

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

ПАПАЇКА Юрій Анатолійович



УДК 621.316

**ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ
З НЕЛІНІЙНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ**

Спеціальність: 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: академік НАН України, доктор технічних наук, професор **Півняк Геннадій Григорович**, ректор, професор кафедри електроенергетики Інституту електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор **Щерба Анатолій Андрійович**, завідувач відділу електроживлення технологічних систем Інституту електродинаміки (м. Київ) НАН України.

доктор технічних наук, професор **Гриб Олег Герасимович**, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

доктор технічних наук, професор **Кутін Василь Михайлович**, завідувач кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться **”21” грудня 2019 р.** об **11** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, корпус 1, ауд. 60, тел. (0562) 47-24-11.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за вищевказаною адресою.

Автореферат розіслано **”19” листопада 2019 р.**

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.080.07,
д.т.н., проф.



В.І. Корнієнко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Світова та вітчизняна енергетика сьогодні стоять перед необхідністю впровадження абсолютно нової парадигми функціонування та розвитку електроенергетичних систем. Основні вимоги, що висувуються до української енергосистеми – технічні та експлуатаційні обмеження, стрімкий розвиток відновлювальних джерел енергії, які визначають принципи децентралізованої побудови електричних мереж, електромагнітна сумісність систем електропостачання з потужними несиметричними та нелінійними навантаженнями. Головні завдання Уряду полягають в імплементації ринку електроенергії, формуванні єдиної моделі об'єднаної енергетичної системи з розподіленою генерацією, сумісною з моделями європейських систем, забезпеченні стійкості режиму та надійності електропостачання.

Реальна ситуація сьогодні української електроенергетики визначається надвисоким рівнем втрат електроенергії при передачі (до 20 %). Порівняно з країнами з розвинутою економікою цей показник набагато більший (для країн Західної Європи втрати складають 4-5 %, США – 6 %). Високий рівень втрат в електричних мережах України пов'язаний з низьким рівнем компенсації реактивної потужності, застарілими основними фондами об'єктів електроенергетики, недостатнім використанням засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги, невирішеністю проблем якості електричної енергії. Низький рівень якості електроенергії призводить до значного зниження енергетичної ефективності електричних мереж за цілою низкою показників. Проблема якості електричної енергії – це складова комплексного поняття електромагнітної сумісності системи електропостачання (СЕС). Вона визнана провідними світовими вченими та відноситься до числа найважливіших проблем сучасної електроенергетики і є частиною проблеми підвищення енергоефективності електричних мереж.

Враховуючи стратегічне значення для енергетичної безпеки та обороноздатності України підприємств гірничо-видобувної галузі, необхідно підкреслити актуальність виконання комплексних досліджень електромагнітної сумісності та надійності електропостачання гірничих підприємств, зважаючи на нестационарні умови технічного і правового функціонування електроенергетичних систем, а також вимоги переходу до інтелектуальної енергетики майбутнього.

З названих причин розробка наукових основ створення енергетично ефективних систем електропостачання гірничих підприємств з використанням комплексних критеріїв надійності та якості в умовах, що передують переходу до децентралізованих принципів побудови електричних мереж, є важливою науково-дослідною проблемою, а тема досліджень, спрямованих на створення цих основ, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Роботу виконано відповідно до прийнятої Кабінетом Міністрів України «Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року», в рамках держбюджетних та госпдоговірних НДР "Компенсація

реактивної потужності в шахтних електричних мережах" (№808-ПУ-ШУП/030102-19), "Оцінка електромагнітної сумісності систем електропостачання шахт в умовах потужних нелінійних навантажень та діагностика технічного стану і підвищення ефективності шахтних вентиляторних та підйомних установок" (№984-ПУ-ШУГК/030101-19), "Удосконалення технології гібридних і суто електричних транспортних засобів і їх інтеграція в енергетичну мережу" (№ДР 0117U001126), "Створення методики прогнозування параметрів технічного стану складних електромеханічних систем електричних та гібридних автомобілів" (№ДР 0118U003189), що виконувалися у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка», де автор був одним з виконавців.

Мета й завдання дослідження. Метою роботи є подальший розвиток теорії електромагнітної сумісності систем електропостачання гірничих підприємств при зростанні частки потужних нелінійних навантажень та обґрунтування показників надійності й якості електропостачання при обмеженні потужності енергосистеми. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі сформульовано і виконано наступні **задачі досліджень**.

