

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВОЙТЮК ЮРІЙ ПЕТРОВИЧ

УДК 621.316.1

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ
ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З
РІЗКОЗМІННИМИ НЕСИМЕТРИЧНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Ю. П. Войтюк

Науковий керівник:
Бурбело Михайло Йосипович,
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2017

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 18 |
| ВСТУП..... | 19 |
| 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ РІЗКОЗМІННИХ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ... | 24 |
| 1.1 Взаємовплив статичних характеристик навантаження і напруги у вузлі електричної мережі | 24 |
| 1.2 Характеристика конденсаторних компенсувальних пристроїв | 28 |
| 1.3 Статичні тиристорні компенсатори та їх застосування в розподільних електричних мережах | 31 |
| 1.4 Статичні синхронні компенсатори та їх застосування в розподільних електричних мережах | 41 |
| 1.5 Висновки та основні задачі дослідження | 44 |
| 2 ВИБІР ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ КОМПЕНСУВАЛЬНИМИ ТА СИМЕТРУВАЛЬНИМИ ПРИСТРОЯМИ | 45 |
| 2.1 Вибір інформативних параметрів для керування компенсувальними пристроями | 45 |
| 2.2 Вибір інформативних параметрів для керування симетрувальними пристроями | 53 |
| 2.3 Удосконалення умов керування симетрувальними пристроями за несиметрії напруг | 63 |
| 2.4 Висновки до розділу 2..... | 69 |
| 3 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ ДИНАМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ | 71 |
| 3.1 Удосконалення систем керування статичними тиристорними компенсаторами | 71 |
| 3.2 Умови керування статичними синхронними компенсаторами..... | 81 |
| 3.3 Висновки до розділу 3 | 90 |

| | |
|---|-----|
| 4 ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ | 92 |
| 4.1 Аналіз ефективності компенсації реактивної потужності за зменшенням втрат електроенергії..... | 92 |
| 4.2 Оцінювання зменшення втрат електроенергії в розподільних мережах з різкозмінним навантаженням | 96 |
| 4.3 Оцінка ефективності компенсації реактивної потужності з урахуванням умов пуску приводних двигунів технологічних агрегатів | 101 |
| 4.4 Висновки до розділу 4..... | 108 |
| 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕГУЛЯТОРА КОМПЕНСУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ | 109 |
| 5.1 Розробка регулятора реактивної потужності для мереж обленерго | 109 |
| 5.2 Практична реалізація мікропроцесорного регулятора реактивної потужності РРПм-12 | 112 |
| 5.3 Удосконалення та моделювання багатоканального вимірювального перетворювача | 117 |
| 5.4 Висновки до розділу 5..... | 120 |
| ВИСНОВКИ | 121 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 123 |
| Додаток А. Результати впровадження дисертаційного дослідження | 137 |
| Додаток Б. Програми розрахунків в пакеті Mathcad | 139 |
| Додаток В. Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів..... | 165 |

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з основних і найбільш ефективних заходів зниження втрат та підвищення якості електричної енергії в розподільних мережах споживачів є компенсація реактивної потужності (КРП) [1-3]. Зокрема, досить часто використовують компенсаційні симетрувальні пристрої (СП) з пофазним керуванням, які забезпечують компенсацію реактивної потужності та симетрування навантажень [4-6].

Наявність на промислових підприємствах споживачів з різкозмінними несиметричними навантаженнями спричинює певні проблеми з їх електромагнітною сумісністю [7, 8]. Це пов'язано з тим, що такі споживачі створюють в електричних мережах коливання та динамічну несиметрію напруг. До таких споживачів відносять електротехнологічні установки (дугові печі, електрозварювальні установки), електропривод коливного руху (барабанні млини різного призначення, бурові установки, верстати качалки нафти, прокатні стани), тягові підстанції залізниць тощо.

