

Вінницький національний технічний університет

На правах рукопису

ГУНЬКО ІРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 621.316.1

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ
З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ
З ВИКОРИСТАННЯМ SMART GRID ТЕХНОЛОГІЙ**

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
Лежнюк Петро Дем'янович
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2017

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 4 |
| ВСТУП..... | 5 |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ | 11 |
| 1.1 Сучасні локальні електричні системи як об'єкт керування | 11 |
| 1.2 Характеристика джерел живлення в ЛЕС | 19 |
| 1.3 Аналіз стану обладнання локальних електричних систем | 30 |
| 1.3.1 Дослідження пошкоджуваності повітряних та кабельних ЛЕП в ЛЕС..... | 31 |
| 1.3.2 Дослідження пошкоджуваності трансформаторних підстанцій та розподільних пунктів | 37 |
| 1.3.3 Відмови в роботі електрообладнання споживачів ЛЕС, викликаних РДЕ | 38 |
| 1.4 Висновки до розділу 1. Постановка задач дослідження..... | 39 |
| РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РІЗНОТИПНИХ РДЕ НА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, РЕЖИМИ ТА ВТРАТИ В РЕМ | 42 |
| 2.1 Моделі розподільних електричних мереж з пошкоджуваним високовольтним обладнанням | 42 |
| 2.2 Визначення місць секціонування в РЕМ з ВДЕ | 53 |
| 2.2.1 Визначення місць секціонування в РЕМ з умов надійності | 54 |
| 2.2.2 Визначення оптимальних за втратами електроенергії місць потокорозділу в РЕМ з ВДЕ | 57 |
| 2.3 Визначення зон нечутливості відхилень оптимальних точок потокорозділу до потужності навантаження і генерування РДЕ | 60 |
| 2.4 Висновки до розділу 2..... | 65 |
| РОЗДІЛ 3 АЛГОРИТМИ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РОЗПОДІЛЕНОГО ГЕНЕРУВАННЯ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛОКАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ І ФОРМУВАННЯ УМОВ ОПТИМАЛЬНОСТІ ЇЇ РЕЖИМІВ | 67 |

| | |
|---|-----|
| 3.1 Оптимізація схеми РЕМ з РДЕ з урахуванням зміни місця секціонування | 67 |
| 3.1.1 Секціонування РЕМ з РДЕ з урахуванням вимог надійності..... | 67 |
| 3.1.2 Визначення місця секціонування РЕМ за мінімальними втратами і в залежності від генерування РДЕ..... | 77 |
| 3.2 Алгоритм визначення потужності ГЕС в задачі коригування потоків потужності в РЕМ у відповідності до оптимальної точки поточкорозподілу..... | 82 |
| 3.3 Алгоритм визначення зони нечутливості втрат потужності до генерування РДЕ в ЛЕС | 85 |
| 3.4 Висновки до розділу 3..... | 95 |
| РОЗДІЛ 4. ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОЗПОДІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ВДЕ..... | 97 |
| 4.1 Розрахунок впливу потужності РДЕ на точку поточкорозділу і на втрати потужності в РЕМ | 97 |
| 4.2 Ефект від встановлення реклоузера в точці поточкорозділу РЕМ | 103 |
| 4.3 Моделювання режимів роботи РЕМ в <i>PS CAD</i> | 105 |
| 4.4 Програмне забезпечення для визначення раціонального місця секціонування електричної мережі з РДЕ | 111 |
| 4.5 Програмне забезпечення для визначення оптимальної потужності генерування РДЕ в секціонованій ЛЕС..... | 115 |
| 4.6 Інформаційний обмін та керування СЕС в ЛЕС | 117 |
| 4.7 Структурна схема автоматизованої системи керування потужністю генерування ГЕС | 120 |
| 4.8. Висновки до розділу 4 | 123 |
| ВИСНОВКИ | 125 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 128 |
| Додаток А. <i>PQ</i> та <i>U/f</i> контролери..... | 142 |
| Додаток Б. Визначення контурних струмів | 146 |
| Додаток В. Визначення зони нечутливості для АСК | 149 |
| Додаток Г. Розрахунок втрат активної потужності в <i>Mathcad</i> | 155 |
| Додаток Д. Код програми «Секціонування розподільних мереж з ВДЕ»..... | 161 |
| Додаток Е. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи | 175 |

ВСТУП

Актуальність теми. Розподільні електричні мережі функціонально були призначені для транспортування і розподілення електроенергії, виробленої централізовано на великих електростанціях. З розбудовою в них нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) вони набувають рис локальної електроенергетичної системи (ЛЕС). В зв'язку з цим виникають нові задачі: узгодження графіків навантаження споживачів і генерування ВДЕ з врахуванням їх нестабільності, оптимальне керування потоками потужності з метою зменшення втрат електроенергії і покращення її якості, забезпечення балансової надійності електроенергії в ЛЕС, що формується централізованим і місцевим генеруванням, тощо.