1. Аналіз впливу вищих гармонік на елементи системи електропостачання гірничого підприємства з урахуванням особливостей побудови схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання.

2. Аналіз типових графіків електричних навантажень основних технологічних установок для пошуку індивідуального «сліду» у спектрі вищих гармонічних складових.

3. Проведення стендових експериментальних досліджень впливу значення вихідної частоти перетворювачів енергії та моменту на валу двигуна на значення вищих гармонік та інтергармонік.

4. Обґрунтування поняття індексу надійності при прогнозованому переході до децентралізованого принципу побудови електроенергетичних систем та обґрунтування фізичних механізмів забезпечення оптимальних показників надійності при низькій якості напруги.

5. Розробка методики дослідження втрат електроенергії при врахуванні індивідуальних графіків вищих гармонік і віддаленості джерела електромагнітної завади.

6. Дослідження резонансних процесів в системах електропостачання гірничих підприємств на частотах канонічних гармонік та інтергармонік при врахуванні технічних особливостей схем живлення і характеру нелінійного навантаження.

7. Визначення складових повної потужності, що споживає підприємство, та часових еволюцій вищих гармонік й інтергармонік протягом типових ремонтних і видобувних змін.

8. Розробка рекомендацій з реалізації енергетично ефективних режимів роботи підприємства, що можуть бути забезпечені при комплексному врахуванні показників надійності, якості електропостачання та оптимальному перетоці реактивної потужності, а також рекомендацій з вибору компенсуючих пристроїв з урахуванням кількості та потужності вентильних перетворювачів.

9. Створення моделей для експертної оцінки збитків від неякісної електроенергії та прогнозованих рівнів електромагнітної сумісності при подальшому зростанні кількості перетворювачів в електричних мережах.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси передачі та споживання електроенергії на гірничих підприємствах при наявності потужних вентильних перетворювачів та обмежень енергосистеми.

Предмет дослідження – показники якості напруги та надійності електрообладнання при застосуванні керованих вентильних перетворювачів енергії на основних технологічних ланках, зв'язки цих показників з режимними особливостями технології підземного видобутку вугілля.

Ідея роботи – забезпечення електромагнітної сумісності системи електропостачання гірничих підприємств шляхом врахування індивідуальних графіків вищих гармонік та інтергармонік потужних стаціонарних установок при збереженні оптимального перетоку реактивної потужності та контролі показників надійності системи.

Наукова проблема полягає в розвитку теорії електромагнітної сумісності систем електропостачання шляхом встановлення закономірностей реалізації енергоефективних режимів роботи при комплексному врахуванні режимних комбінацій електромеханічних перетворювачів стаціонарних установок та електричної мережі шляхом отримання нових зв'язків показників якості напруги і надійності електрообладнання, які відрізняються від існуючих можливостями виключення інтергармонічних резонансів, що забезпечить необхідний рівень електромагнітної сумісності, зменшить втрати електроенергії, кількість аварій і передчасних ремонтів.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань у роботі використано комплексний підхід, що включає аналіз та узагальнення науково-технічних досягнень і літературних джерел, поєднує теоретичні й експериментальні дослідження в умовах діючих підприємств. Теоретичні дослідження базуються на методах теоретичної електротехніки, теоріях електромагнітної сумісності та надійності, а також методах спектрального аналізу, комп'ютерного моделювання і пошуку оптимального рішення. Експериментальні дослідження включають перевірку отриманих наукових результатів в реальних промислових системах електропостачання та лабораторні стендові дослідження з визначення рівнів генерації інтергармонік при верифікації режимів роботи частотного електропривода.

Основні наукові положення, що захищаються в дисертації

1. Оцінка енергетичної ефективності гірничого виробництва забезпечується визначенням коефіцієнтів індивідуальних графіків вищих гармонік, що залежать від режимів роботи стаціонарних установок у межах робочої зміни.

2. Для забезпечення нормативних рівнів несинусоїдальності напруги з урахуванням особливостей зміни режимів роботи електротехнічних комплексів технологічних процесів гірничих підприємств необхідно врахувати максимальне значення амплітуди на резонансних частотах та смугу

пропускання амплітудно-частотних характеристик опору вузла навантаження 6–10 кВ у межах 30...40 % енергії викривленого спектру.