За таких умов дотримання норм якості напруг в більшості випадків є неможливим без пристроїв динамічної КРП, призначених для зменшення коливань напруги, симетрування навантажень, особливо, – різкозмінних, які створюють коливання напруги в розподільній мережі в діапазоні частот 0,1,...,25 Гц. Для підвищення якості електроенергії використовують статичні тиристорні компенсатори [9-20]. Точність та швидкодія їх роботи залежить від урахування статичних характеристик вузлів навантажень. Однак в наукових роботах, присвячених питанням керування пристроями динамічної КРП, задача врахування статичних характеристик вузлів навантажень недостатньо досліджена і залишається не вирішеною.

Тому науково-прикладне завдання, яке полягає у вдосконаленні процесу керування пристроями динамічної КРП за різкозмінних навантажень з урахуванням статичних характеристик вузлів навантажень, є актуальним.

Дисертаційне дослідження спрямоване на підвищення ефективності компенсаційних симетрувальних пристроїв, покращення рівня компенсації реактивної потужності та зменшення несиметрії різкозмінних навантажень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень які проводились відповідно до наукового напрямку кафедри „Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” Вінницького національного технічного університету (ВНТУ). Дисертаційна робота виконувалася відповідно до „Програми наукових досліджень і розробок Міністерства освіти і науки України за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки” у рамках фінансування держбюджетної науково-дослідної роботи № 22 Д 320 „Розробка методів та пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності”, № державної реєстрації 0110U002166, господарсько-договірної теми № 2205 „Розробка рекомендацій по підвищенню ефективності використання симетрувально-компенсуючих пристроїв в електричних мережах ВАТ „АК „Вінницяобленерго” з метою зниження втрат електричної енергії та збільшення їх пропускної здатності”, № державної реєстрації 0109U004177, господарсько-договірної теми №2206 „Розробка рекомендацій з установки симетрувально-компенсуючих пристроїв в електричних мережах ВАТ „АК „Вінницяобленерго” з метою зниження втрат електроенергії та поліпшення якості електроенергії”. Автор брав участь у виконанні науково-дослідних робіт як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в розподільних мережах з різкозмінними несиметричними навантаженнями.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Проаналізувати методи та засоби підвищення ефективності компенсації реактивної потужності споживачів з різкозмінними

несиметричними навантаженнями та систематизувати відомі теоретичні підходи;

2. Розробити методи підвищення ефективності компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень з урахуванням статичних характеристик вузлів навантажень;

3. Виконати моделювання систем керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень;

4. Розробити методи оцінювання ефективності компенсації реактивної потужності споживачів з несиметричними навантаженнями;

5. Практично реалізувати адаптивні системи керування компенсаційними симетрувальними пристроями з урахуванням статичних характеристик навантажень.

Об'єкт дослідження. Процес компенсації реактивної потужності в розподільних мережах з різкозмінними несиметричними навантаженнями.

Предмет дослідження. Методи та засоби підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в розподільних мережах з різкозмінними несиметричними навантаженнями.

Методи дослідження. Під час роботи над дисертацією використовувались методи досліджень, які базувалися: на теорії електротехніки – при отриманні аналітичних виразів критеріїв та умов компенсації реактивної потужності; на теорії лінійної алгебри – при побудові математичних моделей керування симетрувальними пристроями; на методах математичного моделювання – при аналізі помилок симетрування навантажень з використанням отриманих математичних моделей симетрувальних пристроїв; на теорії математичної статистики – при проведенні статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів і положень, що виносяться на захист, полягає у вдосконаленні процесу керування пристроями

компенсації реактивної потужності, що забезпечує підвищення ефективності розподільних мереж з різкозмінними несиметричними навантаженнями.

В роботі отримано такі наукові результати:

1. Вперше створено метод керування компенсаційно-симетрувальними пристроями з адаптацією інформативних параметрів за характером статичних характеристик вузлів навантажень, що забезпечує підвищення ефективності компенсації реактивної потужності споживачів з різкозмінними несиметричними навантаженнями.