Особливістю розподіленого генерування є те, що воно складається з відносно невеликих за потужністю електричних станцій, розосереджених по всій електроенергетичній системі (ЕЕС), але сконцентрованих в більшості в розподільних електричних мережах (РЕМ). В основному, це електростанції, які використовують відновлювані джерела електричної енергії. Це сонячні (СЕС), вітрові (ВЕС) електростанції та малі гідроелектростанції, генерування яких є нестабільним, оскільки залежить від природних умов. Вони постачають електроенергію найближчим споживачам, а в разі надлишків енергії можуть її передавати в мережі централізованого електропостачання. Отже, розподільні мережі енергопостачальних компаній мають забезпечувати перетікання електроенергії від розподільних підстанцій до споживачів, а також від розосереджених в них джерел електроенергії (РДЕ) через підстанції до ЕЕС.

На сьогодні актуальним є оптимальне інтегрування ВДЕ в електричні мережі енергосистем. Створення сприятливих умов для розбудови ВДЕ вимагає розв'язання низки технічних та організаційних задач. Ними активно займаються в Інституті електродинаміки НАНУ [1–4], Інституті відновлюваної енергетики НАНУ [5–7], НТУУ «Київський політехнічний

інститут» [8–11], Вінницькому національному технічному університеті (ВНТУ) [12–15], Національному університеті біоресурсів та природокористування [16, 17], Київському національному університеті технологій і дизайну [18, 19] та інших [20–22].

Серед багатьох інших, до таких задач відноситься узгодження місць оптимального секціонування РЕМ, які експлуатуються як радіальні. Введення в них електростанцій, які використовують ВДЕ, переводить частину ліній електропередачі в режим роботи з двостороннім живленням.

Це змінює поточкорозподіл в мережі, що може призвести до збільшення втрат електроенергії в ній, якщо не оптимізувати місця під'єднання РДЕ та їх потужність. Для зменшення втрат електроенергії під час її транспортування також необхідно коригувати потоки потужності, що відповідають місцям секціонування РЕМ, які раніше були вибрані тільки з умов забезпечення нормативів по надійності електропостачання. Тому оптимізація потоків потужності в ЛЕС з ВДЕ є актуальним завданням, покликаним забезпечити зменшення втрат електроенергії в електричних мережах, підтримувати балансну надійність і покращити якість електропостачання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконана в плані наукових досліджень, проведених кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ за держбюджетними темами: «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізації їх живлення» (№ держреєстрації 0110U002161) та «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського» (№ держреєстрації 0113U003138). Автор брала участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

Метою роботи є зменшення втрат електроенергії в локальних електричних системах шляхом узгодженого керування генеруванням сонячними електростанціями та малими гідроелектростанціями.

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

- аналіз особливостей експлуатації локальних електричних систем;
- дослідження пошкоджуваності обладнання локальних електричних систем та впливу СЕС на ці пошкодження;
- розроблення математичної моделі втрат активної потужності в ЛЕС з ГЕС та СЕС для дослідження впливу останніх на режим електричних мереж та умови, за яких втрати в них мінімальні;
- розроблення методу коригування поточкорозподілу в ЛЕС з різнотипними РДЕ шляхом зміни генерування потужності ГЕС для зменшення втрат електроенергії;
- подальший розвиток методу визначення раціонального місця секціонування електричної мережі ЛЕС з врахуванням технічного стану електрообладнання;
- розроблення комп'ютерної моделі ЛЕС у програмному забезпеченні *PS CAD* з декількома СЕС для дослідження усталених та перехідних процесів в ЛЕС з інверторами, які працюють за III законами керування;
- розроблення алгоритму визначення оптимальної ГЕС в ЛЕС та генерованої нею потужності з метою коригування поточної точки поточкорозділу в місце фактичного розташування комутаційного апарату секціонування ЛЕС;
- розроблення алгоритму визначення зони нечутливості втрат активної потужності в ЛЕП до поточної потужності ГЕС;
- вдосконалення автоматизованої системи керування (АСК) ВДЕ в ЛЕС з застосуванням *Smart Grid* технологій.

Об'єктом дослідження є локальні електричні системи з сонячними електростанціями та малими гідроелектростанціями, а **предметом дослідження** – методи та засоби оптимального керування потоками потужності в розподільній електричній мережі з урахуванням її секціонування.

