

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Гапон Дмитро Анатолійович

УДК 621.31

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ
КОМПЛЕКСІВ ТА СИСТЕМ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи
14 – електрична інженерія
галузь знань

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

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

_____Д.А. Гапон

Науковий консультант
Гриб Олег Герасимович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Гапон Д.А. Методи та засоби аналізу якості електропостачання та електромагнітної сумісності електротехнічних комплексів та систем. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи». – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2019.

У дисертаційній роботі вирішується важлива науково-технічна проблема підвищення якості електропостачання електротехнічних об'єктів, комплексів та систем і забезпечення їх електромагнітної сумісності шляхом розвитку математичного та апаратного забезпечення систем обліку електроенергії з урахуванням енергетичної ефективності режимів електроспоживання і виявлених порушень меж електромагнітної сумісності з боку постачальника електричної енергії або її споживача.

У вступі визначено існуючу проблему і обґрунтовано актуальність теми дисертації, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і завдання наукового дослідження, розглянуто об'єкт та предмет досліджень, наведено перелік методів дослідження, що застосовувалися для досягнення поставленої мети роботи. Викладено наукову новизну й практичну значущість отриманих результатів, наведено дані про публікації й апробацію результатів роботи, охарактеризовано особистий внесок здобувача, надано відомості про впровадження результатів роботи.

У першому розділі на підставі вивчення та систематизації результатів аналізу матеріалів з відкритих джерел сформульовані основні недоліки існуючих методів оцінки якості електропостачання та нормативної бази, яка не дозволяє у повному обсязі вирішувати конфліктні ситуації при виникненні порушень меж електромагнітної сумісності у розрізі електропостачальник - споживач. Також розглянуті методи визначення відповідальності за погіршення якості електричної енергії та окремих її показників.

У другому розділі проведено аналіз типової схеми електропостачання, що дозволило зробити висновки та отримати основні числові характеристики системи електропостачання трифазного електротехнічного об'єкту з напругою живлення 10 кВ. За допомогою комп'ютерної моделі показано взаємний вплив декількох споживачів на показники якості напруги у точці приєднання та проаналізовано вплив параметрів системи електропостачання ці показники. Показано, що визначення джерела вищих гармонік за напрямком складової потужності вищої гармоніки не дозволяє гарантовано виділити споживача з нелінійним навантаженням у разі якщо кількість таких споживачів більша за одного. Також проаналізовано сумісність стандартів EN 50160 та IEEE 519 з точки зору норми рівнів гармонійних складових у складі струму та напруги. Отримані результати дозволяють говорити про наявність окремих моментів в яких вищі гармонійні складові струму, що генерує споживач не порушуючи меж стандарту IEEE 519, можуть викликати наявність гармонік напруги що перевищують норми установлені EN 50160. Також зроблено висновки щодо встановлення обмежень генерації вищих гармонійних складових за допомогою нормованих значень опору системи.

У третьому розділі запропоновано подальший розвиток математичного апарату визначення коефіцієнтів потужності та втрат, як показників якості електроспоживання, зокрема обґрунтовані визначення інтегральних коефіцієнтів втрат для трифазних трипровідних та чотирьохпровідних мереж.

Отримала подальший розвиток теорія «еталонного» споживача. Показано, що в трифазній трипровідній мережі еталонним споживачем незалежно від параметрів напруги є симетричний трикутник постійних активних опорів. Показано, що в трифазній чотирьохпровідній системі еталонним споживачем незалежно від параметрів напруги є поєднання симетричного трикутника постійних активних опорів і симетричної зірки, опір в гілках якої в стільки ж разів більше опорів трикутника, у скільки разів активний опір провіднику нейтралі більше опору фазних провідників.

Вперше запропоновано математичний апарат виділення окремих складових із загальних коефіцієнтів потужностей та втрат за такими типами спотворень як несиметрія, нелінійність, реактивність та нестационарність.

Запропоновано концепцію еталонного реактивного споживача з умов максимуму потужності або мінімуму втрат при рівності співвідношень перетоків потужності від і до споживача, що дозволяє реалізувати обчислення коефіцієнту реактивності та потужності при довільній формі напруги у однофазних та трифазних мережах. Показано, що при такій постановці еталонний реактивний споживач тяжіє до генерації вищих гармонік і не має зручного аналітичного або чисельного рішення для порівняння з поточним споживачем. Запропоновано концепцію середньореактивного споживача, у якого усі гармоніки мають рівне співвідношення перетікань потужності до і від споживача, що дозволяє реалізувати порівняння режиму електроспоживання поточного споживача з таким середньореактивним.

Запропоновано методику оцінки коефіцієнтів втрат і потужності від несиметрії для трифазного споживача при довільній напрузі. Запропоновано методику оцінки співвідношення коефіцієнтів втрат від реактивності і нелінійності споживача шляхом поділу відповідних гармонік струму Фризе у напрямку активної складової. Запропоновано методику оцінки коефіцієнтів втрат і потужності від нестационарності споживання.

У четвертому розділі проведено аналіз характеру комплексного опору електричної мережі в залежності від параметрів її елементів для типових випадків підключення споживачів на напрузі 10 КВ. Отримана залежність дозволяє говорити про можливе застосування нормованих значень для оцінки пропускної здатності мережі.

Набув подальшого розвитку метод вимірювання електричних параметрів трифазної мережі заснований на апроксимації вхідного сигналу сумою гармонійних складових. Особливостями методу є автоматичне підстроювання по частоті і тривалості інтервалу спостереження у заданому діапазоні, використання повного набору напруг фаз (або лінійних) при визначенні частоти

з урахуванням їх вагових значень, що дозволяє зменшити похибки вимірювання у складних умовах – при наявності несиметрії, вищих гармонік, аперіодичної складової або при відсутності напруги у окремій фазі. Крім того, метод вимірювання використовує постійну частоту квантування вхідних цифрових даних, що дозволяє спростити апаратну частину приладу.