2. Удосконалено метод керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень за багатократною несиметрії навантажень та несиметрії напруги джерела живлення, який відрізняється адаптивним вибором інформативного параметра під час симетрування напруги, що забезпечує підвищення ефективності використання компенсаційно-симетрувальних пристроїв.

3. Дістав подальшого розвитку метод оцінювання ефективності компенсації реактивної потужності споживачів, який за рахунок використання двомодального бета-розподілу різкозмінних навантажень, враховує нерівномірності графіків навантажень, що дозволяє значно покращити обґрунтованість прийняття рішень.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає у розробці алгоритмів адаптивного керування компенсаційними симетрувальними пристроями. Їх впровадження сприятиме покращенню рівня компенсації реактивної потужності та зменшенню несиметрії напруги в розподільних мережах.

Одержані наукові результати а саме: систему керування регулятором реактивної потужності та алгоритм вимірювання інформативних параметрів впроваджено в ПП „Промавтоматика”, що підтверджено актом про впровадження від 7.11.2016 р. Результати роботи також використовуються у ВНТУ на кафедрі “Електротехнічні системи електроспоживання та

енергетичний менеджмент” для підготовки фахівців за спеціальністю 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”, довідка про впровадження від 7.02.2017 р.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем одноособово. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві такий: [21, 22] – обгрунтовано метод керування компенсаційними та симетрувальними установками з урахуванням статичних характеристик вузлів навантажень; [23–26] – обгрунтовано метод керування симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень та несиметрії напруги джерела живлення; [27] – розроблено Matlab-модель для системи автоматичного керування СТК; [28] – отримано умови симетрування навантажень за допомогою СТАТКОМ; [29] – дістав подальшого розвитку метод оцінювання ефективності компенсації реактивної потужності споживачів; [30, 31] – проаналізовано методи стимулювання та контролю за електроспоживанням; [32, 33] – проаналізовано моделі втрат потужності для споживачів з різко змінним графіком навантажень; [34–36] – розроблено алгоритми керування компенсувальними пристроями.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на таких наукових конференціях: міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2011, 2013)» (м. Вінниця, 2011, 2013 рр.), міжнародна науково-технічна конференція «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2003, 2012)» (м. Вінниця - 2003, 2012 рр.).

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 16 наукових працях, в тому числі в 10 статтях в наукових фахових виданнях України, з них 7 входять до наукометричних баз даних, 5 статтях в науково-технічних журналах і збірниках праць науково-технічних конференцій, отримано патент України на корисну модель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Ю. С. Железко, *Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах*. Москва: Энергоиздат, 1981.
- [2] И. Н. Ковалев, *Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей*. Москва: Энергоатомиздат, 1990.
- [3] Б. С. Рогальський, *Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006.
- [4] А. Н. Милях, *Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях*. Київ, Україна: Наукова думка, 1973.
- [5] А. К. Шидловский, *Повышение качества энергии в электрических сетях*. Київ, Україна: Наукова думка, 1985.
- [6] В. Г. Кузнецов, *Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях*. Київ, Україна: Наукова думка, 1992.
- [7] И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк, Ю. Л. Саенко, Н. А. Нойбергер, *Электромагнитная совместимость потребителей*. Москва: Машиностроение, 2012.
- [8] В. Г. Кузнецов, Э. Г. Куренный, А. П. Лютый, *Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения*. Донецк, Украина: Донбасс, 2005..
- [9] R. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York etc., McGraw-Hill, 1994.
- [10] R. M. Mathur, R. K. Varma, *Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems*. IEEE Press:Piscataway, 2002.
- [11] В. И. Кочкин О. П. Нечаев, *Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий*. Москва : Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.

