

Міністерство освіти і науки України
Житомирський державний технологічний університет

На правах рукопису

ПОЛІЩУК ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.316.1

**МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СИМЕТРУВАННЯ
НАПРУГ І СТРУМІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Гніліцький Віталій Васильович,
кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. СТАН НАУКОВИХ НАПРАЦЮВАНЬ З ПИТАНЬ СИМЕТРУВАННЯ НАПРУГ І СТРУМІВ	11
1.1. Методи і засоби симетрування напруг та струмів в електричних мережах	11
1.2. Математичні моделі систем керування СУ вузлів електричних мереж	14
1.3. Математичні моделі систем симетрування навантажень, в котрих не використовуються дії над комплексними числами	16
1.4. Математичні моделі систем керування пристроями симетрування навантажень	23
1.5. Математичні моделі процесу симетрування напруг вузлів електричних мереж	27
1.6. <u>Напрямок та основні задачі дослідження</u>	30
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ СИМЕТРУВАННЯ СТРУМІВ І НАПРУГ	31
2.1. Розв'язання задачі симетрування струмів	31
2.2. Розв'язання задачі симетрування напруг	44
2.3. Перехід від задач до моделей	54
2.4. <u>Висновки по розділу 2</u>	57
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ПОХИБОК ОБЧИСЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИМЕТРУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК	58
3.1. Вимірювальні трансформатори струму та напруги. Похибки, зумовлені їх неідеальністю	58
3.2. Похибки каналів для вимірювання електричних величин	60
3.3. Похибки обчислення елементарних функцій мікропроцесорними пристроями	61

3.4. Похибки обчислення параметрів СУ для симетрування струмів і напруг	73
3.5. Дослідження чутливості отриманих математичних моделей	84
3.6. <u>Висновки по розділу 3</u>	87
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ КОНДЕНСАТОРНИМИ СИМЕТРУВАЛЬНИМИ УСТАНОВКАМИ	88
4.1. Модель системи управління БК з ефектом мінімізації втрат активної потужності або підтримання ВРП на заданому рівні у радіальних електричних мережах з несиметричним навантаженням	89
4.2. Модель системи управління БК для симетрування напруг в електричних мережах з несиметричною напругою	101
4.3. Оцінка точності отриманої моделі системи керування СУ для симетрування напруг	104
4.4. <u>Висновки по розділу 4</u>	111
ВИСНОВКИ	112
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	114
Додаток А. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у ТОВ «Феруміна», м. Житомир	126
Додаток Б. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у ТОВ «Квадротекс», м. Житомир	128
Додаток В. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес у Житомирському державному технологічному університеті	130
Додаток Д. Схема алгоритму функціонування системи управління БК з ефектом мінімізації втрат активної потужності або підтриманням ВРП на заданому рівні у радіальних електричних мережах з несиметричним навантаженням	132
Додаток Ж. Текст коду програми для алгоритму в додатку Д	134
Додаток З. Схема алгоритму функціонування системи управління БК для симетрування напруг в електричних мережах з несиметричною напругою	137

Додаток К. Текст коду програми для алгоритму в додатку З	139
Додаток Л. Текст коду програми для моделювання і статистичної обробки процесу обчислення фазних потужностей СУ для симетрування напруг	141
Додаток М. Текст коду програми для моделювання і статистичної обробки процесу обчислення міжфазних РП СУ для симетрування струмів	147
Додаток Н. Текст коду програми для дослідження чутливості моделі симетрування напруг	152
Додаток О. Текст коду програми для дослідження чутливості моделі симетрування струмів	157

ВСТУП

Актуальність теми. Під електромагнітною сумісністю розуміють здатність електричного обладнання нормально функціонувати в його електромагнітному середовищі і при цьому не створювати недопустимих електромагнітних завад для роботи іншого обладнання, котре функціонує в цьому ж середовищі. При цьому під електромагнітними завадами розуміють не тільки взаємовплив власних електромагнітних полів обладнання, а й погіршення показників якості електроенергії [1]. Забезпечення якості електроенергії на належному рівні – одна з головних задач електроенергетики України.

В останні роки підвищенню якості електроенергії приділяють більше і більше уваги, оскільки якість електроенергії може істотно впливати на її витрати, надійність систем електропостачання, технологічний процес виробництва, економічність роботи електроустановок.