3. При переході систем електропостачання гірничих підприємств до післяаварійних або децентралізованих схем живлення при виборі резонансної частоти фільтро-компенсуючого пристрою необхідно враховувати частоти канонічних гармонік та інтергармонік за умови компенсації 30...40 % несинусоїдальності напруги.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Розвинуто механізми забезпечення нормативних рівнів якості електроенергії та електромагнітної сумісності систем електропостачання з урахуванням впливу особливих електричних режимів стаціонарних установок гірничих підприємств і типу перетворювачів, що відрізняються від існуючих комплексним врахуванням показників надійності для оцінки енергетичної ефективності.

2. Встановлено, що застосування індивідуальних графіків несинусоїдальності вентильних перетворювачів підйомних машин і вентиляторів головного провітрювання дозволяє визначати зони домінування канонічних гармонік та інтергармонік, в залежності від параметрів і стану мережі живлення, що підтверджується достовірними результатами математичного моделювання.

3. Визначено залежність частот і амплітуд інтергармонік, які генеруються вентильними перетворювачами в електричну мережу в гранично можливих зонах зміни вихідної частоти інвертора, що забезпечує вибір раціональних параметрів засобів компенсації й абсорбції вищих гармонік.

4. Для умов системи електропостачання гірничого підприємства отримано закономірності, що пов'язують параметри резонансних процесів у вузлі навантаження 6–10 кВ з кількістю, потужністю та режимами електромеханічних перетворювачів стаціонарних установок і відрізняються від існуючих можливістю прогнозувати ділянки амплітудно-частотних характеристик з резонансними явищами при переході до післяаварійних та децентралізованих схем живлення гірничого підприємства.

5. Розвинуто методи визначення показників якості напруги при оцінці електричної віддаленості джерела електромагнітної завади, що дозволяє враховувати конструктивні особливості електричних мереж гірничих підприємств та місце підключення вентильних перетворювачів і розкриває нові можливості для корекції несинусоїдальності напруги при нестационарних підземних навантаженнях.

6. Розроблено нові математичні моделі розрахунку несинусоїдальності напруги, відмінності яких полягають у можливості дослідження впливу широкого спектру вищих гармонік та інтергармонік, характерних для гірничих підприємств, на надійність електрообладнання, дозволяють прогнозувати процеси старіння ізоляції електричних машин та кабелів і запобігти системним аваріям в електричних мережах.

7. Уперше встановлено закономірності зміни строку служби електрообладнання у межах 15–20 % нормативного терміну залежно від

конфігурації схеми електропостачання гірничого підприємства, складу обладнання та рівнів несинусоїдальності напруги.

8. Обґрунтовано закономірності впливу режимних особливостей коефіцієнтів графіків вищих гармонік струму та напруги на загальний рівень несинусоїдальності в системах електропостачання гірничих підприємств, результатом чого є підвищення ефективності й економічності електропостачання при вирішенні проблеми електромагнітної сумісності з урахуванням множини комбінацій типових схем заміщення.

9. Запропоновано уточнений метод розрахунку додаткових втрат активної потужності в елементах системи електропостачання при врахуванні особливостей індивідуальних режимів стаціонарних установок та місця підключення джерела завади, що за рахунок виділення режимних зон електромагнітної системи «електрична мережа – вентиляльний перетворювач енергії» з максимальною енергетичною ефективністю, дозволяє підвищити точність розрахунків на 8 %.

Наукове значення роботи полягає в подальшому розвитку теорії електромагнітної сумісності систем електропостачання гірничих підприємств з нелінійними навантаженнями, що полягає в отриманні нових залежностей інтергармонічного спектру та вигляді амплітудно-частотних характеристик в аналітичному описі несинусоїдальності напруги, внаслідок чого запропоновано методу розрахунку додаткових втрат активної потужності, забезпечується відповідна якість та ефективність електропостачання і досягається економічний ефект.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується використанням фундаментальних законів електротехніки, коректністю зроблених припущень, всебічним тестуванням розроблених методик розрахунку показників якості та надійності електропостачання, збіжністю розрахункових та експериментальних даних з визначення рівнів інтергармонік, що генеруються в мережу вентиляльними перетворювачами гірничих підприємств з похибкою, яка не перевищує 10 %.