Методи досліджень. Для аналізу та розв'язання поставлених задач використані статистичні методи обробки даних, узагальнювальні методи теорії подібності і моделювання, лінійного та нелінійного програмування. Усталені режими моделюються та аналізуються на базі методу вузлових напруг. Для розроблення алгоритмів і програм аналізу режимів РДЕ та їх впливу на режими роботи ЛЕС використовувалися матрична алгебра, декомпозиція та об'єктно-орієнтований аналіз. Для вдосконалення АСК РДЕ використано положення теорії автоматичного керування та теорії мікропроцесорних систем.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

– вперше розроблено метод коригування потоками потужності в локальній електричній системі з різнотипними відновлюваними джерелами електроенергії шляхом оптимального керування потужністю генерування малих гідроелектростанцій, що дозволяє визначити умови для наближення поточкорозподілу в секціонованій електричній мережі до оптимального за втратами електроенергії в ній;

– розвинуто математичну модель локальної електричної системи з сонячними електростанціями і гідроелектростанціями для оцінювання впливу останніх на втрати активної потужності в розподільній електричній мережі, що дозволяє визначити зони нечутливості систем автоматичного керування джерел живлення і встановити порядок коригування ними поточкорозподілу в електричній мережі;

– отримав подальший розвиток метод визначення раціонального місця секціонування розподільних електричних мереж, який дозволяє оцінити і врахувати неможливість транспортування потужності розосереджених джерел генерування в разі пошкоджень в електричній мережі та дозволяє визначити техніко-економічний ефект від встановлення додаткових комутаційних апаратів секціонування мережі.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблено алгоритми і програми коригування

потоків потужності в секціонованій за умов надійності розподільній електричній мережі, шляхом зміни генерування потужності керованих РДЕ, в першу чергу малих гідроелектростанцій і, в перспективі, сонячних електростанцій. Відповідним чином вдосконалено структурну схему автоматизованої системи керування станціями, які використовують ВДЕ, що дозволяє узгоджувати графіки видачі потужності та її споживання.

На основі отриманих у роботі результатів – умов оптимальності, методів та алгоритмів, вдосконалено комплекс програм інтелектуальної підтримки роботи диспетчера розподільних електричних мереж, який передано для дослідної експлуатації до ПАТ «Вінницяобленерго» (акт впровадження від 28.10.2016 р.). Результати роботи впроваджено також у навчальний процес Вінницького національного технічного університету (акт впровадження від 1.11.2016 р.).

Особистий внесок здобувача. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [23] – подальший розвиток методу обчислення допусків зони нечутливості ГЕС; в [24, 27, 34] – моделювання нормальних режимів ЛЕС в *PS CAD*; в [25] – вибір точки поточкорозділу за найменшою вузловою напругою; в [26] – визначення вузлових напруг та втрат активної потужності методами матричної алгебри, з урахування потужностей генерованих різнотипними РДЕ; в [28] – метод визначення економічної доцільності встановлення комутаційного апарату секціонування мережі ЛЕС; в [29] – визначення впливу потужності генерування РДЕ на поточкорозподіл та втрати активної потужності в ЛЕС; в [30] – використання коефіцієнту співвідношення потужності генерування центра живлення до потужності генерування кожною СЕС; в [32, 33] – аналіз методів визначення планового значення технічних втрат потужності та використання цього значення (нормативу) в умовах неповноти початкових даних; в [35] – метод коригування потоками потужності в ЛЕС з різнотипними ВДЕ; в [36] – врахування потужності генерування ВДЕ під час секціонування розподільної

електричної мережі; в [31, 37, 38] – аналіз технічного стану обладнання ЛЕС та врахування його під час оптимального керування режимами ЕЕС.

Апробація результатів дисертації. Головні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися: на науково-технічному семінарі “Електричні мережі енергосистем з нетрадиційними і відновлювальними джерелами енергії” НАН України «Наукові основи електроенергетики» (м. Вінниця 2014, 2015, 2016 р.р.); на XVII міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2016 р.); на III міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками ОКЕУ-2015» (м. Вінниця, 2015 р.); на XII міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця, 2014, 2016 рр.); на V і VI міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк, 2014, 2016 рр.); на міжнародній науково–практичній конференції «Розподільчі мережі 0,4–35 кВ як складова частина локальних електроенергетичних систем майбутнього» (м. Хмельницький, 2016 р.); на X міжнародній науково-практичній конференції «*Moderní vymoženosti vědy – 2014*». (м. Прага, Чехія, 2014 р.); на V міжнародній науково-технічній конференції «Земля України – потенціал продовольчої, енергетичної та екологічної безпеки держави» (м. Вінниця, 2016 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 16 наукових праць: 7 статей у фахових наукових виданнях, які входять до переліку ДАК, стаття в періодичному іноземному виданні, 7 в інших виданнях, патент України на корисну модель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кириленко О. В. Технічні особливості функціонування енергосистем при інтеграції джерел розподіленої генерації [Текст] / О. В. Кириленко, І. В. Трач // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2009. – Вип. 24. – С. 3–7. – ISSN 1727-9895.
2. Тугай Ю. І. Інтеграція поновлюваних джерел енергії в розподільні електричні мережі сільських регіонів [Текст] / Ю. І. Тугай, В. В. Козирський, О. В. Гай, В. М. Бодунов // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 5. – С. 63–67. – ISSN 1607-7970.
3. Стогній Б. С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення [Текст] / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44–50. – ISSN 1607-7970.
4. Стогній Б.С. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні [Текст] / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка.– 2011. – № 5 – С. 52–67. – ISSN 1607-7970.
5. Кузнецов М. П. Гарантовані рівні участі ВЕС у покритті потужності енергосистеми [Текст] // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 1 (40). – С. 43–47. – ISSN 1919 - 8058.
6. Васько П. Ф. Актуальные вопросы развития малой гидроэнергетики в Украине на современном этапе [Текст] / П. Ф. Васько, Ю. А. Вихорев // Відновлювана енергетика. – 2012. – № 3 (30). – С. 60 – 65. – ISSN 1919 - 8058.
7. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії [Текст] / С. О. Кудря . – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с. – ISBN 978-966-622-521-7.
8. Кузнецов В. Г. Оптимизация режимов электрических сетей [Текст] / В. Г. Кузнецов, Ю. И. Тугай, В. А. Баженов. – К. : Наукова думка, 1992. – 216 с. – ISBN 512-002-958-4.