- [12] В.А. Пономарёв, А.Л. Шитов, С.Н. Черевань, „Результаты внедрения тиристорного компенсатора реактивной мощности в систему электроснабжения металлургического предприятия”, *Промышленная энергетика*, № 4, с.51 – 54, 1987.
- [13] А. В. Жураховский, В. С. Перхач, В. Н. Стряпан, „Повышение экономичности электроснабжения угольных шахт при помощи статических тиристорных компенсаторов”, *Промышленная энергетика*, № 8, с.34–35,1987.
- [14] Ю. О. Варецкий, „Компенсація несиметрії статичними компенсаторами в мережах живлення змінних навантажень”, *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 66–70, 1998.
- [15] Ю. Варецкий, „Режими електричних мереж і систем електропостачання зі статичними тиристорними компенсаторами (методологія аналізу)”, автореф. дис. докт. техн. наук, спец. 05.14.02, Львів,1999.
- [16] И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, Е. И. Сокол, „Перспективы применения полупроводниковых компенсаторов реактивной мощности в сетях электроснабжения”, *Технічна електродинаміка*, №1, с. 37– 42, 2002.
- [17] Г. П. Корнилов, А. А. Николаев, А. Ю. Коваленко, „Средства и перспективы управления реактивной мощностью крупного металлургического предприятия”, *Електротехніка*, №5, с. 25-32, 2008.
- [18] А. А. Николаев, „Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора *сверхмощной дуговой сталеплавильной печи*”, автореф. дис. канд. техн. наук, Магнитогорск, 2009.
<http://tekhnosfera.com/view/10225/a?#?page=17>
- [19] А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, В. С. Ивекеев, И. А. Ложкин, В. Е. Котышев, М. М. Тухватуллин, „Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной

печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутривозовского электроснабжения”, *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*, №1, с.59–69, 2014.

- [20] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, Динамічна компенсація реактивної потужності в пускових режимах електроприводів : монографія, Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010.
- [21] М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, „Оптимальне за швидкодією керування компенсувальними пристроями за різкого зниження напруги живлення”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с.115–118, 2012.
- [22] М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, „Оптимальне за швидкодією керування компенсаційними симетрувальними пристроями”, *Гірнична електромеханіка та автоматика*, Вип. 88, с. 3–5, 2012.
- [23] М. Й. Бурбело, М. В. Девятко, Ю. П. Войтюк, „Керування симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень в розподільній мережі”, *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, № 2, 2012, [Електронний ресурс]. Доступно: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2012-2.fils/12mjbden_ua.pdf
- [24] М. Й. Бурбело, М. В. Девятко, Ю. П. Войтюк, „Алгоритм керування симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії в розподільних мережах”, *Технічна електродинаміка*, № 6, С. 58–60, 2012.
- [25] М. Бурбело, Ю. Войтюк, В. Кошкалда, „Керування компенсаційно-симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень і несиметрії напруги джерела живлення”, *на Міжнародній науково-технічній конференції „КУСС–2012”*, Вінниця: ВНТУ, 2012. с. 143–144.
- [26] М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, В. О. Кошкалда, „Керування компенсаційно-симетрувальними пристроями за багатократної

несиметрії навантажень і несиметрії напруги джерела живлення”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 67–70, 2013.

- [27] М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Лобода, „Керування установками динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних навантажень”, *Наукові праці Вінницького національного університету*, № 4, 2016. [Електронний ресурс].
Доступно:

<https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/486/485>

- [28] М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Лобода, „Умови симетрування електричних навантажень розподільних мереж за допомогою СТАТКОМ”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 139–144, 2016.

- [29] Б. С. Рогальський, Ю. П. Войтюк, О. М. Нанака, „Економічна ефективність оптимальної компенсації реактивної потужності в електричних мережах енергосистем та споживачів” на *Міжнародній наук.-практ. конференції „Динаміка наукових досліджень”*, Дніпропетровськ, 2002, с. 32-34.

- [30] Б. С. Рогальський, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук, Ю. П. Войтюк, „Системи стимулювання енергозбереження і управління ним на промислових підприємствах” на *VII Міжнародній конференції „КУСС-2003”*, Вінниця, 2003, с. 159-162.

- [31] Б. С. Рогальський, Ю. П. Войтюк, „Системи і пристрої контролю електроспоживання та управління ними”, *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*, 2002, с. 76-81.

