.gov/twikisggrid/pub/SmartGridInterimRoadmap/InterimRoadmapFinal/Report_to_NIST1August10.pdf)

26. Reed, G.F., Philip, P.A., Barchowsky, A., Lippert, C. J., Sparancino, A. - SAMPLE SURVEY OF SMART GRID APPROACHES AND TECHNOLOGY GAP ANALYSIS // Proceedings of 2010 Innovative Smart Grid Technologies Conf. Europe (ISGT Europe), pp. 1-8, Gothenburg, Oct. 2010.

27. IEC standard for Communication networks and systems for power utility automation –Part 90-1: Use of IEC 61850 for the communication between substations, IEC 61850-90-1, 1st ed., 2010.

28. IEC Standard for Instrument Transformers - Part 9: Digital Interface for

Instrument Transformers, IEC 61869-9, Part 13: Standalone Merging Unit, IEC 61869-9. - 2012.

29. P. Schaub, J. Haywood, D. Ingram, A. Kenwick, and G. Dusha, “Test and evaluation of non-conventional instrument transformers and sampled value process bus on Powerlink's transmission network”, in Proceedings of 2011 South East Asia Protection and Control Conference (SEAPAC 2011), CIGRE, Doltone House, Sydney, NSW, 2011.

30. IEC standard for Industrial communication networks - High availability automation networks - Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR), IEC 62439-3 Ed.1.0, Feb. - 2010.

31. K. Martin, “Synchrophasor Standards Development – IEEE C37.118 & IEC 61850”, in Proceedings of the 44th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii. - 2011.

32. IEEE Approved Draft Standard Profile for Use of IEEE Std. 1588 Precision Time Protocol in Power System Applications, IEEE C37.238, under construction. - 2011

33. IEEE standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE 1547. - 2003.

34. Постанова НКРЕ від 14.12.2005 № 1137 / Правила приєднання електроустановок до електричних мереж // . (електронний ресурс). Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z0042-06>.

35. Technische Richtlinie Erzeugungsanlagenam Mittelspannungsnetz. Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagenam Mittelspannungsnetz. Ausgabe Juni 2008. BDEW.

36. Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій потужністю 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж. Жовтень 2011. Mercados, EMI.

37. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

38. P. Lezhnyuk Optimal control of distributed sources of energy in the local electrical system / P. Lezhnyuk, V. Kulik, O. Kovalchuk // Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Collected works. Special Issue. Part 1. – 2011.– P. 48–55. – ISSN 1727-9895.

39. Walid El-Khattam, Kankar Bhattacharya, Yasser Hegazy and M. M. A. Salama, “Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a Competitive Electricity Market”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1674-1684, August 2004. Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems.

40. Andrew Keane, Mark O’Malley “Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 3, pp. 1640-1646, August 2005.

41. N. S. Rau and Y.-H. Wan, Optimum location of resources in distributed planning, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, pp. 2014-2020, Nov. 1994.

42. Caisheng Wang, M. Hashem Nehrir “An Analytical Method for DG Placements Considering Reliability Improvements”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 4, pp. 2068-2076, November 2004.

43. Hamid Falaghi, Mahmood-Reza Haghifam “ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems”, PowerTech, pp. 555-560, 2007.

44. Víctor H. Méndez Quezada, Juan Rivier Abbad, and Tomás Gómez San Román “Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation”, IEEE Transactions on power systems, vol. 21, no. 2, pp.533-540, May 2006.

45. Seyed Mohammad Hossein Nabavi, Somayeh Hajforoosh, Mohammad A.S. Masoum, “Placement and Sizing of Distributed Generation Units for Congestion Management and Improvement of Voltage Profile using Particle Swarm Optimization”, IEEE, 2011.

46. Andrew Keane, Luis (Nando) F. Ochoa, Eknath Vittal, Chris J. Dent, Gareth P. Harrison “Enhanced Utilization of Voltage Control Resources With

Distributed Generation” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 1, pp. 252-260, February 2011.

47. Nikhil K. Ardeshta, Badrul H. Chowdhury, “Supporting Islanded Microgrid Operations in the Presence of Intermittent Wind Generation”, IEEE, pp. 1-8, 2010.

48. C. L. T. Borges, and D. M. Falcao, Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement, International Journal of Power and Energy Systems, vol. 28, no. 6, pp. 413-420, July 2006.

49. Y. Alinejad-Beromi, M. Sedighzadeh, M. Sadighi “A Particle Swarm Optimization for Siting and Sizing of Distributed Generation in Distribution Network to Improve Voltage Profile and Reduce THD and Losses”.

50. Лежнюк П. Д. Оптимізація режиму розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами електроенергії / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, В. В. Кулик // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2011. – Вип. 11 (186). – С. 250–254. – ISSN 2074–2630.