9. Яндутьський О. С. Оптимальне регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелом розосередженого генерування з урахуванням їх належності одному власнику при використанні резерву активної потужності [Текст] / О. С. Яндутьський, Г. О. Труніна, А. Б. Нестерко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2015. – № 2/91. – С.50 – 54. – ISSN 1995-0519.

10. Баженов В. А. Використання методів лінійного програмування для оптимізації розвитку електричних мереж сучасних енергосистем/ В. А. Баженов [Текст] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2 – С. 93–96. – ISSN 1997-9266.

11. Денисюк С. П. Особенности анализа влияния помех от разнородных типов источников распределенной генерации на процессы в нагрузках [Текст]/ С. П. Денисюк, Д. Г. Деревянко, К. Ю. Щербань // Журнал инженерных наук. – 2014. – № 2. – С. 1–7. – ISSN 2312-2498.

12. Лежнюк П.Д. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах : монографія [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 204 с. – ISBN 978-966-641-577-9.

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

14. Лежнюк П. Д. Автоматизація оптимального керування відновлюваними джерелами енергії в електричних мережах [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, В. В. Кулик // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2010. – С. 131–134. – ISSN 1727-9895.

15. Лежнюк П. Д. Оптимізація функціонування розосереджених джерел енергії в локальних електричних системах [Текст] / П. Д. Лежнюк,

О. Є. Рубаненко, Ю. В. Малогулко // Вісник національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - 2014. - № 60. - С.68–77. - ISSN 2224-0349 .

16. Козырский В. В. Подход к определению мест размещения секционных коммутационных аппаратов [Текст] / В. В. Козырский, Б. В. Кузьменко, А. В. Гай // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2005. – № 1. – С. 32–44.

17. Козирський В. В. Вибір оптимальної кількості секціонуючих пристроїв для розподільних мереж напругою 10 кВ [Текст] / В. В. Козирський, О. В. Гай // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. — № 2. – С. 12–20.

18. Каплун В. В. Умовний динамічний тариф як критерій ефективності функціонування мікроенергетичних систем локальних об'єктів [Текст] / В. В. Каплун // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2016.– № 3 (98).–С. 50–57. – ISSN 1813-6796.

19. Каплун В. В. Аналіз методів оптимізації мікроенергетичних систем (*MicroGrid*) на основі джерел розподіленої генерації [Текст] / В. В. Каплун, О. П. Кравченко, В. В. Василенко, С. С. Макаревич, Р.В. Каплун // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2015.– № 2 (84).– С. 5–17. – ISSN 1813-6796.

20. *Ngamroo I. Robust coordinated control of electrolyzer and PSS for stabilization of microgrid based on PID-based mixed H_2/H_∞ control* [Текст] / I. Ngamro // *Renewable Energy* .– 2012. – №. 45. – С.16–23.

21. *Dall'Anese E. Distributed optimal power flow smart microgrids* / E. Dall'Anese, H. Zhu, G. Giannakis [Текст] // *IEEE Transaction on power electronics*. – 2013. – № 3 – С. 1464-1475. – DOI: 10.1109/TSG.2013.2248175

22. *Enslin J. Harmonic Interaction Between a Large Number of Distributed Power Inverters and the Distribution Network* [Текст] / J. Enslin, P. Heskes //

IEEE Transaction on power electronics. – 2004. – № 6. – С.1586-1593. – DOI: 10.1109/PESC.2003.1217719.