Важливим показником якості електричної енергії є рівень несиметрії напруг і струмів електричних мереж. Несиметричні режими виникають внаслідок впливу несиметричних навантажень: потужних дугових печей, зварювальних установок, тягових навантажень та ін.

Серед заходів і засобів зниження несиметрії напруг і струмів важливе місце займає використання симетрувальних установок (СУ): симетрувальних конденсаторних установок, симетрувальних трансформаторів, статичних тиристорних компенсаторів. Важливим компонентом СУ є система керування. В сучасних системах керування СУ широко використовуються мікропроцесорні пристрої, алгоритми роботи котрих базуються на математичних моделях симетрування напруг і струмів.

Завдяки ряду вітчизняних та зарубіжних вчених Мельникову М. О., Міляху О. М., Шидловському А. К., Кузнецову В. Г., Аввакумову В. Г., Бурбелю М. Й., Варецькому Ю. О., Грибу О. Г., Григор'єву О. С., Сіротіну Ю. О.,

Akagi H., Czarnecki L., Ferrero A., Peng F. Z., Tolbert L. M. відбувся інтенсивний розвиток методів та систем симетрування напруг і струмів в електричних мережах. Однак, математичні моделі систем керування СУ напруг і струмів, можуть бути поліпшені завдяки введенню додаткових критеріїв і умов симетрування.

Таким чином, розробка та удосконалення моделей систем керування СУ є актуальним науковим завданням, що потребує вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень які проводились на кафедрі комп'ютеризованих систем управління та автоматики Житомирського державного технологічного університету (ЖДТУ) відповідно до наукового напрямку «енергетика та енергоефективність» у законі України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки». Дисертаційна робота виконувалася у рамках науково-дослідної роботи №362 «Розробка методики симетрування напруг і навантажень на основі теорії Фризе», № державної реєстрації 0112U005290. Згідно постанови кабінету міністрів України «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року» робота належить до напрямку «технології ефективного енергозабезпечення будівель і споруд».

Автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення якості електроенергії шляхом зменшення несиметрії напруг і струмів за допомогою симетрувальних установок.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено та вирішено такі задачі:

- провести порівняльний аналіз існуючих моделей систем керування симетрувальними установками, з'ясувати їх недоліки і переваги;
- розв'язати задачі симетрування напруг і струмів вузлів електричних мереж у фазних координатах;
- отримати поліпшені моделі систем управління симетрувальними

- установками;
- оцінити похибки обчислення параметрів симетрувальних установок мікропроцесорними пристроями на основі розроблених математичних моделей;
 - дослідити чутливість розроблених математичних моделей;
 - оцінити точність роботи симетрувальних установок, системи керування котрих побудовані на основі розроблених математичних моделей, при симетруванні напруг і струмів шляхом порівняння з відомими результатами експериментальних досліджень;
 - розробити моделі систем керування конденсаторними симетрувальними установками на основі створених математичних моделей.

Об'єктом дослідження є процеси в електричних мережах з несиметричними навантаженнями.

Предметом дослідження є пристрої симетрування струмів і напруг вузлів електричних мереж з несиметричними режимами.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у роботі задач використано методи досліджень, котрі базувались: на теорії математичного моделювання – для отримання математичних моделей систем керування СУ; на теорії лінійної алгебри та теоретичній електротехніці – для отримання аналітичних виразів законів симетрування; на можливостях імітаційного моделювання – при комп'ютерному моделюванні процесів симетрування струмів і напруг у середовищі Matlab; на теорії алгоритмів – для побудови алгоритмів роботи мікропроцесорних засобів керування СУ; на теорії похибок і математичної статистики – для аналізу похибок обчислення параметрів СУ.

Наукова новизна одержаних результатів. В даній роботі було вирішено актуальне наукове завдання поліпшення моделей систем керування симетрувальними установками в електричних мережах з напругою від 0,4 кВ до 10 кВ, зокрема:

1. Вперше сформульовано принцип симетрування напруг компенсаційно-

симетрувальними пристроями, що полягає у використанні аргумента фазних напруг, очікуваних після симетрування, як критерію оптимальності, що збільшує ефективність керуючих рішень та оптимізує процес керування компенсаційно-симетрувальними пристроями.