Запропоновано метод обчислення діючих значень з точною прив'язкою до періоду напруги, одержуваного попереднім методом, що дозволяє виключити частотну похибку при вимірюванні незалежно від розташування початку та закінчення інтервалу спостереження відносно відліків вхідного цифрового сигналу.

Запропоновано систему обліку електричної енергії з використанням показників якості електричної енергії та ефективності електроспоживання. Особливістю системи є додатковий облік втрат на передачу електричної енергії шляхом порівняння характеристик електроспоживання поточного споживача з такими для еталонного споживача, тобто використання коефіцієнтів втрат або потужності. Такий метод обліку дозволяє коректно тарифікувати всі відхилення в режимах роботи навантаження, такі як реактивність, нелінійність і нестационарність. Запропоновано систему штрафних санкцій за погіршення якості електричної енергії, заснована на підрахунку «штрафної» енергії в разі, якщо споживач порушує норми електроспоживання і «нетарифікованої» енергії, в разі коли порушень з боку споживача немає, але якість електроенергії не відповідає нормам. Запропоновано основи тарифікації на базі даної системи обліку електроенергії.

У п'ятому розділі експериментально отримані дані, що підтверджують теоретичні положення розділів 3 та 4. Зокрема були реалізовані оцінки якості електроспоживання шляхом порівняння з набором еталонних споживачів.

Експеримент показав можливість успішного застосування виділення струму Фрізе і його подальшого аналізу з метою оцінки якості електроспоживання. При цьому можливе паралельне використання його трифазної і однофазної реалізацій для оцінки несиметрії, нелінійності і

реактивності відповідно. Запропонована в розділі 3 методика порівняння з еталонним середнереактивним споживачем не виявила себе в якості ефективного інструменту аналізу і не представляється перспективною.

У той же час поділ гармонійних складових струму Фрізе у напрямку їх активної складової дозволяє ефективно відстежувати джерело походження струмів вищих гармонік. Визначені вище методи з використанням моделі фрагменту енергосистеми з різними типами навантаження підтвердили коректність розроблених методів оцінки якості електроспоживання. Випробування за допомогою осцилограм, отриманих на реальних трифазних навантаженнях (тягової підстанції) також підтвердило працездатність та ефективність розроблених методів оцінки. В моделях з перевищенням допустимих режимів, використання математичного апарату розробленого в розділі 4 дозволило виявити джерело спотворень, навіть за умови коли одночасно декілька споживачів виступають в якості джерел цих спотворень.

Ключові слова: електротехнічна система, система електропостачання, втрати електричної енергії, коефіцієнт потужності, коефіцієнт втрат, електромагнітна сумісність, коефіцієнт перевищення, якість електроенергії, енергетичні показники.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гапон Д. А., Сокол Е. И., Жаркин А. Ф., Васильченко В. И., Тесик Ю. Ф., Ущаповский К. В., Светелик А. Д., Гриб О. Г., Громадский Ю. С., Иерусалимова Т. С., Олефир Д. А., Шевченко С. Ю., Новский В. А. Качество электрической энергии Том 2 Контроль качества электрической энергии: монография: Харьков: ПП «Граф-Ікс», 2014. 244с.
Здобувачем досліджені сучасні методи вимірювання параметрів електричної енергії.
2. Гапон Д. А., Сокол Е. И., Гриб О. Г., Жаркин А. Ф., Сендерович Г. А., Ущаповский К. В., Олифер Д. А., Васильченко В. И., Тесик Ю. Ф.,

Цыганкова Н. В., Громадский Ю. С., Новский В. А., Рудевич Н. В. Автоматизированные системы контроля и учета электрической энергии□: монография: Харьков: ТОВ «Тім Пабліш Груп», 2014. 488с.

Здобувачем проведений аналіз використання сучасних мікропроцесорних засобів у системах контролю та обліку електроенергії.

3. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Жданов Р. В., Зуев А. А. Метод виділення імпульсів напруги при виконанні аналізу якості електричної енергії. Вісник НТУ «ХПІ». Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2013. № 15 (988). С. 139–144.

Здобувачем розроблений метод «маскування» при виділенні імпульсів.

4. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Жданов Р. В., Зуев А. А. Современное аппаратное обеспечение устройств учета и мониторинга показателей качества электрической энергии. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2013. Т. 4, № 13. С. 90–95.

Здобувачем удосконалений метод синхронізації декількох аналого-цифрових перетворювачів.

5. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Жданов Р. В., Зуев А. А. Измерение частоты промышленной сети как показателя качества электрической энергии. Вестник НТУ «ХПИ». Энергетика: надежность и энергоэффективность. 2013. № 17 (990). С. 45–50.

Здобувачем сформульовані основні вимоги при вимірюванні промислової частоти як показника якості електричної енергії.

6. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Жданов Р. В., Зуев А. А. Проблемы качества электроэнергии питающей сети при подключении устройства с активным преобразователем. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2013. № 2. С. 87–89.

Здобувачем зроблені висновки щодо можливих причин виникнення високого рівню вищих гармонійних складових напруги.

7. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Жданов Р. В., Зуев А. А. Метод измерения показателей качества и энергопотребления в электрических сетях. Наукові

праці Донецького національного технічного університету. Серія “Електротехніка і енергетика.” 2013. № 2(15). С. 83–87.

Здобувачем проведені експериментальні вимірювання декількома методами з різною довжиною інтервалу спостереження.

8. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Белов Н. С., Иерусалимова Т. С., Лелека А. В. Автоматизированная система телеуправления энергообъектом при низком качестве электроэнергии. Вестник НТУ “ХПИ”. Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. 2014. № 41 (1084). С. 71–77.

Здобувачем проведений аналіз, побудовано графіки та діаграми параметрів якості електричної енергії.

9. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Жданов Р. В., Иерусалимова Т. С. Проблемы обеспечения синхронизации измерений при определении оценки соответствия качества электрической энергии. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 6/8 (72). С. 4–9.

Здобувачем зроблені висновки щодо можливості забезпечення синхронізації відповідно до групи стандартів МЕК 61000-4.

10. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Жданов Р. В. Експериментальне порівняння методів вимірювання рівня гармонійних складових сигналу напруги промислової мережі Красноградського району Харківської області. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2014. № 153. С. 90–92.

Здобувачем написана та застосована програма експериментального порівняння методів вимірювань рівнів гармонійних складових.

11. Гапон Д. А., Васильченко В. І., Гриб О. Г., Лелека О. В., Іерусалімова Т. С. Цифрова підстанція складова системи Smart Grid. Електротехніка і Електромеханіка. 2014. № 6. С. 72–76.

Здобувачем проаналізовано застосування цифрових стандартів передачі даних для автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії.

12. Гапон Д. А., Попов С. В., Черемисин Н. М., Мирошник А. А. Распознавание образа искаженного электрического сигнала в распределительных сетях с использованием вейвлет-анализа и нейросетевого моделирования. Энергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. 2014. № 2. С. 69–75.

Здобувачем застосовано апарат вейвлетів для виділення перехідних подій у електричній мережі.

13. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Шевченко С. Ю., Белов Н. С., Иерусалимова Т. С. Автоматизированная система контроля уровня перенапряжений и качества электрической энергии. Вісник НТУ «ХП». Энергетика: надійність та енергоефективність. 2014. № 56. С. 45–50.

Здобувачем зроблений аналіз та побудовано графіки вимірювань якості на об'єкті.

14. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Сіротін Ю. О., Ієрусалімова Т. С., Дяченко О. В., Бортніков О. В. Аналіз споживання електроенергії з контролем якості в розподільних мережах. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2015. № 165. С. 9–10.

Здобувачем зроблений аналіз та побудовано графіки вимірювань якості на об'єкті.

15. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Сиротин Ю. А., Иерусалимова Т. С., Дяченко А. В. Мониторинг качества электроэнергии на цифровых подстанциях. Вестник НТУ “ХПИ”. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. 2015. № 12 (1121). С. 316–319.

Здобувачем удосконалений метод синхронізації приладів вимірювання за протоколом IEEE 1588.

16. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Ієрусалімова Т. С., Белов М. С., Лелека О. В. Аналіз нормативної бази по проектуванню побудові системи " SMART GRID" яка базується на цифрових підстанціях. Вісник НТУ «ХП». Електроенергетика та перетворювальна техніка. 2015. № 19 (1128). С. 74–78.

Здобувачем проаналізовано використання стандарту IEC 61850 у складі

цифрової підстанції.

17. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Шевченко С. Ю., Сіротін Ю. О., Ієрусалімова Т. С., Дяченко О. В. Живлення трансформаторної підстанції 330/110 кВ при наявності в лініях електропередач вищих гармонік. Вісник НТУ «ХП». Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2015. № 42 (1151). С. 59–61.

Здобувачем побудовані та проаналізовані діаграми за результатами вимірювань показників якості електроенергії.

18. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Ієрусалімова Т. С., Бородин Д. В., Дяченко А. В. Мониторинг качества электрической энергии на вводе тяговой подстанции. Електротехніка і Електромеханіка. 2015. № 6. С. 61–65.

Здобувачем побудовані та проаналізовані графіки і діаграми за результатами вимірювань показників якості електроенергії.

19. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Ієрусалімова Т. С., Бєлов М. С., Лелека О. В. Моніторинг споживання електроенергії з контролем якості. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2016. № 2. С. 39–44.

Здобувачем побудовані та проаналізовані графіки і діаграми за результатами вимірювань показників якості електроенергії.

20. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Шевченко С. Ю., Лелека А. В., Ієрусалімова Т. С. Система диспетчерского управления и контроля технологическими процессами на базе цифровых подстанций. Вісник НТУ «ХП». Енергетика: надійність та енергоефективність. 2016. № 3 (1175). С. 43–47.

Здобувачем проаналізовано використання стандарту IEC 61850 у складі цифрової підстанції.

21. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Шевченко С. Ю., Ієрусалімова Т. С., Сєдова О. О. Дослідження високочастотних перенапруг, що виникають в мережі. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2016. № 175. С. 49–50.

Здобувачем проаналізовано спотворення форми синусоїди струму та напруги на ізоляторах.

22. Gapon, D.A.; Bederak Y. S. Guaranteeing the trouble-free operation of capacitor banks in power-supply systems of industrial enterprises. Електротехніка і Електромеханіка. 2016. № 1. С. 56–58.

Здобувачем зроблені висновки щодо причин резонансних явищ у електротехнічних системах та запропоновано шляхи їх уникнення.

23. Гапон Д. А., Тихоненко С. В., Громадський Ю. С., Савицький С. М. Обґрунтування впровадження споживача-регулятора для керування електричного навантаження в системі електропостачання. Технологический аудит и резервы производства. 2016. № 2 (1). С. 22–26.

Здобувачем запропонований розрахунок графіку навантаження при обчисленні та виборі тарифу на електричну енергію.

24. Гапон Д. А., Сокол Е. И., Сиротин Ю. А., Иерусалимова Т. С., Гриб О. Г., Шве́ц С. В. Развитие теории мгновенной мощности трехфазной сети в условиях сетецентризма. Електротехніка і Електромеханіка. 2017. № 4. С. 61–65.

Здобувачем удосконалено визначення щодо збалансованого та незбалансованого режиму трифазної мережі.

25. Гапон Д. А., Сокол Е. И., Сиротин Ю. А., Иерусалимова Т. С., Гриб О. Г., Шве́ц С. В. Сетецентрические технологии управления режимами работы трехфазной сети. Електротехніка і Електромеханіка. 2017. № 3. С. 67–71.