23. Лежнюк П. Д. Оптимізація потужності гідроелектростанцій в локальній електричній системі з урахуванням чутливості втрат потужності в ній [Текст] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько, О. Є. Рубаненко, О. І. Казьмірук // *Sciences of Europe. Technical science (Praha)*. – 2016. – №. 6 (6) – С. 28-38.

24. Лежнюк П. Д. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько // *Енергетика: економіка технології, екологія*. – 2015. – № 3(51). – С.7–13. – ISSN 1813-5420.

25. Лежнюк П. Д. Вплив розосереджених джерел енергії на оптимальний потокорозподіл в електричних мережах [Текст] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2016. – № 18 (1190). – С. 86-91. – ISSN 2224-0349.

26. Лежнюк П. Д. Дослідження впливу ВДЕ та секціонування на режими роботи локальних електричних систем [Електронний ресурс] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. – 2016. – № 2. – ISSN 2307 – 5376.

Режим доступу: praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/470.

27. Лежнюк П.Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І.О. Гунько // *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 134–145. – ISSN 2307-5732.

28. Лежнюк П. Д. Оптимізація секціонування в локальних електричних мережах з різнотипними розподіленими джерелами енергії [Текст] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько, О. Є. Рубаненко, Ю. В. Малогулко // *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. – 2016. – № 3 (95). – С. 199 – 205.

29. Лежнюк, П. Д. Оптимізація секціонування в локальних електричних системах за критерієм втрат електричної потужності з урахуванням відмов [Текст] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько, О.Є. Рубаненко // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2016. – № 2 (94). – С. 90–98.

30. Лежнюк П. Д. Вплив ВДЕ на втрати активної потужності в ЛЕС [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко, І.О. Гунько // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2015. – №3 (92). – С. 84–90.

31. Лежнюк П.Д. Забезпечення оптимального керування нормальними режимами ЕЕС шляхом підвищення надійності високовольтних вводів [Текст] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Гірництво. – 2014. – № 25. – С. 92–100.

32. Рубаненко О. О. Нормування технічних втрат електроенергії в ЕЕС при оптимальному керуванні їх режимами з використанням критеріального програмування і нейронечіткого моделювання [Текст] / О. О. Рубаненко, І. О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2013. – № 6. – С. 249–253. – ISSN 2307-5732.

33. Лежнюк П. Д. Оптимальное управление нормальными режимами электроэнергетических систем с учётом нормативного значения потерь электроэнергии и $tg \varphi$ [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко, І. О. Гунько // *Moderní vymoženosti vědy* – 2014: X Міжнарод. наук.-практ. конф.: матеріали конференції. – Прага, 2014. – С. 87–92.

34. Лежнюк П.Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС [Електронний ресурс] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2015): III Міжнарод. наук.-практ. конф.: матеріали конференції. – Вінниця, 2015. – Режим доступу: http://conf.vntu.edu.ua/energo/2015/Abstr_OCEI-2015.pdf.

35. Лежнюк П.Д. Оптимальне керування малими ГЕС потоків потужності в електричних мережах з розосередженим генеруванням [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, І. О. Гунько // Відновлювана енергетика та

енергоефективність у XXI столітті: XVII Міжнарод. наук.-практ. конф.: матеріали конференції. – Київ, 2016. – С. 430–434.

36. Лежнюк П.Д. Оптимізація місць секціонування в локальних електричних системах енергопостачальних компаній [Текст] / П.Д. Лежнюк, І.О. Гунько // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016): XIII Міжнарод. наук.-техн. конф.: тези доповіді. – Вінниця, 2016. – С. 191–193.

37. Лежнюк П.Д. Дослідження стану обладнання локальних електричних систем [Текст] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014): XII Міжнарод. наук.-техн. конф.: тези доповіді. – Вінниця, 2014. – С. 137.

38. Пат. №76464 Україна, МПК H02J23/00. Спосіб оптимального керування режимами роботи електроенергетичної системи. / П. Д Лежнюк., В. О. Лесько, О. О. Рубаненко, І. О. Рубаненко; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – №2012 058664; заявл. 14.05.2012; опубл. 10.01.2013, Бюл. №1.

39. Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію для суб'єктів господарювання та надбавки до «зелених» тарифів за дотримання рівня використання обладнання українського виробництва: постанова НКРЕКП від 30.06.2016 №1187. [Електронний ресурс] – Офіційний вісник України – Київ : Парлам. вид-во, 2016 – № 62, 2127 с. – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/web/printable.php>.

40. Про встановлення "зелених" тарифів на електричну енергію для приватних домогосподарств : постанова НКРЕКП від 30.06.2016 №1188. [Електронний ресурс] – Офіційний вісник України – Київ : Парлам. вид-во, 2016 – № 62, 2127 с. Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua>.

41. Державне агенство з енергоефективності та енергозбереження України: Типова фінансова модель СЕС приватного домогосподарства [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://sae.gov.ua/uk/newsletter/subscriptions>.