51. Козирський В. В. Інтеграція поновлюваних джерел енергії в розподільні електричні мережі сільських регіонів / В. В. Козирський, Ю. І. Тугай, В. М. Бодунов, О. В. Гай // Технічна електродинаміка. – 2011. – №5. – С. 63–67. – ISSN 0204–3599.

52. Нікіторович О. В. Автоматизація малих ГЕС та підвищення ефективності їх експлуатації / Лежнюк П.Д., Нікіторович О.В., Кулик В.В.: матер. VIII Міжнар. конф. [“Відновлювальна енергетика XXI”], (Крим, 17-21 вересня 2007 р.). – Крим.: НАН України, Інститут відновлюваної енергетики, 2007. – С. 202-205.

53. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування розосередженими джерелами енергії в локальній електричній системі / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. Ч. 1. – 2011.– С. 48–55. – ISSN 1727-9895.

54. J.Z. Zhu Optimal reconfiguration of electrical distribution network / J.Z. Zhu / Optimization of power system operation // Institute of Electrical and Electronics Engineers. - 2009. - pp. 503-545.

55. Merlin and H. Back , “ Search for minimum - Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System ,” Proc. 5th Power System Computation Conference, Cambridge , 1975 Paper 1.2/6

56. D. Shirmohammadi and H.W. Hong , “ Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction , ” IEEE Trans. PWRD, Vol. 4 , No. 2 , 1989 , pp. 1492 – 1498 .

57. C.H. Castro , J.B. Bunchand , and T.M. Topka , “ Generalized Algorithms for distribution feeder deployment and sectionalizing ” , IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 99 . No. 2 . March/April 1980 , pp. 549 – 557 .

58. C.H. Castro and A.L.M. Franca , “ Automatic power distribution reconfiguration algorithm including operating constraints . ” IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems, Rio de Janeiro 1985 . pp. 181 – 186 .

59. M.E. Baran and F. Wu , “ Network Reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing . ” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4 , No. 2 , April 1989 , pp. 1401 – 1407 .

60. C.C. Liu , S.J. Lee , and S.S. Venkata , “ An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems ” , IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 3 , No. 2 , May 1988 , pp. 619 – 626.

61. Z. Zhu , X.F. Xiong , D. Hwang , and A. Sadjadpour , “ A comprehensive method for reconfiguration of electrical distribution network , ” IEEE/PES 2007 General Meeting, Tampa, USA, June 24 – 28 , 2007 .

62. J.Z. Zhu , Application of Network Flow Techniques to Power Systems. First Edition , WA : Tianya Press , Technology, Dec. 2005 .

63. D. Shirmohammadi and H.W. Hong , “ Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction , ” IEEE Trans.

PWRD, Vol. 4, No. 2 , 1989 , pp. 1492 – 1498 .

64. S.K. Goswami, “ A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization , ” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17 , No. 3, July, 1992 , pp. 1484 – 149 .

65. Mohammadi, M.T.Arab Yar, Faramarzi, M. “ PSO algorithm for sitting and sizing of distributed generation to improve voltage profile and decreasing power losses ”. - Electrical Power Distribution Networks (EPDC), 2012 p.p. 1-6.

66. Sharat Ranjan. DECENTRALISED POWER GENERATION AND DISTRIBUTION // Proceedings of the Himalayan Small Hydropower Summit. – Dehradun, India. – 2006. – P. 147-155.

67. Гордеев, В. И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей [Текст] / В. И. Гордеев. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 182 с.

68. Орлов, И. Н. Электротехнический справочник : в 3 т. Т. 3. В 2 кн. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии [Текст] / И. Н. Орлов. – М. : Энергоатомиздат, 1988. — 880 с.

69. Кулик, В. В. Ідентифікація коефіцієнта форми графіка групового навантаження для визначення втрат електроенергії в розподільних мережах [Текст] / В. В. Кулик, Д. С. Писляков // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2008. – Вип. № 18. – С. 92–95.

70. Грицюк, І.В. Компенсація реактивної потужності в локальній електричній системі [Текст] / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, І. В. Грицюк // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2011. – №3. – С. 32–33.

71. Ротштейн, А. П. Интеллектуальные технологии : нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные системы [Текст] / А. П. Ротштейн. – Винница : Універсум-Вінниця, 1999. – 320 с.

72. Ротштейн, А. П. Нечеткая надежность алгоритмических процессов [Текст] / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба. – Винница : Континент–ПРИМ. – 1997. – 141 с.

73. Бесекерский В. А. Системы автоматического управления с микро-ЭВМ / В. А. Бесекерский, В. В. Изранцев. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

74. Лежнюк П. Д. Оцінка взаємовпливу електричних мереж енергосистем з трансформаторними зв'язками / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін // Технічна електродинаміка: тематичний випуск: проблеми сучасної електротехніки, ч. 7. – 2006. – С. 27–30.

75. Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.06.2013 N 399 / Про Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання // (електронний ресурс). Режим доступу: [http://www.leonorm.com/p/NL\\_DOC/UA/201301/Nak399.htm](http://www.leonorm.com/p/NL_DOC/UA/201301/Nak399.htm).

76. Гнатієнко Г. М. Експертні технології прийняття рішень : монографія / Г. М. Гнатієнко, В. Є. Снитюк. - К. - 2008. - 444 с.

77. Белов В.В. и др. Теория графов: учебное пособие для вузов.- М.: „Высшая школа”. - 1976. – 392 с.

78. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. - М.: Финансы и статистика. - 1981.

79. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. - М.: Финансы и статистика. - 1983.

80. Літнарівч Р.М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу [Текст] / Літнарівч Р.М. // Навчальний посібник. - Рівне. -2011. - 70 с.

81. Постанова НКРЕ від 31.07.1996. - N 28. / Про затвердження Правил користування електричною енергією // (електронний ресурс). Режим доступу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z0417-96>.

82. Постанова НКРЕ від 28.09.2000. - N 1038. /Порядок визначення плати за транспортування електричної енергії власного виробництва при постачанні електроенергії за нерегульованим тарифом // (електронний ресурс). Режим доступу: [http://www.uazakon.com/documents/date\\_61/pg\\_gegwxw.htm](http://www.uazakon.com/documents/date_61/pg_gegwxw.htm).

83. Лежнюк П. Д. Оптимізація режимів електричних мереж з малими ГЕС в умовах адресного електропостачання / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін, О. А. Ковальчук // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 3. – 2010. – С. 31–34. – ISSN 0204–3599.

84. Стогний Б. Определение транзитных потерь мощности в фрагментированных электрических сетях областных энергоснабжающих компаний / Стогний Б., Павловский В. // Энергетическая политика Украины. – 2004. – №5. – С. 26–31.

85. Лежнюк П. Д. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 123 с.

86. Лежнюк П. Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом: моногр. / Лежнюк П. Д. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2003. – 131 с.

87. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / [О. Н. Войтов, Н. И. Воропай, А. З. Гамм и др.]. – Новосибирск: Наука, 1999. – 250 с.

88. Лежнюк П. Д. Оцінка чутливості втрат потужності в електричних мережах: монографія / П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько. – Вінниця, ВНТУ, 2010. — 120 с.

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

90. Дончев А. Системы оптимального управления: Возмущения приближения и анализ чувствительности /Дончев А. – М.: Мир, 1987. – 156 с.

91. Проектирование систем электроснабжения АПК. Книга 1. Современная концепция: Учебное пособие Кудряков Александр Георгиевич, Сазыкин Василий Георгиевич Scientific magazine "Kontser, 3 окт. 2014 г. – 248 с.

92. Voevodyn V.V. Matrytsy y vychyslenyya / V.V. Voevodyn, YU.A.



Kuznetsov.– М.: Nauka, 1984.– 320 p.

93. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. — К. : Техника, 1985. — 104 с.

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

95. Лежнюк П.Д., Кравцов К.І., Видмиш В.А. Аналіз чутливості математичних моделей і розподіл допусків на параметри критеріальним методом // Проблемы создания новых машин и технологий. (Научные труды Кременчугского государственного политехнического института). – 2000. – №1(8) – С. 304 – 307.

96. Лежнюк П.Д., Острая Н.В. Решение обратной задачи чувствительности и распределения допусков на параметры критеріальним методом // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. - №3. – С 34-36.

97. Методы оптимизации режимов энергосистем / В. М. Горнштейн, Б. П. Мирошниченко, А. В. Пономарев и др. – М.: Энергоиздат, 1981. – 336 с.

98. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1986. - 288 с.

99. Лежнюк П.Д., Оболонський Д.І., Аль-Омарі Закарія, Кравцов К.І. Апроксимація неявно виражених критеріїв оптимальності електричної системи позиномом // Вісник Вінницького політехн. ін-ту. – 1994. – №4. – С. 35 – 37.

100. Petro Lezhnuk, Eugene Didichenko, Konstantin Kravtsov. Optimal control of power flows in electric power systems using theory of similarity // Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on “Development and application systems” (DAS – 2000). – Suceava, Romania: “MUSATINII”, 2000. – P. 10–15.

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

102. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Применение критеріального метода

в електроенергетиці. - Київ: УМК ВО. - 1989. - 137 с.

103. J. Conejo, J. M. Arroyo, N. Alguacil, and A.L. Guijarro, "Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms," *Power Systems, IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, P. 571–576, Aug. 2002.

104. С. М. Неділько Система показників і критеріїв для формалізації процесів забезпечення функціональної стійкості систем управління повітряним рухом. Інформаційні технології управління. с. 102-105

105. ГКД 34.48.151-2003 (електронний ресурс). Режим доступу: <http://eom.com.ua/index.php?action=downloads;sa=view;down=2298>.