Здобувачем запропоноване виділення струмів при аналізі режимів роботи мережі.

26. Гапон Д. А., Сиротин Ю. А., Гриб О. Г., Иерусалимова Т. С., Шве́ц С. В. Учет неактивных составляющих полной мощности. Вісник НТУ «ХП». Гідравлічні машини та гідроагрегати. 2017. № 22. С. 71–76.

Здобувачем описаний базис при виділенні струму компенсації нульові складової миттєвої потужності.

27. Gapon D., Bederak Y., Zuev A. Method of determining the parameters of an equivalent asynchronous electric motor in real time. Advanced Information Systems. 2018. Т. 2, № 3. С. 123–127.

Здобувачем запропонований алгоритм зваженого об'єднання групи асинхронних двигунів.

28. Гапон Д. А., Сокол Е. И., Жаркин А. Ф., Самойленко И. А., Васильченко В. И., Ущаповский К. В., Светелик А. Д., Гриб О. Г., Громадский Ю. С., Иерусалимова Т. С., Олефир Д. А., Шевченко С. Ю., Новский В. А. Качество электрической энергии Том 1 Экономико-правовая база Качества электрической энергии в Украине и Евросоюзе□: монография: Харьков: ПП «Граф-Ікс», 2014. 300с.

Здобувачем проаналізовано використання групи стандартів ІЕС 61000 при визначенні показників якості електроенергії.

29. Гапон Д. А., Светелик А. Д., Гусельников В. К., Васильченко В. И., Ущаповский К. В., Сендерович Г. А., Гриб О. Г., Громадский Ю. С., Сапрыка А. Д., Гусельников А. В., Олефир Д. А. Средства измерительной техники в электроэнергетике Том 1 Средства измерения электрических величин: монография: Харьков: «Типография Мадрид», 2014. 744с.

Здобувачем запропоновано використання аналого-цифрових перетворювачів з внутрішньою гальванічною розв'язкою для вимірювання параметрів напруг та струмів мережі.

30. Гапон Д. А., Сокол Е. И., Сиротин Ю. А., Гриб О. Г., Сыченко Д. А., Босый Д. А., Швец С. В., Баженов В. М., Иерусалимова Т. С., Лисиченко Р. Н. Учет и компенсация реактивной мощности при несимметричных режимах работы систем электроснабжения□: монография: Харьков: ФОП Панов А.Н., 2017. 290с.

Здобувачем запропоновано використання струмів Fryze.

31. Гапон Д. А. Вибір методу вимірювання частоти промислової мережі при дослідженнях показників якості електричної енергії. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2013). 2013. Т. 2. С. 186.

Здобувачем описані особливості різних методів вимірювання частоти промислової мережі.

32. Гапон Д.А. Проблеми застосування дискретного перетворення Фур'є для спостереження показників якості електричної енергії. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2014). 2014. Т. 2. С. 209.

Здобувачем описано проблему синхронізації при вимірюванні гармонійного складу за допомогою дискретного перетворення Фур'є.

33. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Иерусалимова Т. С., Дяченко А. В. Измерение отклонения частоты. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2015): наук. вид.: тези доп. 23-ї міжнар. наук.-практ. конф. 2015. С. 149.

Здобувачем описано особливості методів вимірювання відхилення частоти промислової мережі.

34. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Иерусалимова Т. С., Дяченко А. В. Мониторинг качества электрической энергии в системах электротранспорта. Електрифікація транспорту “ТРАНСЕЛЕКТРО–2015” матеріали 8-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 29 вересня–2 жовтня 2015 р., м. Одеса.–Дніпропетровськ. 2015. С. 24- 25.

Здобувачем зроблені висновки щодо особливостей показників якості електроенергії на тяговій підстанції.

35. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Шевченко С. Ю., Иерусалимова Т. С., Бортников А. В. Влияние высших гармоник на электрооборудование высоковольтных подстанций. Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали Всеукр. наук.-техн. конфер., 10-11 грудня 2015 р. 2015. С. 197–198.

Здобувачем зроблені висновки щодо можливості пошкодження обладнання підстанції внаслідок наявності вищих гармонійних складових у струмі та напрузі.

36. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Белов Н. С., Актуальность внедрения сетецентрического управления электроэнергетическим комплексом

України. Актуальні проблеми автоматики та приладобудування□: матеріали 3-ї Всеукр. наук.-техн. конф., 8-9 грудня 2016 р. 2016. С. 192–193.
Здобувачем проаналізовано перспективність автоматизованих комплексів керування з урахуванням якості електричної енергії.

37. Гапон Д. А. Причини погіршення якості електричної енергії при використанні активних частотних перетворювачів. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ (18-20 травня 2016р., Харків). 2016. Т. 2. С. 146.

Здобувачем показані проблеми вищих гармонік, що виникають внаслідок несправностей частотного перетворювача.

38. Гапон Д. А., Иерусалимова Т. С., Дяченко А. В., Швець С. В. Анализ высших гармоник напряжения в трехфазных сетях. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я Тези доповідей MicroCAD-2017 Ч.ІІ. 2017. С. 194.

Здобувачем запропоновано визначення джерел вищих гармонійних складових у мережах.

39. Гапон Д. А., Бортніков О. В., Швець С. В. Актуальні питання режимів роботи трифазних електричних мереж. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2013. 2018. № 2. С. 133.

Здобувачем запропоновано формулювання проблеми неякісного електропостачання.

40. Гапон Д. А., Рудевич Н. В. Резонансні явища у енергосистемі як причина пошкодження електрообладнання. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: наук. вид. тези доп. 27-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2019, [15-17 травня 2019 р.] Ч. ІІ. 2019. Т. 2. С. 139.

Здобувачем запропоновані шляхи подолання резонансних явищ у електричних мережах.

ABSTRACT

Gapon DA Methods and means of power supply quality analysis and electrical complexes and systems electromagnetic compatibility. - Manuscript. The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.09.03 - "Electrotechnical complexes and systems". - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2019.