- [32] М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, Л. М. Мельничук, „Визначення втрат електроенергії в розподільних мережах споживачів”, на *I Міжнародній науковій конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2011)»*, Вінниця, 2011, с. 77.

- [33] М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, „Визначення втрат електроенергії в розподільних мережах енергопостачальних компаній”, *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 4, с. 105–108, 2011.
- [34] Б. С. Рогальський, В. М. Непийвода, Ю. П. Войтюк, „Пристрій автоматичного управління компесувальними установками з врахуванням рівня напруги у вузлах мережі підприємства”, на *Міжнародній наук.-техн. конференції. „Контроль і управління в складних системах (КУСС 2003)”*, Вінниця, 2003, с. – 135–138.
- [35] Б. С. Рогальський, В. М. Непийвода, П. В. Сосенко, Ю. П. Войтюк, „Пристрій керування компенсувальними установками в електричних мережах АПК”, *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*, Том 1, 2004, с. 96-100.
- [36] Б. С. Рогальський, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Грицюк, Ю. А. Лисогор, І. П. Сосенко, „Пристрій для компенсації реактивної потужності трифазного навантаження”, *Пат. 39727, МПК G 05 F 1/70, № u200811788*, 10.03.2009..
- [37] В. А. Веников, *Переходные электромеханические процессы в электрических системах*. Москва: Высшая школа, 1985.
- [38] В. О. Чершова, „Контроль устойчивости узлов двигательной нагрузки электрических сетей в режиме реального времени”, дис. канд. техн. наук, Новосибирск, 2016.
- [39] П. С. Жданов, *Вопросы устойчивости электрических систем*, Москва: Энергия, 1979.
- [40] Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, Э. А. Хачатрян, *Устойчивость нагрузки электрических систем*, Москва: Энергоиздат, 1981.
- [41] В. Г. Кузнецов, „Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с несимметричными нагрузками”, *Электричество*, №2, с. 64 – 67, 1983.

- [42] М. Я. Минц, В. Н. Чинков, О. Г. Гриб, „Симметрирование системы токов трехфазной сети”, *Известия вузов СССР. Энергетика*, №10, с. 16–20, 1984.
- [43] М. Я. Минц, В. Н. Чинков, О. Г. Гриб, „Симметрирование системы токов в четырехпроводных трехфазных сетях”, *Промышленная энергетика*, №5, с. 41–42, 1984.
- [44] О. Г. Гриб, „Автоматическое симметрирующее устройство на базе микропроцессора”, *Известия вузов СССР. Энергетика*, №7, с. 25–29, 1989.
- [45] А. Г. Баталов, О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, *Качество электрической энергии в системах электроснабжения*, Харьков: ХНАГХ, 2006.
- [46] Ф. Ф. Абдель Рахім, „Удосконалення цифрових методів та засобів контролю і регулювання несиметричних режимів в трифазних мережах промислових підприємств”, автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.14.02, Донецьк, 2001.
- [47] М. Й. Бурбело, Б. С. Рогальський, В. М. Непийвода, С. І. Вознюк, „Квазікомпенсаційні вимірювальні пристрої для регуляторів реактивної потужності”, *Енергетика и електрифікація*, №6, с. 29–33, 2001.
- [48] М. Й. Бурбело, „Квазікомпенсаційні вимірювальні перетворювачі для пристроїв симетрування трифазних навантажень”, *Енергетика и електрифікація*, №12, с. 26–28, 2001.
- [49] Бурбело, М. Й. Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, О. В. Бабенко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2002. – №2. – С. 92–95.
- [50] М. Бурбело, О. Бабенко, „Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування швидкозмінних навантажень трифазних споживачів”, *Промислова електроенергетика та електротехніка*, №5,

с. 25–27, 2003.