42. Школа для электрика: Технические решения по обеспечению уровней надёжности в сельских электрических сетях 10 и 0,4 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/electroshemy/254-tekhnicheskie-reshenijapo.html>.

43. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы) : учебное пособие для вузов / Холмский В. Г. – М. : Высшая Школа, 1975. – 280 с.

44. Гулидов С.С. Техничко-экономический анализ надёжности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей [Текст] / С.С. Гулидов // Вестник Орел ГАУ «Научное обеспечение развития агротехники и энергосбережения» – 2012. – №1 (34) - С. 144–146. – ISSN 1990-3618.

45. Tran, K. *Effects of dispersed generation (DG) on distribution systems* [Текст] / K. Tran, M. Vaziri // *Proc. of IEEE Power Engineering Society General Meeting*. – 2005. – №.3. – С. 2173–2178. – DOI:10.1109/PES.2005.1489235.

46. Петров П. В. Автоматизация секционирования распределительной сети в условиях стимулирующего регулирования [Текст] / П. В. Петров // *Электрические сети и системы*. – Киев. – 2015. – № 6 . – С. 6–7.

47. *Power sector. Global status report* [Электронный ресурс] // *Renewables. Steering committee*. – Ren. 21. – 2014. С. 25–27. – Режим доступа: <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources>.

48. *Power sector. Global status report* [Электронный ресурс] // *Renewables. Steering committee*. – Ren. 21. – 2016. С. 21–23. – Режим доступа: http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings1.pdf.

49. Асоціація «Інноваційний розвиток України» [Електронний ресурс]: 8-й міжнародний форум сталої енергетики в Україні SEF 2016 Kiev – Електрон. текст. дан. – Режим доступу:

<http://uaid.com.ua/initiative/8-j-mizhnarodnyj-forum-staloji-enerhetyky-v-ukrajini-sef-2016-kyiv>.

50. Відновлювана енергетика України стрімко зростає, але досі має мізерну частку [Електронний ресурс]: Зелена хвиля. – Режим доступу: <http://ecoclubua.com/2012/01/vidnovlyuvanaenerhetykaukrajinu2011>.

51. Лежнюк П.Д. Автоматизація роботи розосереджених джерел електроенергії в локальній електричній системі на основі концепції *SMART Grid* / П.Д. Лежнюк, О.В. Нікіторович, О. А.Ковальчук, В.В. Кулик // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. – 2013. – С. 136–143. – ISSN 1727-9895.

52. Будівництво промислових СЕС [Електронний ресурс]. Інжинрингова компанія. – Нові енергетичні технології. –Режим доступу: <http://iknet.com.ua/uk/presentation/full/ses>.

53. *Evaluation of current controllers for distributed power generation system* [Текст] / A. Timbus, M. Lisser, R. Teodorescu, P. Rodriguez, F. Blaabjerg // *IEEE Transactions on power electronics*. – 2009. – № 3. – С. 654–664. – DOI: 10.1109/TPEL.2009.2012527.

54. Рекомендации по организации учета и анализа отключений в воздушных электрических сетях напряжением 0,38-20 кВ [Текст]. – М: ОРГРЭС, 1994. – 20 с.

55. Миловидов С. С. Надежность городских кабельных сетей [Електронний ресурс] / С. С. Миловидов, Д. Е. Павликов // *Новости электротехники*. – 2011. – № 2 (68) – С. 1–3. – Режим доступу : <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/68/07.php>.

56. Красников В. И. Аварийные режимы сельских электрических сетей напряжение 0,38 кВ [Текст] / В. И. Красников // *Повышение качества электрификации сельскохозяйственного производства и его электроснабжения*. – Труды МИИСП. – М., 1981. – С. 63–65.

57. Виноградов А.В. Анализ повреждаемости электрооборудования электротехнических сетей и обоснования мероприятий по повышению надёжности электроснабжения потребителей [Электронный ресурс]/

А. В. Виноградов, Р. А. Перьков // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. – 2015 – №12 (55). – С.12–21. – ISSN 2227-9407. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz>.

58. Саенко Ю. Л. Исследование причин повреждения трансформаторов напряжения контроля изоляции [Текст] / Ю. Л. Саенко, А. С. Попов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит – 2011. - №7 (89). – С.59-66. – ISSN 2218-1849

59. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Собчук Д. С. Оцінювання впливу джерел відновлюваної енергії на забезпечення балансової надійності в електричній мережі [Текст] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 6. – С.10–15. – ISSN 1997-9266.