In the dissertation the important scientific and technical problem of increase of quality of power supply of electrotechnical objects, complexes and systems and maintenance of their electromagnetic compatibility by development of mathematical and hardware of systems of the account of the electric power taking into account energy efficiency of modes of power consumption and the revealed infringements of electromagnetic compatibility energy or its consumer.

In the introduction the existing problem is defined and the urgency of the dissertation topic is substantiated, the connection of work with scientific programs, plans, themes is given, the purpose and tasks of scientific research are formulated, the object and subject of researches are considered, the list of research methods applied for achievement of the set purpose is given. work. The scientific novelty and practical significance of the obtained results are stated, the data on publications and approbation of the results of the work are given, the personal contribution of the applicant is characterized, the information on the implementation of the results of the work is given.

In the first section, based on the study and systematization of the results of analysis of materials from open sources, the main shortcomings of existing methods of assessing the quality of electricity supply and regulatory framework, which does not fully resolve conflict situations in violation of electromagnetic compatibility in terms of electricity supplier - consumer. Methods for determining the responsibility for the deterioration of electricity quality and its individual indicators are also considered.

The second section analyzes the typical power supply scheme, which allowed to draw conclusions and obtain the main numerical characteristics of the power supply system of a three-phase electrical facility with a supply voltage of 10 kV. The computer model shows the mutual influence of several consumers on the quality indicators of the voltage at the point of connection and analyzes the influence of the parameters of the power supply system, these indicators. It is shown that the definition of the source of higher harmonics in the direction of the component power of the higher harmonic does not guarantee to allocate a consumer with a nonlinear load if the number of such consumers is greater than one. The compatibility of EN 50160 and IEEE 519 standards in terms of the norm of levels of harmonic components in the composition of current and voltage is also analyzed. The obtained results allow to speak about the presence of certain moments in which the higher harmonic components of the current generated by the consumer without violating the IEEE 519 standard can cause the presence of voltage harmonics exceeding the norms set by EN 50160. It is also concluded that the generation of higher harmonic components system resistance values.

The third section proposes further development of the mathematical apparatus for determining power and loss coefficients as indicators of power consumption quality, in particular, the determination of integrated loss coefficients for three-phase three-wire and four-wire networks is substantiated.

The theory of the "reference" consumer was further developed. It is shown that in a three-phase three-wire network the reference consumer, regardless of the voltage parameters, is a symmetrical triangle of constant active resistances. It is shown that in a three-phase four-wire system the reference consumer, regardless of voltage parameters, is a combination of a symmetric triangle of constant active resistances and a symmetric star, the resistance in the branches of which is as many times the resistance of the triangle as the active resistance of the neutral conductor.

For the first time, a mathematical apparatus for selecting individual components from the total power and loss coefficients for such types of distortions as asymmetry, nonlinearity, reactivity and nonstationarity has been proposed.

The concept of the reference reactive consumer from the conditions of maximum power or minimum losses at equality of ratios of power flows from and to the consumer is offered, that allows to realize calculation of coefficient of reactivity and power at any form of voltage in single-phase and three-phase networks. It is shown that in such a statement the reference reactive consumer tends to generate higher harmonics and does not have a convenient analytical or numerical solution for comparison with the current consumer. The concept of the average reactive consumer is proposed, in which all harmonics have an equal ratio of power flows to and from the consumer, which allows to compare the current consumption mode of the current consumer with such an average reactive one.

A method for estimating the coefficients of loss and power from asymmetry for a three-phase consumer at arbitrary voltage is proposed. A method for estimating the ratio of the coefficients of losses from reactivity and nonlinearity of the consumer by dividing the corresponding harmonics of the Frieze current in the direction of the active component is proposed. A method for estimating the coefficients of losses and power from non-stationary consumption is proposed.

In the fourth section the analysis of character of complex resistance of an electric network depending on parameters of its elements for typical cases of connection of consumers on voltage of 10 KV is carried out. The obtained dependence allows us to talk about the possible use of normalized values to estimate network bandwidth.

The method of measuring the electrical parameters of a three-phase network based on the approximation of the input signal by the sum of harmonic components has been further developed. Features of the method are automatic adjustment of the frequency and duration of the observation interval in a given range, the use of a complete set of phase voltages (or linear) in determining the frequency taking into account their weight values, which reduces measurement errors in difficult conditions - in the presence of asymmetry, higher harmonics, aperiodic component or in the absence of voltage in a separate phase. In addition, the measurement method uses a

constant quantization frequency of the input digital data, which simplifies the hardware of the device.

A method of calculating the current values with a precise reference to the voltage period obtained by the previous method is proposed, which eliminates the frequency error in the measurement regardless of the location of the beginning and end of the observation interval relative to the input digital signal.

The system of the account of electric energy with use of indicators of quality of electric energy and efficiency of electric consumption is offered. A feature of the system is the additional accounting of losses for the transmission of electricity by comparing the characteristics of electricity consumption of the current consumer with those for the reference consumer, ie the use of loss factors or power. This method of accounting allows you to correctly rate all deviations in the modes of load, such as reactivity, nonlinearity and nonstationarity. A system of penalties for deterioration of electricity quality is proposed, based on the calculation of "penalty" energy if the consumer violates the norms of electricity consumption and "non-tariffed" energy, if there are no violations by the consumer, but the quality of electricity does not meet the norms. The basics of billing on the basis of this electricity metering system are proposed.

In the fifth section, the data confirming the theoretical provisions of sections 3 and 4 were experimentally obtained. In particular, estimates of the quality of electricity consumption were implemented by comparison with a set of reference consumers.

The experiment showed the possibility of successful application of Frieze current generation and its subsequent analysis to assess the quality of electricity consumption. At the same time parallel use of its three-phase and single-phase implementations for an estimation of asymmetry, nonlinearity and reactivity accordingly is possible. The method of comparison with the reference average reactive consumer proposed in section 3 has not proved to be an effective tool of analysis and does not seem promising.