2. Удосконалено умови керування компенсаційно-симетрувальними пристроями напруг несиметричних навантажень споживачів шляхом використання значень фазних напруг, очікуваних після симетрування, що дозволяє зменшити коефіцієнт зворотної послідовності напруги, у порівнянні із використанням існуючих алгоритмів.

3. Дістав подальшого розвитку метод аналізу чутливості математичних моделей систем керування компенсаційно-симетрувальними пристроями струмів та напруг, розроблених на основі поліпшених законів керування, що дало змогу оцінити точність датчиків, необхідних для практичної реалізації відповідних пристроїв.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в тому, що розроблені принципово нові моделі систем керування СУ та запрограмовані на їх основі контролери систем керування відповідних СУ забезпечують покращення показників якості електроенергії та підвищення надійності роботи електрообладнання.

На основі отриманих в роботі результатів – методів та алгоритмів, вдосконалено комплекс програм підтримки роботи пристроїв керування СУ, який передано для дослідної експлуатації у ТОВ «Феруміна» (акт впровадження від 06.03.2014 р., додаток А) в м. Житомир, у ТОВ «Квадротекс» (акт впровадження від 21.07.2014 р., додаток Б) в м. Житомир. Результати роботи впроваджено також у навчальний процес Житомирського державного технологічного університету (акт впровадження від 1.03.2016 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. В роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належить наступне: [2] – запропоновано підхід для обчислення параметрів, котрі

характеризують якість компенсації реактивної потужності в автоматичних конденсаторних установках; [3, 10, 11] – проаналізовано способи і засоби керування установками компенсації реактивної потужності; [4] – запропоновано варіант моделі системи керування установками компенсації реактивної потужності за критерієм зменшення втрат потужності в радіальних мережах з ефектом симетрування навантаження; [5, 12] – запропоновано модель системи керування установками компенсації реактивної потужності та симетрування струмів у трипровідних мережах; [7] – запропоновано модель системи керування установками симетрування напруг у трифазних мережах; [6, 13] – запропонована методика розрахунку оптимальних значень аргументів очікуваних фазних напруг після їх симетрування [8] – оцінено ефективність роботи установки симетрування напруг, система керування котрої побудована на основі отриманої математичної моделі, у порівнянні з існуючими; [9] – оцінено чутливість математичної моделі системи симетрування напруг, розробленої на основі поліпшених законів керування; [14] – проаналізовано можливості використання середовища Matlab для розробки систем управління компенсаційними симетрувальними установками.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [2 – 14], були отримані у Житомирському державному технологічному університеті.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних в дисертації досліджень доповідались та обговорювались на XXXV і XXXVI науково-практичних міжвузівських конференціях у Житомирському державному технологічному університеті (м. Житомир, 2010-2011 рр.) [10, 11], на XLI регіональній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів Вінницького національного технічного університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (м. Вінниця, 2012 р.), на щорічній науково-технічній конференції молодих вчених та спеціалістів в інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова (м. Київ, 2014 р.) [12], на інтернет-конференції «Розвиток технічних наук на

сучасному етапі» (присвяченій Дню науки) у Житомирському державному технологічному університеті (м. Житомир, 14 травня 2014 р.) [13], на II Українській конференції молодих науковців «Інформаційні технології – 2015» в Київському університеті ім. Бориса Грінченка (м. Київ, 28 травня 2015 р.) [14].

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 8-ох статтях у наукових фахових виданнях, що входять до переліку ДАК України [2 – 9], у тому числі в 3-ох статтях у наукових журналах, які входять у міжнародні наукометричні бази даних [5, 8, 9], з яких 1 входить у реферативну базу даних Scopus [9] та в 5-ох тезах доповідей на конференціях [10 – 14].