- [51] М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко, „Квазізрівноважена вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування трифазних навантажень”, *Енергетика и электрификация*, № 9-10, с. 52–54, 2003.
- [52] М. Й. Бурбело, „Аналіз помилок симетрування навантажень за умов несинусоїдності”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №2, с. 41–46, 2005.
- [53] М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко, „Аналіз похибок вимірювання швидкодіючих систем компенсаційних установок симетрування навантажень за умов несинусоїдності”, *Вісник НУ „Львівська політехніка”. Вимірювання та керування*, №530, с. 124–130, 2005.
- [54] М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко, „Формування математичних моделей вимірювальних систем установок симетрування”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №6, с.242–251, 2005.
- [55] М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький, О. В. Бабенко, О. В. Салій, „Застосування багатоцільової оптимізації для симетрування та зменшення відхилень напруг в електричних мережах”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с.76–79, 2007.
- [56] М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко, А. М. Волоцький, О. В. Салій, „Симетрування навантажень вузлів електричних мереж з використанням компенсаційних установок за несиметрії напруги джерела живлення”, *Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро)*, № 2, с. 28–30, 2008.
- [57] М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко, О. М. Музика, М. В. Никитенко, „Симетрування струмів і напруг вузлів електричних мереж з використанням компенсаційних установок за умови несиметричного джерела живлення”, *Наукові праці ВНТУ*, № 1, 2008.
- [58] А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, Г. А. Москаленко, А. Г. Кармалицкий, А. Г. Зоценко, А. С. Григорьев, „Устройство для

симметрирования несимметричной трехфазной нагрузки”, *А.с. 964853 СССР. МКИ H02J 3/26.: А.с. 964853. МКИ H02J 3/26*, 07.10.82.

- [59] А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, Г. А. Москаленко, А. Т. Лысенко, „Симметрирующее устройство для произвольной трехфазной несимметричной нагрузки”, *А.с. 1330700 СССР. МКИ H02J 3/26.: А.с. 1330700. МКИ H02J 3/26 /– №3982935*, 15.08.1987.
- [60] М. Я. Минц, В. Н. Чинков и О. Г. Гриб, „Устройство для автоматического симметрирования токов и стабилизации заданного коэффициента мощности трехфазной системы”, *А.с. 9200959 СССР. МКИ H02J 3/26, №2930458/24-07*, 15.04.1982.
- [61] М. Я. Минц, В. Н. Чинков, „Способ симметрирования трехфазной сети”, *А.с. 1504724 А1 СССР. МКИ H02 J 3/26*, 30.08.1989.
- [62] М. Я. Минц, В. Н. Чинков, А. Л. Савицкий и А. В. Нидзий, „Устройство для симметрирования трехфазных сетей”, *А.с. 1737621 А1. МКИ H02 J 3/26*, 30.05.1992.
- [63] М. Й. Бурбело, Б. С. Рогальський, В. О. Іванков, В. Ф. Сайченко, „Пристрій для автоматичного симетрування струмів і стабілізації заданого коефіцієнта потужності трифазної системи”, *Пат. 64831 Україна. МКИ H02J 3/26, №2001075285*, 15.03.2004.
- [64] М. Й. Бурбело, Л. Б. Терешкевич, О. В. Бабенко, „Пристрій для автоматичного симетрування струмів і стабілізації заданого коефіцієнта потужності трифазної системи”, *Пат. 81482. Україна. МКИ H02J 3/26. №a200510891*, 10.01.2008.
- [65] J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, R. Domke, „Reactive Power compensation Technologies: State-of-the-Art Review”, *IEEE Proc.*, pp. 2144-2164, December, 2005.