Практична цінність роботи полягає в:

- розробці уточненого розрахункового співвідношення для визначення перегріву ізоляції електрообладнання при несинусоїдальності напруги;
- розробці методики, алгоритму та програмного забезпечення для моделювання втрат активної потужності й електроенергії при віддаленості в мережі джерела несинусоїдальності;
- розробці методики моделювання параметрів резонансних явищ у вузлах навантаження з електромеханічними перетворювачами та виборі захисного обладнання для конденсаторних установок;
- розробці рекомендацій щодо вибору числа та потужності підземних і поверхневих батарей статичних конденсаторів, які забезпечують оптимальний переток реактивної потужності при врахуванні можливості виникнення резонансних явищ;

- обґрунтуванні впливу несинусоїдальності напруги на надійність електрообладнання при довільних ієрархіях системи електропостачання та вузлах підключення перетворювача;
- розробці технічного рішення з вибору параметрів фільтро-компенсуючих пристроїв, з врахуванням характеру зміни рівнів та частоти вищих гармонік;
- використанні матеріалів роботи при підготовці фахівців у галузі електроенергетики та енергетичного менеджменту.

Матеріали дисертаційної роботи знайшли відображення в підручнику «Перехідні процеси в системах електропостачання» (5-те видання, 2016 р.), навчальному посібнику «Розрахунки показників електромагнітної сумісності» (2014 р.), використані в навчальному процесі Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» для розвитку ділової активності та здібності до самостійної професійної діяльності студентів, які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Реалізація результатів роботи. Розроблені за результатами роботи методичні рекомендації щодо визначення кількості та параметрів компенсуючих пристроїв в умовах несинусоїдальності напруги прийняті «ДТЕК ШУ Павлоградське» для використання у виробничих умовах. Методика і розроблена на її базі програма розрахунку втрат електроенергії, яка враховує індивідуальні графіки вищих гармонік, прийнята «ДТЕК ШУ імені Героїв Космосу». Наукові результати щодо забезпечення електромагнітної сумісності систем електропостачання з нелінійними навантаженнями при впровадженні децентралізованих принципів побудови електричних мереж застосовані на державних підприємствах «Конструкторське бюро «Південне» та Науково-виробниче об'єднання «Павлоградський хімічний завод».

Особистий внесок автора. Результати експериментальних і теоретичних досліджень, наведених в роботі, отримано особисто або за безпосередньою участю автора. Автором сформульовано мету, ідею і наукові положення роботи; виконано теоретичні дослідження електромагнітної сумісності систем електропостачання вугільних підприємств при зростанні нелінійних навантажень різного характеру та режимів, термічного впливу на ізоляцію електрообладнання; розроблено методологію дослідження показників надійності при несинусоїдальності напруги; виконано чисельні дослідження й аналіз результатів; сформульовано висновки і рекомендації щодо визначення значень інтергармонік, які генеруються в електричну мережу перетворювачами.

Апробація результатів роботи

Основні положення та наукові результати роботи розглядалися на: міжнародних наукових і науково-практичних конференціях: «Форум гірників» (Дніпро, 2011, 2016, 2018), «Наукова весна» (Дніпро, 2013), «Енергоефективність та енергозбереження» (Дніпро, 2017), «Актуальні питання енергозбереження як вимога безпеки життєдіяльності» (Київ, 2018) «Електроенергетика глазами молодежи» (Россия, Самара, 2011), «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов» (Россия, Благовещенск, 2013).

Публікації. Основні наукові положення і результати дисертації опубліковані в 40 наукових працях, з них: монографія, підручник, два навчальних посібника, 22 статті – у фахових виданнях, що входять до переліку МОН України (у т. ч. 4 статті – в журналах, що індексуються в наукометричній базі Scopus), 5 статей – в зарубіжних періодичних виданнях, 13 статей – в матеріалах наукових конференцій (одна стаття – в журналі, що індексується в наукометричній базі Scopus), одна стаття – в інших виданнях.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, 4 додатків на 36 сторінках, списку використаних джерел, що містить 199 найменувань на 20 сторінках. Текстова частина містить 267 сторінок машинописного тексту, 37 рисунків і 20 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 320 сторінок.

Роботу виконано на кафедрі електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Автор висловлює свою вдячність колективу кафедри за допомогу в проведенні досліджень.