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (109 найменувань), 11 додатків. Основний зміст викладений на 113 сторінках друкованого тексту, містить 21 рисунок, 4 таблиці. Загальний обсяг роботи – 161 сторінка.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жежеленко І. В. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання [Текст] / І. В. Жежеленко та ін. – Л.: Національний гірничий університет, 2009. – 319 с.
2. Гніліцький В. В. Компенсація реактивної потужності в мережах з періодичним несинусоїдним струмом [Текст] / В. В. Гніліцький, О. А. Поліщук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2009. – №2(49). – С. 28–32.
3. Гніліцький В. В. Автоматизація керування установками компенсації реактивної потужності [Текст] / В. В. Гніліцький, О. А. Поліщук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2010. – №2(53). – С. 74–78.
4. Гніліцький В. В. Керування установками компенсації реактивної потужності за критерієм зменшення втрат потужності в радіальних мережах [Текст] / В. В. Гніліцький, О. А. Поліщук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2011. – №3(58). – С. 118–122.
5. Гніліцький В. В. Розрахунок компенсації реактивної потужності та симетрування навантаження у трипровідних мережах на основі теорії Фризе [Текст] / В. В. Гніліцький, О. А. Поліщук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №1/8(55). – С. 38–41.
6. Гніліцький В. В. Розрахунок параметрів оптимального симетрування напруг компенсаційними установками у трифазних мережах [Текст] / В. В. Гніліцький, О. А. Поліщук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2012. – №3(62). – С. 32–36.
7. Гніліцький В. В. Розрахунок симетрування напруг у трифазних мережах на основі теорії Фризе [Текст] / В. В. Гніліцький, О. А. Поліщук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2012. – №2(61). – С. 71–74.

8. Гніліцький В. В. Розробка моделі симетрування напруг у трифазних мережах [Текст] / В. В. Гніліцький, О. А. Поліщук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №1/8(73). – С. 11–14.
9. Gnilitzky V. Exploring sensitivity of mathematical model for the system of voltage symmetrization [Text] / V. Gnilitzky, A. Polishchuk, R. Petrosyan // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2016. – №5/8(83). – p.p. 4–8.
10. Гніліцький В. В. Вирішення проблеми несинусоїдності напруги як одне із завдань компенсації реактивної потужності [Текст] / В. В. Гніліцький, О. А. Поліщук // Тези XXXVI науково-практичної міжвузівської конференції. – Житомир, 2011. – С. 124 – 125.
11. Гніліцький В. В. Способи і засоби керування установками компенсації реактивної потужності [Текст] / В. В. Гніліцький, О. А. Поліщук // Тези XXXV науково-практичної міжвузівської конференції. – Житомир, 2010. – С. 45 – 46.
12. Поліщук О. А. Моделі симетрування струмів і напруг на основі теорії Фризе [Текст] / О. А. Поліщук // XXXIII науково-технічна конференція «Моделювання»: Тези доп. – Київ, 2014. – С. 4.
13. Гніліцький В. В. Моделі симетрування струмів і напруг на основі теорії Фризе [Текст] / В. В. Гніліцький, О. А. Поліщук // Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів. – Житомир, 2014. – С. 242 – 243.
14. Поліщук О. А. Використання середовища Matlab для розробки систем управління компенсаційними симетрувальними установками в електричних мережах [Текст] / О. А. Поліщук // Збірник тез II Української конференції молодих науковців «Інформаційні технології – 2015»: Тези доп. – Київ, 2015. – С. 126 – 128.
15. Железко Ю. С. Влияние потребителей на качество электроэнергии в сети и технические условия на его присоединение [Текст] / Ю. С. Железко // Промышленная энергетика. – 1991. – №8. – С. 39 – 41.

16. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях [Текст] / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с.
17. Милях А. Н. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях [Текст] / А. Н. Милях, А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – Киев: Наукова думка, 1973. – 219 с.
18. Чинков В. Н. Методика оценки погрешностей измерителей нелинейных искажений, основанных на цифровой обработке [Текст] / В. Н. Чинков // Український метрологічний журнал. – 2005. – №1. – С. 39 – 43.
19. Кузнецов В. Г. Анализ и прогнозирование несимметрии и несинусоидальности напряжений в системах электроснабжения [Текст] / В. Г. Кузнецов, О. Г. Шполянський // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – 2003. – Ч.4. – С. 88 – 91.
20. Мельников Н. А. Качество напряжения в городских электрических сетях [Текст] / Н. А. Мельников, Н. С. Маркушевич, Л. А. Солдаткина. – М.: Энергия, 1975. – 253 с.
21. Мельников Н. А. Электрические сети и системы [Текст] / Н. А. Мельников – М.: Энергия, 1975. – 462 с.
22. ДСТУ EN 50160-2014. “Національний стандарт України. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах” (на заміну ДСТУ EN 50160-2014). – К.: Мінекономрозвитку України – Чинний з 10. 01. 14.
23. Бабенко О. В. Квасіврівноважені вимірювальні канали для установок симетрування навантажень вузлів електричних мереж [Текст] : дис. ...кандидата техн. наук: 05.14.02: захищ. 25.01.2008 / Бабенко Олексій Вікторович. – Вінниця, 2007. – 183 с.
24. Ермилов М. А. Трансформаторные преобразователи для симметричного питания двухфазных потребителей от трехфазной сети [Текст] / М. А. Ермилов, Ю. М. Куприянович // Промышленная энергетика. – 2005. – №1. – С. 38–41.