- [66] Hurng-Liang Chou, Chin-Chang Wu, Wen-Pin Hsu, Yao-Jen Chang, „Hybrid Reactive Power Compensation Device”, *United States Patent US 6,876,179 B2*, Apr.5, 2005.
- [67] В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, С. К. Поднебенна, *Патент № UA 106174 C2*, 10.02.2014.
- [68] С. А. Шишкин, „Повышение эффективности энергосбережения в электросетях предприятий АПК при компенсации реактивной мощности”, автореф. дис. канд. техн. наук, Москва, 2004.
- [69] <http://www.evlar.com.ua/home>
- [70] Ю. О. Варецкий, „Регулювання напруги в мережі за допомогою статичного компенсатора”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 69–73, 1999.
- [71] Міністерство палива та енергетики України (ГНД 34. 09. 104 – 2003). Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38 – 150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних втрат електроенергії. Київ, 2004.
- [72] Л. П. Анисимов, М. С. Левин, В. Г. Пекелис, „Методика расчета потерь энергии в действующих распределительных сетях”, *Электричество*, № 4, с. 27–30, 1975.
- [73] В. Г. Пекелис, Л. П. Анисимов, „Методика расчета нагрузочных потерь энергии в распределительных сетях”, *Электрические станции*, № 7, с. 51–54, 1975.
- [74] А. Л. Шитов и С. Н. Черевань, „Устройство для компенсации реактивной мощности”, *А.с. 1347118 СССР, МКИ⁴ H 02 J 3/18*. № 4078485/24-07, 23.10.1987.
- [75] М. Й. Бурбело, М. В. Микитенко, „Пристрій для компенсації реактивної потужності трифазного навантаження”, *Пат. 94181. Україна. МПК H02J 3/00. / (Україна). № a201001785*, 11.04.2011.
- [76] А. Б. Лоскутов, Б. Ю. Алтунин, И. А. Карнавский, „Модель

многоуровневого каскадного инвертора для компенсации реактивной мощности и мощности искажений в сетях с выпрямительной нагрузкой”, *PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE*, 2(16), с. 32–38, 2011.

- [77] Б. Ю. Алтунин, И. А. Карнавский, А. А. Кралин, „Имитационная модель системы управления СТАТКОМ для симметрирования сетевых токов”, *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева*, № 4(97), с. 232–236, 2012.
- [78] С. В. Кузьмин, „Принцип построения и математическое моделирование статического компенсатора реактивной мощности в тяговой сети переменного тока”, *Известия ПГУПС*, № 3, с. 70–77, 2011.
- [79] Bhim Singh, Sabha Raj Arya, „Design and control of a DSTATCOM for power quality improvement using cross correlation function approach”, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 4, No.1, p. 74–86, 2012.
- [80] Nguyen Van Minh; Bach Quoc Khanh; Pham Viet Phuong, „Comparative simulation results of DVR and D-STATCOM to improve voltage quality in distributed power system”, in *2017 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE). IEEE Conference Publications*, 2017, p.196 – 199.
- [81] Dinh-Nhon Truong; Van-Thuyen Ngo; Mi-Sa Nguyen Thi, „Voltage stability enhancement of the Bac Lieu wind power system connected to power grid using a STATCOM”, in *2017 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE). IEEE Conference Publications*, 2017, p. 160 – 164.
- [82] Daorong Lu; Jiangfeng Wang; Jianhui Yao; Sen Wang; Jianxin Zhu; Haibing Hu; Li Zhang, „Clustered Voltage Balancing Mechanism and Its Control Strategy for Star-Connected Cascaded H-Bridge STATCOM”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics. IEEE Journals & Magazines*, Vol. 64, Iss. 10, p. 7623 – 7633, 2017.