Частина експериментальних робіт виконано в Технічному університеті «Вроцлавська політехніка» (м. Вроцлав, Польща) у відповідності до договору про наукове співробітництво між Національним технічним університетом «Дніпровська політехніка» і Технічним університетом «Вроцлавська політехніка».

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі**: обґрунтовано актуальність обраної теми; розкрито зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами; поставлено мету і сформульовано завдання дослідження; викладено ідею, об'єкт, предмет і методи дослідження; зазначено наукові положення та наукову новизну отриманих результатів; наведено практичне значення результатів роботи; задекларовано особистий внесок автора; висвітлено апробацію результатів роботи, публікації за темою.

У **першому розділі** розглянуто особливості режимів систем електропостачання гірничих підприємств з потужними нелінійними навантаженнями. При оцінці енергетичних балансів підприємств виділено окремі технологічні ланки, де споживання електричної енергії у перетвореному вигляді сягає 100 % і показано динаміку зростання «проблемного навантаження» протягом останнього десятиліття. Проаналізовано показники електромагнітної сумісності, що є актуальними для нормальної експлуатації електричних систем подібного класу, та показано основні причини й наслідки їх погіршення.

Запропоновано використання поняття «енергоефективність систем електропостачання» як комплексного показника, що враховує надійність та якість електропостачання при контролі стану мережі живлення та режиму стаціонарних установок гірничих підприємств. При цьому досліджуються електричні режими системи електропостачання з нелінійними навантаженнями з урахуванням децентралізованого принципу побудови електричних мереж.

Показано, що робота системи електропостачання при зростанні кількості перетворювачів (з урахуванням перспектив упровадження децентралізації енергетики) призведе до системного погіршення якості напруги в розподільчих

електричних мережах, що є причиною неефективного використання електроенергії та знижує надійність електрообладнання в цілому. Основою для формування раціональних енергоефективних режимів роботи гірничого підприємства є застосування нових методів прогнозу й аналізу надійності та якості напруги, що полягають у введенні в розрахунки показників роботи індивідуальних технологічних ланок із забезпеченням раціональних перетоків реактивної потужності та недопущенні резонансних явищ в електричних мережах.

Виконано аналіз взаємозв'язків збитків від неякісної напруги з макроекономічними показниками різних країн світу та показано, що методики визначення втрат електроенергії в електричних мережах України є застарілими і не відповідають сучасним особливостям змін навантаження та впровадження нових принципів функціонування електроенергетичних систем. У результаті цього рівень втрат електроенергії знаходиться на рівні 15-20 %, що є критичним значенням.

Засновником наукової школи дослідження електромагнітної сумісності є професор Жежеленко І.В. – визнаний вчений у цій галузі знань. У процесі виконання роботи та оцінки результатів дослідження з ним були проведені відповідні дискусії та обговорення. Питання електромагнітної сумісності систем електропостачання з нелінійними навантаженнями, у тому числі енергоефективні режими роботи електричних мереж, також досліджувалися в роботах Шидловського А.К., Жаркіна А.Ф., Саєнка Ю.Л., Железка Ю.С., Півняка Г.Г., Михальського В.М., Гриба О.Г., Борисова Б.П., Вагіна Г.Я, Маєвського О.А., Кузнецова В.Г., Кутіна В.М., Солдаткіної Л.А., Іванова В.С., Соколова В.І., Трофімова Г.Г.

Разом з тим виконаний аналіз праць показав, що більшість результатів не мають універсального характеру та не повною мірою враховують зміни в електроенергетиці. Єдиний погляд на фізичну картину, що відбувається в системі електропостачання гірничих підприємств при нових умовах функціонування, відсутній, а відомі моделі не дають змоги прогнозувати рівні електромагнітної сумісності при системних змінах характеру та потужності нелінійного навантаження. На підставі виконаного в першому розділі роботи аналізу сформульовано задачі досліджень.

У **другому розділі** виконано дослідження режимів роботи основних технологічних електроприймачів вугільного підприємства. При цьому особлива увага приділялась пошуку «індивідуального» сліду роботи в діапазоні вищих гармонік (ВГ) та інтергармонік (ІГ).