- 25.Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 527с.
- 26.Милях А. Н. Симметрирующие устройства с электромагнитными связями. II. Симметрирование однофазной загрузки [Текст] / А. Н. Милях, А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – Киев: ИЭД АН УССР, 1970, – 46 с. – (Препринт-3 / АН УССР. ИЭД).
- 27.Сафонов Л. Н. Об одном способе обеспечения симметрии многофазной системы [Текст] / Л. Н. Сафонов // Электричество. – 1991. – №4. – С. 72–73.
- 28.Сергеенков Б. Н. Электрические машины. Трансформаторы [Текст] / Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселёв, Н. А. Акимова. – М.: Высшая школа, 1989. – 352 с.
- 29.Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
- 30.Жежеленко И. В. Источники интергармоник в системах электроснабжения и методы их расчета [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2003. – №3. – С. 3–19.
- 31.Жежеленко І. В. Теоретичні основи електромагнітної сумісності в системах електропостачання. Частина 2. Технічні засоби поліпшення електромагнітної сумісності: (Навч. посібник) [Текст] / І. В. Жежеленко, Ю. Л. Саєнко. – К.:НМК ВО, 1993. – 104 с.
- 32.Жук Д. О. Зниження високочастотних кондуктивних перешкод в суднових електроенергетичних системах з напівпровідниковими перетворювачами [Текст] : автореф. дис. ...кандидата техн. наук: 05.09.03 / Жук Дмитро Олександрович; ОНПУ. – Одеса, 2005. – 24 с.
- 33.Музиченко О. Д. Сучасний стан та шляхи встановлення відповідальності приймачів за погіршення якості електричної енергії [Текст] / О. Д. Музиченко // Технічна електродинаміка. – 1998. – №1. – С. 61 – 65.
- 34.Жежеленко И. В. Надёжность работы электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии [Текст] / И.В. Жежеленко и др. // Вісник

- Приазовського державного технічного університету. – 2005. – Вип. 15. – С. 25 – 29.
35. Саенко Ю. Л. Влияние несинусоидальных режимов на надёжность электроснабжения [Текст] / Ю. Л. Саенко, А. В. Горпинич // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2000. – Вип. 9. – С. 206 – 210.
36. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок [Текст] / Г. Супронович. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
37. Танкевич Е. Н. Особенности и проблемы измерений электроэнергии при искажении синусоидальности сигналов измерительного канала [Текст] / Е. Н. Танкевич // Метрология электрических измерений в электроэнергетике: II науч. практ. конф. Москва. – Москва, 2002. – С. 38 – 40.
38. Шидловский А. К. Электромагнитная совместимость электроприёмников промышленных предприятий [Текст] / А. К. Шидловский. – К.: Наукова думка, 1992. – 235с.
39. Александров Г. Н. Статический тиристорный компенсатор на основе управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа [Текст] / Г. Н. Александров // Электричество. – 2003. – №2. – С. 38–46.
40. Варецкий Ю. Е. Быстродействующая фазная компенсация несимметричных нагрузок статическими компенсаторами [Текст] / Ю. Е. Варецкий, Ю. А. Кенс, В. Г. Гапанович // Техническая электродинамика. – 1987. – №3. – С. 51–57.
41. Варецкий Ю. О. Режимы электрических сетей і систем електропостачання зі статичними тиристорними компенсаторами (методологія аналізу) [Текст] : дис. ... доктора техн. наук: 05.14.02. / Варецкий Юрій Омелянович – Л., 1999. – 301 с.
42. Лозинський О. Ю. Оптимізація режиму компенсації реактивної потужності об'єктів з динамічним несиметричним навантаженням [Текст] / О. Ю. Лозинський, Я. С. Паранчук // Технічна електродинаміка. – 2004. – №2. – С. 42-49.