At the same time, the separation of the harmonic components of the Frieze current in the direction of their active component allows you to effectively track the source of currents of higher harmonics. The above methods using the model of a fragment of the power system with different types of load confirmed the correctness of the developed methods for assessing the quality of electricity consumption. Tests using oscillograms obtained on real three-phase loads (traction substation) also confirmed the efficiency and effectiveness of the developed assessment methods. In models with exceeding the permissible modes, the use of the mathematical apparatus developed in Section 4 allowed to identify the source of distortion, even if several consumers act as sources of these distortions at the same time.

Keywords: electrical system, power supply system, power losses, power factor, loss factor, electromagnetic compatibility, excess factor, power quality, energy indicators.

LIST OF PUBLISHER PUBLICATIONS

1. Gapon D. A., Sokol E. I., Zharkin A. F., Vasilchenko V. I., Tesik Yu. F., Ushchapovskiy K. V., Svetelik A. D., Grib O. G., Gromadskiy Yu. S., Ierusalimova T. S., Olefir D. A., Shevchenko S. Yu., Novskiy V. A. Kachestvo elektricheskoy energii Tom 2 Kontrol kachestva elektricheskoy energii: monografiya: Kharkov: PP «Graf-Iks». 2014. 244c.
2. Gapon D. A., Sokol E. I., Grib O. G., Zharkin A. F., Senderovich G. A., Ushchapovskiy K. V., Olifer D. A., Vasilchenko V. I., Tesik Yu. F., Tsygankova N. V., Gromadskiy Yu. S., Novskiy V. A., Rudevich N. V. Avtomatizirovnyye sistemy kontrolya i ucheta elektricheskoy energii?: monografiya: Kharkov: TOV «Tim Pablish Grup». 2014. 488c.
3. Gapon D. A., Grib O. G., Zhdanov R. V., Zuyev A. A. Metod vidilennya impulsiv naprugi pri vikonanni analizu yakosti elektrichnoï energii. Visnik NTU «KhPI». Problemi udoskonalyuvannya elektrichnikh mashin i aparativ. Teoriya i praktika. 2013. № 15 (988). C. 139–144.

4. Gapon D. A., Grib O. G., Zhdanov R. V., Zuyev A. A. Sovremennoye apparatnoye obespecheniye ustroystv ucheta i monitoringa pokazateley kachestva elektricheskoy energii. Pratsi Tavriyskogo derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu. 2013. T. 4. № 13. С. 90–95.
5. Gapon D. A., Grib O. G., Zhdanov R. V., Zuyev A. A. Izmereniye chastoty promyshlennoy seti kak pokazatelya kachestva elektricheskoy energii. Vestnik NTU “KhPI”. Energetika: nadezhnost i energoeffektivnost. 2013. № 17 (990). С. 45–50.
6. Gapon D. A., Grib O. G., Zhdanov R. V., Zuyev A. A. Problemy kachestva elektroenergii pitayushchey seti pri podklyuchenii ustroystva s aktivnym preobrazovatelem. Optiko-elektronni informatsiyno-energetichni tekhnologii. 2013. № 2. С. 87–89.
7. Gapon D. A., Grib O. G., Zhdanov R. V., Zuyev A. A. Metod izmereniya pokazateley kachestva i energopotrebleniya v elektricheskikh setyakh. Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya “Elektrotekhnika i energetika.” 2013. № 2(15). С. 83–87.
8. Gapon D. A., Grib O. G., Belov N. S., Ierusalimova T. S., Leleka A. V. Avtomatizirovannaya sistema teleupravleniya energoobyektom pri nizkom kachestve elektroenergii. Vestnik NTU “KhPI”. Problemy usovershenstvovaniya elektricheskikh mashin i apparatov. Teoriya i praktika. 2014. № 41 (1084). С. 71–77.
9. Gapon D. A., Grib O. G., Zhdanov R. V., Ierusalimova T. S. Problemy obespecheniya sinkhronizatsii izmereniy pri opredelenii otsenki sootvetstviya kachestva elektricheskoy energii. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. 2014. № 6/8 (72). С. 4–9.
10. Gapon D. A., Hryb O. H., Zhdanov R. V. Eksperymentalne porivniannia metodiv vymiriuvannia rivnia harmoniinykh skladovykh syhnalu napruhy promyslovoi merezhi Krasnohradskoho raionu Kharkivskoi oblasti. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. 2014. № 153. С. 90–92.

11. Gapon D. A., Vasylchenko V. I., Hryb O. H., Leleka O. V., Ierusalimova T. S. Tsyfrova pidstantsiia skladova systemy Smart Grid. Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2014. № 6. С. 72–76.
12. Gapon D. A., Popov S. V., Cheremisin N. M., Miroshnik A. A. Raspoznavaniye obraza iskazhennogo elektricheskogo signala v raspredelitelnykh setyakh s ispolzovaniye veyvlet-analiza i neyrosetevogo modelirovaniya. Energetika ta komp'yuterno-integrovani tekhnologii v APK. 2014. № 2. С. 69–75.
13. Gapon D. A., Grib O. G., Shevchenko S. Yu., Belov N. S., Ierusalimova T. S. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya urovnya perenapryazheniy i kachestva elektricheskoy energii. Visnik NTU «KhPI». Energetika: nadiynist ta energoyefektivnist. 2014. № 56. С. 45–50.
14. Gapon D. A., Hryb O. H., Sirotin Yu. O., Ierusalimova T. S., Diachenko O. V., Bortnikov O. V. Analiz spozhyvannia elektroenerhii z kontrolem yakosti v rozpodilnykh merezhakh. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. 2015. № 165. С. 9–10.
15. Gapon D. A., Grib O. G., Sirotin Yu. A., Ierusalimova T. S., Dyachenko A. V. Monitoring kachestva elektroenergii na tsifrovyykh podstantsiyakh. Vestnik NTU «KhPI». Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika. 2015. № 12 (1121). С. 316–319.
16. Gapon D. A., Hryb O. H., Ierusalimova T. S., Bielov M. S., Leleka O. V. Analiz normatyvnoi bazy po proektuvanniui pobudovi systemy " SMART GRID" yaka bazuietsia na tsyfrovykh pidstantsiiakh. Visnyk NTU «KhPI». Elektroenerhetyka ta peretvoriuvalna tekhnika. 2015. № 19 (1128). С. 74–78.
17. Gapon D. A., Hryb O. H., Shevchenko S. Yu., Sirotin Yu. O., Ierusalimova T. S., Diachenko O. V. Zhyvlennia transformatornoi pidstantsii 330/110 kV pry naiavnosti v liniyakh elektroperedach vyshchyykh harmonik. Visnyk NTU «KhPI». Problemy udoskonaliuvannia elektrychnyykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. 2015. № 42 (1151). С. 59–61.