Для цього приведено результати комплексного експериментального моніторингу показників якості напруги та струму THD_U , THD_I та доведено вагомість впливу на загальний викривлений спектр напруги вентилятора головного провітрювання (ВГП) та підйомних машин (ПМ) (рис. 1). Подібні електромагнітні завади носять циклічний характер, що дозволило зробити припущення про врахування періодичності дії ВГ та ІГ у подальших розрахунках режимів системи електропостачання.

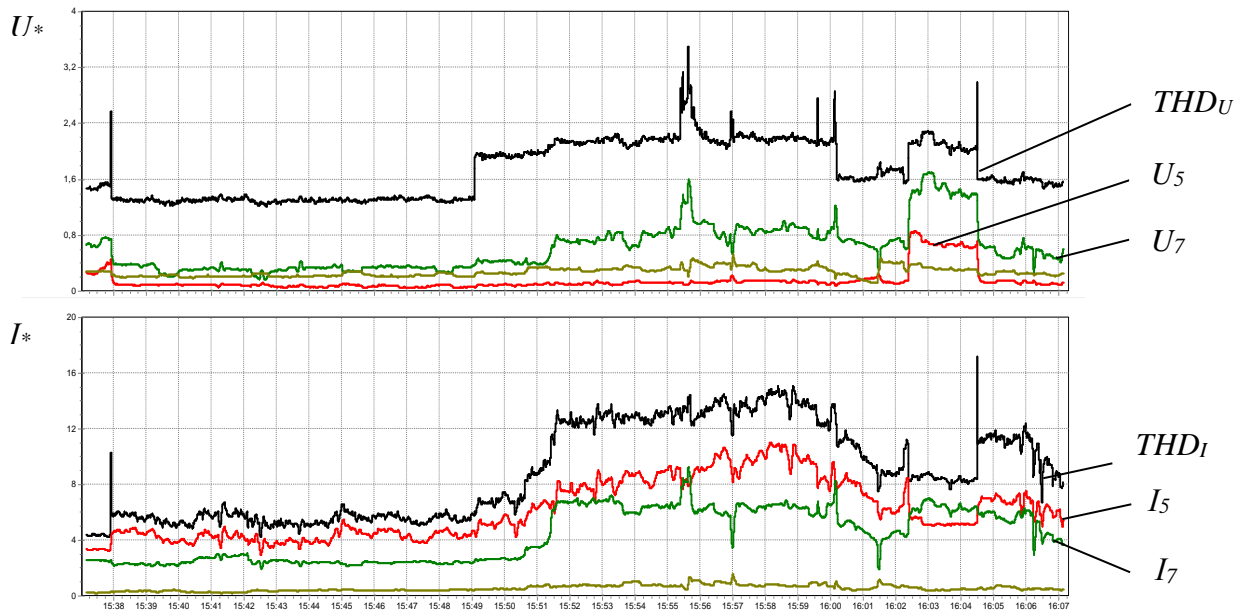


Рис. 1. Залежність коефіцієнта викривлення синусоїдальності напруги, струму та вищих канонічних гармонік у часі при пробному пуску ВГП

Досліджувались рівні несиметрії та коливання напруги при роботі підйомних машин. Показано, що за існуючого значення потужності енергосистеми показники несиметрії K_{2U} і коливання напруги δU_t знаходяться в межах, допустимих нормативними документами.

Врахування технологічних особливостей підземного видобутку вугілля при оцінці та прогнозуванні режимів роботи системи електропостачання відкривають нові можливості реалізації засад енергетичної ефективності та зменшення кінцевого споживання електроенергії, оскільки стаціонарні електроустановки, обладнані вентильними перетворювачами, є основними споживачами в енергетичному балансі гірничого підприємства (рис. 2).