43. Матур Р. М. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности [Текст] / Р. М. Матур. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 155 с.
44. Бортник И. М. Статические тиристорные компенсаторы для энергосистем и сетей электроснабжения [Текст] / И. М. Бортник и др. // Электричество. – 1985. – №2. – С. 13-19.
45. Аввакумов В. Г. Вопросы качества электрической энергии тяговых подстанций [Текст] / В. Г. Аввакумов – Омск: Изд-во ОмИИТа, 1970. – 66 с.
46. Мельников Н. А. Симметрирование неполнофазного режима с помощью конденсаторов поперечной компенсации [Текст] / Н. А. Мельников // Электричество. – 1962. – №2. – С. 10–13.
47. Ильяшов В. П. Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок. Изд. 2-ое, перераб и доп. [Текст] / В. П. Ильяшов. – М.: Энергия, 1977. – 104 с.
48. Бурбело М. Й. Умови симетрування електричних навантажень розподільних мереж за допомогою СТАТКОМ [Текст] / М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Лобода // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – №2. – С. 139–144.
49. Глушков В. М. Энциклопедия кибернетики [Текст] / В. М. Глушков и др. – К.: Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1975. – Т.1. – 607 с.
50. Глушков В. М. Энциклопедия кибернетики [Текст] / В. М. Глушков и др. – К.: Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1975. – Т.2. – 619 с.
51. Рогальський Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. II частина [Текст] / Б. С. Рогальський. – Вінниця: ВДТУ, 2006. – 104 с.
52. Fryze S. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems [Text] / S. Fryze // Przegląd Elektrot. – 1931. – № 7. – p.p. 193–203 (In Polish).
53. Варецький Ю. О. Реактивна потужність – означення та компенсація [Текст] / Ю. О. Варецький // Фізичний збірник НТШ. – 1998. – т. 3. – С. 479–489.

54. Peng F. Z. Compensation of non-active current in power systems [Text] / F. Z. Peng, L. M. Tolbert // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2002. – Vol. 45, No 1. – P. 293–297.
55. Czarnecki L. S. Physical interpretation of the reactive power in terms of the CPC Power Theory [Text] / L. S. Czarnecki // Electric Power Quality and Utilization Journal. – 2007. – Vol. XIII, No 1. – P. 87–93.
56. Czarnecki L. S. Powers of asymmetrically supplied loads in terms of the CPC power theory [Text] / L. S. Czarnecki // Electric Power Quality and Utilization Journal. – 2007. – Vol. XIII, No 1. – P. 97–104.
57. Czarnecki L. S. Compensation objectives and CPC-based generation of reference signal for shunt switching compensator control [Text] / L. S. Czarnecki, S. E. Pearce // IET Power Electronics. – 2009. – Vol. 2, No 1. – P. 33–41.
58. Czarnecki L. S. Powers and compensation in circuits with nonsinusoidal voltages and currents (in Polish) Part 4: Current's Physical Components in three-phase unbalanced systems in sinusoidal conditions [Text] / L. S. Czarnecki, A. M. Lopez // On-line Journal Automatyka, Elektryka, Zaklacenja, www.elektro-innowacje.pl. – 2011. – V. 1, No. 4. – P. 57–65.
59. Czarnecki L. S. Comments on “Physical Interpretation of the Reactive Power in Terms of CPC Power Theory Revisited” [Text] / L. S. Czarnecki, P. M. Haley // Electric Power Quality and Utilization Journal. – 2013. – Vol. XVI, No 2. – P. 7 – 9.
60. Czarnecki L. S. Currents' Physical Components (CPC) in Four-Wire Systems with Nonsinusoidal Symmetrical Voltage [Text] / L. S. Czarnecki, P. M. Haley // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. – R. 91, No 6. – P. 48–53.
61. Ferrero A. A new approach to the definition of power components in three-phase systems under nonsinusoidal conditions [Text] / A. Ferrero, G. Superti-Furga // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1991. – Vol. 40, No. 3. – P. 568–577.