18. Gapon D. A., Grib O. G., Ierusalimova T. S., Borodin D. V., Dyachenko A. V. Monitoring kachestva elektricheskoy energii na vvide tyagovoy podstantsii. Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2015. № 6. С. 61–65.
19. Gapon D. A., Hryb O. H., Ierusalimova T. S., Bielov M. S., Leleka O. V. Monitorynh spozhyvannia elektroenerhii z kontrolem yakosti. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. 2016. № 2. С. 39–44.
20. Gapon D. A., Hryb O. H., Shevchenko S. Yu., Leleka A. V., Yerusalyimova T. S. Systema dyspetcherskoho upravleniya y kontrolia tekhnolohycheskymy protsessamy na baze tsyfrovyykh podstantsiy. Visnyk NTU «KhPI». Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist. 2016. № 3 (1175). С. 43–47.
21. Gapon D. A., Hryb O. H., Shevchenko S. Yu., Ierusalimova T. S., Siedova O. O. Doslidzhennia vysokochastotnykh perenapruh, shcho vynykaiut v merezhi. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. 2016. № 175. С. 49–50.
22. Gapon, D.A.; Bederak Y. S. Guaranteeing the trouble-free operation of capacitor banks in power-supply systems of industrial enterprises. Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2016. № 1. С. 56–58.
23. Gapon D. A., Tykhonenko S. V., Hromadskyi Yu. S., Savytskyi S. M. Obgruntuvannia vprovadzhennia spozhyvacha-rehuliatora dlia keruvannia elektrychnoho navantazhennia v systemi elektropostachannia. Tekhnolohycheskyi audyt y rezervy proyzvodstva. 2016. № 2 (1). С. 22–26.
24. Gapon D. A., Sokol E. Y., Syrotyn Yu. A., Yerusalyimova T. S., Hryb O. H., Shvets S. V. Razvytye teoryy mhnovennoi moshchnosti trekhfaznoi sety v usloviakh setetsentryzma. Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2017. № 4. С. 61–65.
25. Gapon D. A., Sokol E. Y., Syrotyn Yu. A., Yerusalyimova T. S., Hryb O. H., Shvets S. V. Setetsentrycheskye tekhnolohyy upravleniya rezhymamy raboty trekhfaznoi sety. Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2017. № 3. С. 67–71.

26. Gapon D. A., Syrotyn Yu. A., Hryb O. H., Yerusalyмова T. S., Shvets S. V. Uchet neaktyvnykh sostavliaiushchykh polnoi moshchnosti. Visnyk NTU «KhPI». Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty. 2017. № 22. С. 71–76.
27. Gapon D., Bederak Y., Zuev A. Method of determining the parameters of an equivalent asynchronous electric motor in real time. Advanced Information Systems. 2018. Т. 2, № 3. С. 123–127.
28. Gapon D. A., Sokol E. Y., Zharkyn A. F., Samoilenko Y. A., Vasylchenko V. Y., Ushchapovskyi K. V., Svetelyk A. D., Hryb O. H., Hromadskyi Yu. S., Yerusalyмова T. S., Olefyr D. A., Shevchenko S. Yu., Novskyi V. A. Kachestvo elektrycheskoi enerhyi Tom 1 Ekonomyko-pravovaia baza Kachestva elektrycheskoi enerhyi v Ukraine y Evrosoiuze: monohrafiia: Kharkov: PP «Hraf-Iks», 2014. 300с.
29. Gapon D. A., Svetelyk A. D., Huselnykov V. K., Vasylchenko V. Y., Ushchapovskyi K. V., Senderovych H. A., Hryb O. H., Hromadskyi Yu. S., Sapryka A. D., Huselnykov A. V., Olefyr D. A. Sredstva yzmyrytelnoi tekhniki v elektroenergetike Tom 1 Sredstva yzmereniia elektrycheskykh velychyn: monohrafiia: Kharkov: «Typohrafiia Madryd», 2014. 744с.
30. Gapon D. A., Sokol E. Y., Syrotyn Yu. A., Hryb O. H., Sychenko D. A., Bosyi D. A., Shvets S. V., Bazhenov V. M., Yerusalyмова T. S., Lysychenko R. N. Uchet y kompensatsiia reaktyvnoi moshchnosti pry nesymmetrychnykh rezhymakh raboty system elektrosnabzheniia: monohrafiia: Kharkov: FOP Panov A.N., 2017. 290с.
31. Gapon D. A. Vybir metodu vymyriuvannia chastoty promyslovoi merezhi pry doslidzhenniakh pokaznykiv yakosti elektrychnoi enerhii. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia (MicroCAD–2013). 2013. Т. 2. С. 186.
32. Gapon D.A. Problemy zastosuvannia dyskretnoho peretvorennia Furie dlia sposterezhennia pokaznykiv yakosti elektrychnoi enerhii. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia (MicroCAD–2014). 2014. Т. 2. С. 209.