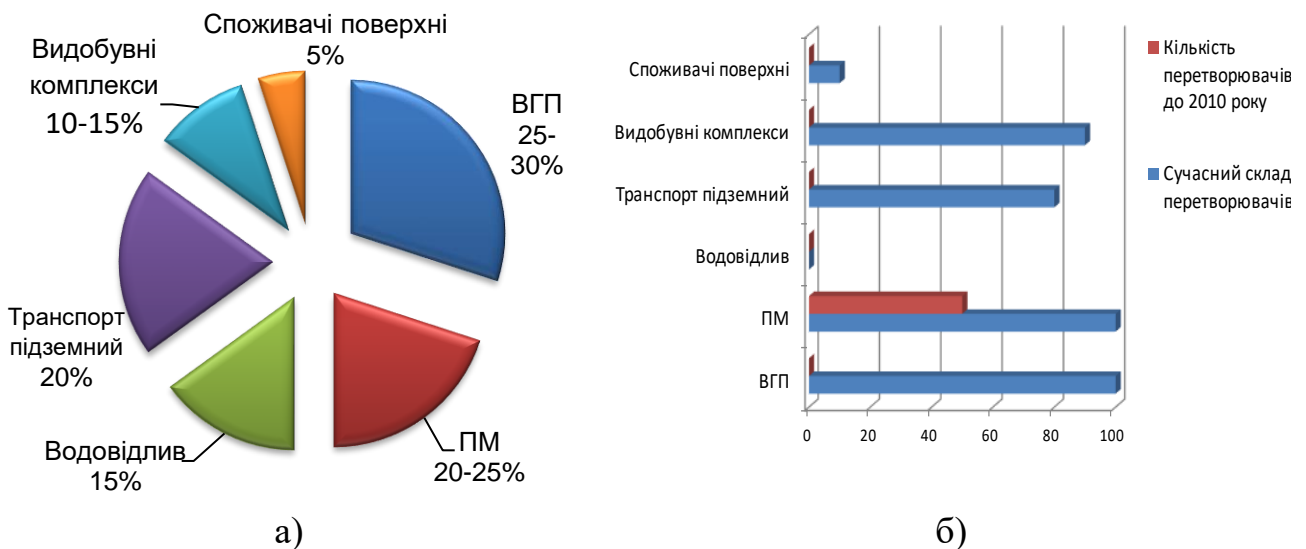
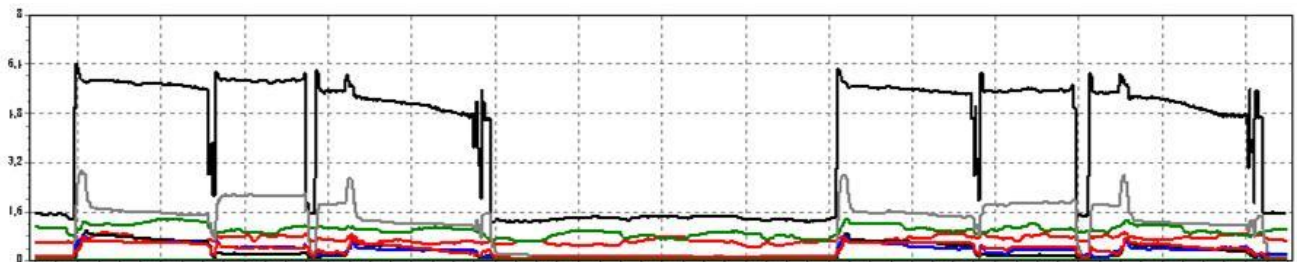


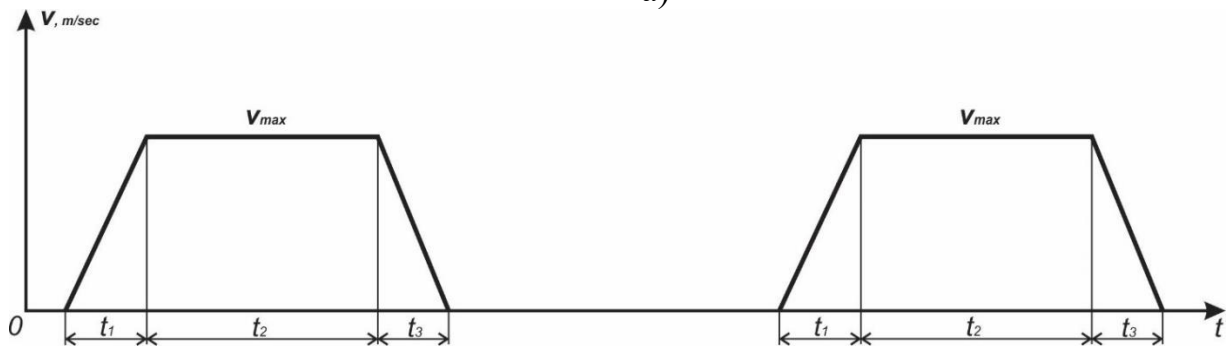
Рис. 2. Енергетичний баланс вугільної шахти за технологічними ланками (а) та динаміка зростання нелінійних навантажень в енергетичному балансі (б)

Аналіз характеру пульсацій при роботі випрямлячів ПМ показав залежність рівнів вищих гармонік струму та напруги на шинах підстанції від циклічних операцій підйомних машин, що доводить подібність діаграм швидкості й експериментальних графічних залежностей вищих гармонік (рис. 3). Експеримент з дослідження рівнів вищих гармонік проводився на різних електричних віддаленостях від шахти для отримання закономірностей затухання електромагнітних завад від електричного опору мережі.