62. Czarnecki L. S. Unbalanced power in four-wire systems and its reactive compensation [Text] / L. S. Czarnecki, P. M. Haley // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2014. – Vol. 30, No 1. – P. 53–63.
63. Czarnecki L. S. Effect of supply voltage harmonics on IRP p-q based control of switching compensators [Text] / L. S. Czarnecki // IEEE Trans. on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, No. 2. – P. 483–488.
64. Czarnecki L. S. Comments to the Paper: “Instantaneous p-q Theory for Compensating Nonsinusoidal Systems” [Text] / L. S. Czarnecki // Przegląd Elektrotechniczny (Proc. of Electrical Eng.). – 2009. – R. 85, NR 6. – P. 167–169.
65. Czarnecki L. S. Effect of supply voltage asymmetry on IRP p-q based control of switching compensators [Text] / L. S. Czarnecki // IET on Power Electronics. – 2010. – Vol. 3, No. 1. – P. 11–17.
66. Czarnecki L. S. Constraints of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory [Text] / L. S. Czarnecki // IET Power Electronics. – 2014. – Vol. 7, No 9. – P. 2201–2208.
67. Akagi H. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components [Text] / H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nabae // IEEE Transaction Industry Applications. – 1984. – Vol. 20. No 3. – P. 625–630.
68. Gediminas P. K. The new IEEE Standart Dictionary of electrical and electronics tertms [Text] / P. K. Gediminas / IEEE, New York. – 2015. – P. 1619.
69. Сінолиций А. П. Р-q-теорія миттєвої потужності для пристроїв активної фільтрації. Обмеження застосування [Текст] / А. П. Сінолиций, В. А. Кольсун, В. С. Козлов / «Електротехніка та електроенергетика». – 2013. – № 2. – С. 34–39.
70. Сінолиций А. П. Заходи модернізації р-q-теорії миттєвої потужності для роботи в умовах несинусоїдної несиметричної системи напруг [Текст] / А. П. Сінолиций, В. А. Кольсун, В. С. Козлов / «Електротехніка і електромеханіка». – 2013. – № 5. – С. 65–69.
71. Сіротін Ю. О. Компенсація та облік реактивної потужності в

електротехнічних системах з несиметричними режимами [Текст] : автореф. дис. ...доктора техн. наук: 05.09.03 / Сіротін Юрій Олександрович; НТУ “ХП”. – Харків, 2015. – 35 с.

72. Сиротин Ю. А. Векторная мгновенная мощность и энергетические режимы трехфазных цепей [Текст] / Ю. А. Сиротин // Техническая электродинамика. – 2013. – № 6. – С. 57 – 65.
73. Сиротин Ю. А. Оптимальная компенсация пульсаций при несимметричном напряжении [Текст] / Ю. А. Сиротин // Техническая электродинамика. – 2013. – № 3. – С. 73 – 80.
74. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях [Текст] / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.
75. Бурбело М. Й. Умови керування двофазними симетрувальними установками [Текст] / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 82. – С. 3–7.
76. Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора [Текст] / Минэнерго СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 352 с.
77. Бурбело М. Й. Аналіз втрат потужності в електричних мережах за умов несиметрії та несинусоїдності напруг і струмів [Текст] / М. Й. Бурбело та ін. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – №6. – С. 138–141.
78. Бурбело М. Й. Аналіз алгоритмів керування симетрувальним трансформатором [Текст] / М. Й. Бурбело, Л. Б. Терешкевич, О. В. Бабенко // Вісник Харківського національного технічного університету. – 2005. – Вип. 37. – С. 13–18.
79. Бурбело М. Й. Формування математичних моделей вимірювальних систем установок симетрування [Текст] / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – №6. – С. 242–251.
80. Бурбело М. Й. Оптимізація вимірювальних систем установок симетрування напруги [Текст] / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко // Підвищення рівня

ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: 1 Міжнар. НТК. Луцьк, 26–28 червня 2006 р. – Луцьк, 2006. – С.5–8.