33. Gapon D. A., Hryb O. H., Yerusalymova T. S., Diachenko A. V. Yzmerenye otkloneniy chasty. Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia (MicroCAD–2015): nauk. vyd.: tezy dop. 23-yi mizhnar. nauk.-prakt. konf. 2015. C. 149.
34. Gapon D. A., Hryb O. H., Yerusalymova T. S., Diachenko A. V. Monitorynh kachestva elektrycheskoi enerhyy v systemakh elektrotransporta. Elektryfikatsiia transportu “TRANSELEKTRO–2015” materialy 8-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf., 29 veresnia–2 zhovtnia 2015 r., m. Odesa.–Dnipropetrovsk. 2015. C. 24–25.
35. Gapon D. A., Hryb O. H., Shevchenko S. Yu., Yerusalymova T. S., Bortnykov A. V. Vlyiane vysshykh harmonyk na elektrooborudovanye vysokovoltnykh podstantsyi. Aktualni problemy avtomatyky ta pryladobuduvannia: materialy Vseukr. nauk.-tekhn. konfer., 10-11 hrudnia 2015 r. 2015. C. 197–198.
36. Gapon D. A., Hryb O. H., Belov N. S., Aktualnost vnedreniya setetsentrycheskoho upravleniya elektroenerhetycheskym kompleksom Ukrainy. Aktualni problemy avtomatyky ta pryladobuduvannia: materialy 3-yi Vseukr. nauk.-tekhn. konf., 8-9 hrudnia 2016 r. 2016. C. 192–193.
37. Gapon D. A. Prychyny pohirshennia yakosti elektrychnoi enerhii pry vykorystanni aktyvnykh chastotnykh peretvoriuvachiv. Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: Tezy dopovidei KhXIV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Ch.II (18-20 travnia 2016r., Kharkiv). 2016. T. 2. C. 146.
38. Gapon D. A., Yerusalymova T. S., Diachenko A. V., Shvets S. V. Analiz vysshykh harmonyk napriazheniya v trekhfaznykh setiakh. Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorov'ia Tezy dopovidei MicroCAD-2017 Ch.II. 2017. C. 194.
39. Gapon D. A., Bortnikov O. V., Shvets S. V. Aktualni pytannia rezhymiv roboty tryfaznykh elektrychnykh merezh. Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei KhXVI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2013. 2018. № 2. C. 133.

40. Gapon D. A., Rudevych N. V. Rezonansni yavyscha u enerhosystemi yak prychna poshkodzhennia elektroobladnannia. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: nauk. vyd. tezy dop. 27-yi mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2019, [15-17 travnia 2019 r.] Ch. II. 2019. T. 2. C. 139.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	2
ВСТУП.....	6
 РОЗДІЛ 1	 14
ПРОБЛЕМА ВЗАЄМОВІДНОСИН ПОСТАЧАЛЬНИКА ТА СПОЖИВАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ПИТАННЯХ ЕЛЕКТРОМГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	14
1.1 Цілі вимірювання якості електроенергії	16
1.2 Методи засновані на аналізі перетоків потужностей	19
1.3 Методи визначення дольового вкладу споживача у погіршення показників якості ЕЕ на основі емпіричних, аналітичних залежностей та статистичного аналізу	23
1.4 Методи визначення детермінованого дольового внеску споживача у погіршення ПЯЕ шляхом аналізу електроспоживання всіх приєднань	29
Висновки до розділу 1	31
 РОЗДІЛ 2	 32
АКТУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	32
2.1 Аналіз залежності якості електричної від параметрів схеми електропостачання і характеристик споживачів	37
2.2 Оцінка сумісності існуючих нормативних документів стосовно вищим гармонійним складовим	62
Висновки до розділу 2	68
 РОЗДІЛ 3	 70
ОЦІНКА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ	70

3.1 Засади визначення енергетичної ефективності електроспоживання шляхом порівняння з еталонним споживачем.....	72
3.2 Визначення ефективності електроспоживання у трифазній трипровідній мережі	77
3.3 Визначення еталонного споживача у однофазній мережі.....	81
3.4 Еталонний споживач у трифазній трипровідній мережі	89
3.5 Еталонний споживач у трифазній чотирьохпровідній мережі	106
3.6 Визначення еталонного реактивного споживача.....	115
3.7 Еталонний реактивний споживач при наявності вищих гармонік струму та напруги	125
3.8 Середньореактивний споживач	151
3.9 Коефіцієнт втрат від несиметрії	152
3.10 Втрати від реактивності і нелінійності	152
3.11 Втрати від нестаціонарності	154
Висновки до розділу 3	156
 РОЗДІЛ 4	158
МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СПОЖИВАЧА НА ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	158
4.1 Аналіз залежності імпедансу електричної мережі від параметрів її елементів.....	159
4.2 Метод вимірювання параметрів електричної енергії	175
4.3 Вимірювання середньоквадратичних значень струму і напруги.....	183
4.4 Реалізація обліку електричної енергії із застосуванням розробленого математичного апарату	187
4.5 Пристрій обліку електричної енергії з урахуванням показників її якості ..	192
Висновки до розділу 4	198

РОЗДІЛ 5	200
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОТРИМАННЯ ОЦІНОК ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ І ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	200
5.1 Засоби експериментального вимірювання споживання електричної енергії та показників її якості	201
5.2 Виділення джерела вищих гармонік в разі змішаного навантаження	206
5.3 Модель системи з двома змішаними навантаженнями	225
5.4 Аналіз осцилограм отриманих на реальних об'єктах	239
5.5 Модель електроспоживання с перевищенням допустимих меж електромагнітної сумісності	259
Висновки до розділу 5	289
 ВИСНОВКИ	 291
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	295
Додаток А Список опублікованих праць за темою дисертації	318
Додаток Б Документи впровадження	327