60. *Degeroote L. Fast harmonic simulation method for the analysis of network losses with converter-connected distributed generation [Text] / L. Degeroote, L. Vandeveld, B. Renders // Electric Power Systems Research. – 2010. – № 80. – С. 1332-1340. – DOI: 10.1016/j.epsr.2010.05.003.*

61. *Katiraei F. Accidental islanding of distribution systems with multiple distributed generation units of various technologies [Електронний ресурс] / F. Katiraei, T. Chang, C. Sun // Symposium “Grid of the Future 2013”. – 2013. Boston, MA. Oct. 22. – С. 1 – 20. – Режим доступа: <http://cigre.wpengine.com/wp-content/uploads/2015/06/QT-Cigre-GridofFuture-Accidental-Islanding-Oct22-2013-Final.pdf>*

62. Поляков В. С. Феррорезонанс в сетях с изолированной нейтралью [Електронний ресурс] / В. С. Поляков // Электрические системы и сети. Информационно-справочный электротехнический. Режим доступа: <http://esistems.ru>.

63. Кузнецов В. Г. Використання штучної нейронної мережі для визначення характеристик аномальних перенапруг [Текст] / В. Г. Кузнецов, В. В. Кучанський, Ю. І. Тугай // Праці Інституту електродинаміки

Національної академії наук України. Збірник наукових праць.– 2012. — вип. 31. — С. 5-11. – *ISSN* 1727-9895.

64. Тугай Ю. І. Аналіз умов виникнення ферорезонансних процесів в електричних мережах [Текст] / Ю. І. Тугай // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» – 2007. – вип. 596 – С.132–136.

65. Тугай Ю. І. Моделювання ферорезонансних процесів в трансформаторах напруги з урахуванням ефекту старіння сталі [Текст] / Ю. І. Тугай, О. Б. Бесараб // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С. 62–64. – *ISSN* 1607-7970.

66. Тугай Ю. І. Ферорезонансні процеси за паралельної роботи трансформаторів напруги електромагнітного типу [Текст] / Ю.І. Тугай, О. Б. Бесараб, В. А. Мельничук // Вісник Харківського національного технічного університету ім. П.Василенка. – 2014. – № 153. – С. 57-59. – *ISBN* 5-7987-0176X.

67. Тугай Ю. І. Модель електромагнітного трансформатора напруги для дослідження ферорезонансних процесів [Електронний ресурс] / Ю. І. Тугай, О. Б. Бесараб // Наукові праці Вінницького національного технічного університету – 2014. – № 4. *ISSN* 2307-5376. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/jpdf/VNTUV_2014_4_11.pdf.

68. Журахівський А. В. Режими роботи трансформаторів напруги в електромережах з ізольованою нейтраллю [Текст] / А. В. Журахівський, А. Я. Яцейко, Р. Я. Масляк // Електроінформ. – 2009. – № 1. – С. 8–11. – *ISSN* 1684-2243.

69. Макаренко В. Програмная среда моделирования энергосистем PScad [Текст] / В. Макаренко // Моделирование радиоэлектронных устройств. – 2013. – № 11. – С. 44–48. *ISSN* 1817–2369.

70. Реклоузер вакуумный PBA\TEL [Електронний ресурс] / ООО "МК "Возрождение" – Режим доступу : http://tiu.ru/p96026382-reklouzer-pbatel.htmldescription_block.

71. Разъединители наружной установки на 10 кВ: каталог/ ЗАО «ЗЭТО». Великие луки, 2010.-18 с.

72. *AutoLink. Single or there-phase electronic sectionaliser / Product offerings and features. ABB.* – 2011.

73. Воротницкий В. Реклоузер – новый уровень автоматизаций и управления ВЛ 6(10) кВ [Текст] / В. Воротницкий, С. Бузин // *Новости электротехники.* – 2005. – №3 (33). – С.28–31.

74. Буйний Р. О. Методичні рекомендації з побудови схем секціонування розподільних електричних мереж напругою 6 – 10 кВ [Текст] / Р. О. Буйний, В. В. Зорін, А. О. Квицинський // *Электрические сети и системы.* – Киев. – 2015. – № 6 . – С. 22–32.

75. Побудова схем секціонування розподільної електричної мережі напругою 6–10 кВ [Текст]. Методичні рекомендації: СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-99:2014. – Офіц. вид. – К. : ТОВ «Торговий дім – «ЕЛВО – Україна», 2014. – 42 с.

76. Мусаев Т. Методика выбора оптимальной точки деления городской распределительной сети напряжением 6(10) кВ [Текст] / Т.А. Мусаев // *Энергетика Татарстана.* – 2013. – №2 (30). – С. 38 – 41. – ISSN 1994-8697.

77. Мельников, Н. А. Матричный метод анализа электрических сетей / Н. А. Мельников. – М. : «Энергия», 1996. – 120 с.

78. Дьяконов В. П. *Mathcad 2000: учебный курс* / В. П. Дьяконов Харьков: Питер, 2000 – 592 с. – ISBN 5-272-000196-6.