81. Бурбело М. Й. Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування швидкозмінних навантажень трифазних споживачів [Текст] / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2003. – №5. – С. 25–27.
82. Терешкевич Л. Б. Математичні методи керування несиметрією напруг в системах електропостачання [Текст] / Л. Б. Терешкевич, М. І. Цибульський // Техн. електродинаміка. – 2006. – №2. – С. 64 – 67.
83. Бурбело М. Й. Принцип симетрування електричного режиму для вузлів електричної мережі, розділених невеликим опором [Текст] / М. Й. Бурбело та ін. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – №3. – С. 84–88.
84. Терешкевич Л. Б. Математичні моделі керування реактивною потужністю та несиметрією напруги в електричній мережі [Текст] / Л. Б. Терешкевич та ін. // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2010. – Выпуск 32. – С. 406 – 415.
85. Терешкевич Л. Б. Керування реактивною потужністю в умовах несиметрії напруги мережі [Текст] / Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська // «Промелектро». – 2008. – №5. – С. 16 – 20.
86. Игнатъев В. К. Цифровой магнитометр Холла [Текст] / В. К. Игнатъев, А. Г. Протопопов // Измерительная техника. – 2001. – №7. – С. 46–49.
87. Афанасьев В. В. Трансформаторы тока [Текст] / В. В. Афанасьев и др. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 416 с.
88. Миронюк Н. Е. Влияние искажений синусоидальной формы кривых тока и напряжения на погрешности измерительных трансформаторов [Текст] / Н. Е. Миронюк и др. // Электричество. – 2005. – №2. – С. 31–36.
89. Бурбело М. Й. Аналіз похибок вимірювання швидкодіючих систем компенсаційних установок симетрування навантажень за умов несинусоїдності [Текст] / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко // Вісник НУ

- „Львівська політехніка”. Вимірювання та керування. – 2005. – №530. – С. 124–130.
90. Бурбело М. Й. Квазірівноважені частотно-варіаційні вимірювальні системи [Текст] / М. Й. Бурбело. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 225 с.
91. Бурбело М. Й. Особливості побудови вимірювальних систем симетрування R,L,C – навантажень в несинусоїдних режимах [Текст] / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – №2. – С.103–106.
92. Волгин Л. И. Линейные электрические преобразователи для измерительных приборов и систем [Текст] / Л. И. Волгин. – М.: Советское радио, 1971. – 336 с.
93. Волошко А. В. Измерение несимметрии напряжений в электрических сетях [Текст] / А. В. Волошко, О. В. Коцарь // Измерительная техника. – 1989. – №8. – С. 44–45.
94. Герлейн А. Д. К построению измерителей несимметрии трехфазной сети [Текст] / А. Д. Герлейн // Изв. вузов Энергетика. – 1985. – №2. – С. 41 – 43.
95. Горлач А. А. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике [Текст] / А. А. Горлач, М. Я. Минц, В. Н. Чинков. – К.: Техніка, 1985. – 151 с.
96. Лейтман М. Б. Компенсационные измерительные преобразователи электрических величин: (Монография) [Текст] / М. Б. Лейтман, А. М. Мелик-Шахназаров. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.
97. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые) [Текст] / П. П. Орнатский. – Киев: Вища школа, 1986, – 504 с.
98. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники [Текст] / П. П. Орнатский. – Киев: Вища школа, 1973, – 373 с.
99. Штамбергер Г. А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравнивания) [Текст] / Г. А. Штамбергер. – Новосибирск: Наука, 1972. – 164 с.
100. Карташев И. И. Приборы для контроля и анализа качества электроэнергии [Текст] / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов // Мир измерений. –

2002. – №5-6. –С.4-10.

101. Сайт компанії Енергометрика. – Режим доступу:
<http://www.energometrika.ru>.
102. Рабинович З. Л. Типовые операции в вычислительных машинах [Текст] / З. Л. Рабинович, В. А. Раманаускас. – К.: Техніка, 1980. – 264 с.
103. Meggitte I. E. Pseudodivision and pseudomultiplication process [Text] / I. E. Meggitte // “IBM J. Res. Develop”, v. 6. – 1962. – № 2.
104. Volder J. E. The CORDIC trigonometric computing technique [Text] / J. E. Volder // “IRE Trans. Electronic Comput”, v. 8. – 1959. – № 3.
105. Байков В. Д. Аппаратурная реализация элементарных функций в ЦВМ [Текст] / В. Д. Байков, В. Б. Смоллов. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1975.
106. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов, т.1 [Текст] / Н. С. Пискунов. – М.: Наука, 1985. – 432 с.
107. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 832 с.
108. Лежнюк П. Д. Натурно-імітаційна модель оцінки чутливості втрат потужності в електроенергетичних системах до транзитних перетікань [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. Б. Бурикін, В. О. Лесько // Інформаційні технології та компютерна інженерія. – 2008. – № 1(11). – С. 83–87.
109. Лежнюк П. Д. Чутливість втрат потужності у вітках схеми електроенергетичної системи до збурень у вузлах [Текст] / П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 6. – С. 63–66.