- [83] Yonglei Zhang; XiaoJie Wu; Xibo Yuan, „A Simplified Branch and Bound Approach for Model Predictive Control of Multilevel Cascaded H-Bridge STATCOM”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, Iss. 10, p. 7634 – 7644, 2017.
- [84] Nguyen Huu Vinh; Le Kim Hung; Nguyen Hung, „Hybrid damping controller for STATCOM to enhance power quality in multi-machine system”, in *2017 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE). IEEE Conference Publication*, 2017, p. 140 – 143.
- [85] Saleh Ziaeinejad; Ali Mehrizi-Sani, „Design Tradeoffs in Selection of the DC-Side Voltage for a D-STATCOM”, *IEEE Transactions on Power Delivery. IEEE Early Access Articles*, Vol. PP, Iss. 99, p. 1, 2017.
- [86] Xuefeng Ge; Feng Gao, „Flexible Third Harmonic Voltage Control of Low Capacitance Cascaded H-Bridge STATCOM”, *IEEE Transactions on Power Electronics. IEEE Early Access Articles*, Vol. PP, Iss. 99, p. 1 – 1, 2017.
- [87] Arvind R. Singh; Nita R. Patne; Vijay S. Kale; Piyush Khadke, „Digital impedance pilot relaying scheme for STATCOM compensated TL for fault phase classification with fault location”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, Iss. 10, p. 2586 – 2598, 2017.
- [88] Jitendra Kumar; Premalata Jena, „Directional relaying in presence of STATCOM during single pole tripping”, *Directional relaying in presence of STATCOM during single pole tripping. IET Journals & Magazines*, V. 11, Iss. 5, p. 673 – 680, 2017.
- [89] Abayomi A. Adebisi; K. T. Akindeji, „Investigating the effect of Static Synchronous Compensator (STATCOM) for voltage enhancement and transmission line losses mitigation”, in *2017 IEEE PES PowerAfrica. IEEE Conference Publications*, 2017.

- [90] М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, *Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет)*, СПб: «Электросила», 2003.
- [91] В. Г. Аввакумов, *Вопросы качества электрической энергии тяговых подстанций*, Омск: Изд-во ОМИИТ, 1967.
- [92] В. Г. Аввакумов, Г. Л. Багиев, Д. М. Воскобойников, *Технико-экономическая оценка качества электроэнергии в промышленности*, Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1977.
- [93] В. Г. Аввакумов, *Методы нескаллярной оптимизации и их приложения*, Киев: Вища школа, 1990.
- [94] М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, „Аналіз умов симетрування навантажень з використанням компенсаційних симетрувальних установок”, *Енергетика та електрифікація*, № 5, с. 3–6, 2009.
- [95] В. В. Зорін, М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький, „Оцінка взаємовпливу статичних характеристик вузла навантажень і оптимальних розв’язків математичних моделей зменшення несиметрії та відхилень напруг”, *Технічна електродинаміка*, № 1, с. 35–37, 2009.
- [96] А. С. Григорьев, „Частичная компенсация токов обратной последовательности в трехфазных цепях с несимметричными нагрузками”, дис. канд. техн. наук, Киев.: ИЭД АН УССР, 1982.
- [97] М. В. Девятко, „Керування компенсаційно-симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень в розподільних мережах”, автореф. дис. канд. техн. наук, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2011.
- [98] М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, „Аналіз цільових функцій симетрування навантажень за багатократної несиметрії”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 43–47, 2010.
- [99] М. Й. Бурбело, Л. Б. Терешкевич, М. В. Кузьменко, М. І. Цибульський, „Принцип симетрування електричного режиму для

вузлів мережі, розділених невеликим опором”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 84–88, 2011.

- [100] М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, М. В. Никитенко, Ю. В. Лобода, „Керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних швидкозмінних навантажень”, *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, Вип. 2, с. 37–43, 2013.
- [101] М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, О. О. Бірюков, О. М. Кінзерська, „Симетрування навантажень вузлів електричних мереж з використанням двофазних симетрувальних установок”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 35–38, 2008.
- [102] Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов, *Основы теории цепей*, Москва: Энергоатомиздат, 1989.
- [103] М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко, „Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень”, *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 54–56, 2011.
- [104] Ю.С. Железко, *Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии*, Москва: Энергаатомиздат, 1985..
- [105] „Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности”, *Промышленная энергетика*, №7, с.50-55, 1990.
- [106] „О направлениях исследований в области компенсации реактивной мощности (дискуссия)”, *Электричество*, №10, №5, с.7-13, 61-76, с.58-72, 1981,1983.
- [107] В. Н. Казанцев, *Методы расчета и пути снижения потерь энергии в электрических сетях*, Свердловск: Изд-во Уральского политехнического института им. С. М. Кирова, 1983.
- [108] Л. Д. Клебанов, *Вопросы методики определения и снижения потерь электрической энергии в сетях*, Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1973..