79. Тугай Ю. І. Оптимальне секціонування схем розподільних електричних мереж [Текст] / Ю. І. Тугай, О. В. Гай // *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України.* – 2011. – № 28. – С. 10–14. – ISSN 1727-9895

80. Лежнюк П.Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом: монографія. [Текст] / П. Д. Лежнюк. – Вінниця: Універсум – Вінниця, 2003. – 131 с. – ISBN 966-641-059-1.

81. Астахов Ю. Н. Применение критериального метода в электроэнергетике [Текст] / Ю. Н. Астахов, П. Д. Лежнюк – Киев: УМКВО. – 1989. – 137 с.

82. Розенвассер Е. Н. Чувствительность систем управления [Текст] / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов – М: Наука, 1981. – 464 с.

83. Козирський В. В. Аналіз впливу відхилень вихідних даних на вибір оптимальної кількості секціонуючих пристроїв у розподільних мережах [Текст] / В. В. Козирський, О.Б. Гай // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2003. – № 3. – С. 10–18.

84. Козирський В.В. Вибір оптимальної кількості секціонуючих пристроїв для розподільних мереж напругою 10 кВ [Текст] / В. В. Козирський, О. В. Гай // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – № 2. – С. 12–20.

85. *Hyams D. CurveExpert Basic: Release 1.4* [Електронний ресурс] / D. Hyams // 2010. – 77 с. – Режим доступу: https://docs.curveexpert.net/curveexpert/basic/_static/CurveExpertBasic.pdf.

86. Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа. / Э. Ферстер, Б. Ренц – М.: Финансы и статистика, 1983.– 120 с.

87. ГОСТ 12109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

88. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила: ГКД 34.20.507 – 2003. – Офіц. вид. – К: ГРІФРЕ : М-во палива та енергетики України, 2003. – 597 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Правила).

89. Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2015 році. Постанова НКРЕКП № 515 від 31.03.2016. [Електронний ресурс] / – К.: НКРЕКП, 2016. – 154 с. – Режим доступу:

http://www.nerc.gov.ua/data/filearch/Catalog3/Richnyi_zvit_2015.pdf.

90. Про встановлення на квітень 2016 року єдиних роздрібних тарифів на електричну енергію, що відпускається для кожного класу споживачів, крім населення, населених пунктів та зовнішнього освітлення, на території України. Постанова НКРЕКП № 491 від 25.03.2016. [Електронний ресурс] – К: НКРЕКП – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/id=19375>.

91. *Fundamentals of PSCAD and General Applications*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.nayakcorp.com/Getting_Started42.ppt.

92. Лежнюк П. Д. Оптимізація режимів електричних мереж з малими ГЕС в умовах адресного електропостачання [Текст] / 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.

93. Бурикін О.Б. Оптиміальне керування відновлюваними джерелами енергії в локальних електричних системах [Текст] / О.Б. Бурикін, Ю. В. Малогулко, Ю.В. Томашевський, Н.В. Радзівська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – № 4. – 2016. – С. 69–74. – ISSN 1997-9266.

94. *Chakraborty S. A review of power electronics interfaces for distributed energy systems towards achieving low-cost modular design* [Текст] / S. Chakraborty, B. Kramer, B. Kroposki // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – № 13. – 2009. – С. 2323–2335. DOI:10.1016 / j.rser.2009.05.005.

95. *Future electronic power distribution systems. A contemplative view* [Текст] / D. Boroyevich, I. Cvetković, D. Dong, R. Burgos, F. Wang, F. Lee // *12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipmen*. – 2010. – С. 1369–1380. DOI: 10.1109/OPTIM.2010.5510477.

96. *Vachirasricirikul S. Design of Robust Control and Monitoring System for Microgrid Stabilization* [Текст] / S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, T. Chaiyatham // *6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. – 2009. – С. 21–25. DOI: 10.1109/ECTICON.2009.5136966.

97. Hartono B. *Review of Microgrid Technology* [Текст] / B. Hartono, R. Setiabudy // *International Conference on QiR*. – 2013.– С. 127–132 DOI: 10.1109/QiR.2013.6632550.

98. *Grid impedance monitoring system for distributed power generation electronic interfaces* [Текст]/ S. Cobreces, E. J. Bueno, D. Pizarro, F. J. Rodriguez, F. Huerta // *IEEE transaction on instrumentation and measurement*. – № 9. – 2009. – С. 3112–3121. – DOI: 10.1109/TIM.2009.2016883.

99. Peng F. Z. *Control and protection of power electronics interfaced distributed generation systems in a customer-driven microgrid* [Электронный ресурс] / F. Z. Peng, Y. W. Li, L. M. Tolbert // *IEEE*. – 2009.

Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/b96a/0a2c.pdf>.

100. *Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids a general approach toward standardization* [Текст] / J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. de Viciña, M. Castilla. // *IEEE transactions on industrial electronics* – № 1. – 2011. – С. 158-172. DOI: 10.1109/TIE.2010.2066534.