Отримані при дослідженні графіків вищих гармонічних складових закономірності дозволили одержати важливі наукові результати у вигляді запровадження коефіцієнтів графіків вищих гармонік, покладених в основу нової методики визначення додаткових втрат електроенергії в системі електропостачання шахти при несинусоїдальності напруги.



a)



б)

Рис. 3. Часова еволюція вищих канонічних гармонік при роботі вугільного підйому (а) та швидкісна діаграма підйомної машини (б)

Для отримання середніх значень коефіцієнтів використовувались наступні залежності:

- середнє значення THD за зміну/добу

$$THD_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n THD_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^m t_{наузв i}}, \quad (1)$$

де THD_i – значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності напруги в i -му циклі роботи підйомної машини; t_i – тривалість i -го циклу;

- середньоквадратичне значення THD за зміну/добу

$$THD_{СК} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n THD_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}; \quad (2)$$

- коефіцієнт використання

$$K_{B THD} = \frac{THD_{cp}}{THD_{ном}}, \quad (3)$$

де $THD_{ном}$ – значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності напруги, отримане розрахунково, виходячи з номінальної потужності перетворювача;

- коефіцієнт максимуму

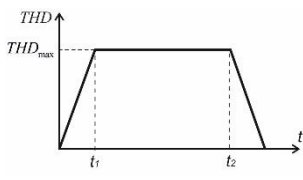
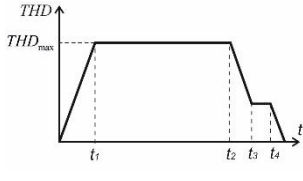
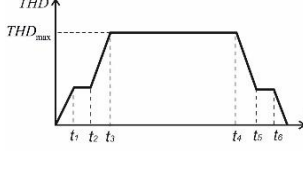
$$K_{M THD} = \frac{THD_{max}}{THD_{cp}}, \quad (4)$$

де THD_{max} – максимальне значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності напруги, отримане з реальних графіків.

Експериментальний моніторинг електричних режимів та показників якості напруги вугільних шахт підтверджує результати моделювання та доводить достовірність значень коефіцієнтів графіків гармонік струму (табл. 1).

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів графіків вищих гармонік струму

Профіль гармоніки	Потужність перетворювача, МВА					
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
	THD_{cp}	0,026	0,056	0,09	0,117	0,146
	$THD_{СК}$	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	$K_{B THD}$	0,44	0,51	0,52	0,51	0,52
	$K_{У THD}$	0,50	0,53	0,56	0,56	0,56
	$K_{M THD}$	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03
	THD_{cp}	0,025	0,054	0,08	0,111	0,131
	$THD_{СК}$	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	$K_{B THD}$	0,42	0,49	0,49	0,48	0,47
	$K_{У THD}$	0,48	0,51	0,53	0,53	0,50
	$K_{M THD}$	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03
	THD_{cp}	0,024	0,051	0,08	0,109	0,128
	$THD_{СК}$	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	$K_{B THD}$	0,39	0,47	0,47	0,47	0,46
	$K_{У THD}$	0,45	0,49	0,51	0,52	0,49
	$K_{M THD}$	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03

Отримані значення коефіцієнтів враховують потужність перетворювача та вид тахограми підйомної машини. Це дозволило розробити уточнену методику

розрахунку втрат електроенергії в системі електропостачання гірничих підприємств з урахуванням багатofакторних моделей зміни режиму технології шахти та параметрів перетворювачів, що є визначною особливістю даних наукових розробок і може стати ефективним інструментом створення принципово нових енергетично ефективних систем передачі та розподілу електроенергії.

Розглянуто задачу дослідження резонансних явищ в системах електропостачання з потужними нелінійними навантаженнями. Визначними особливостями при моделюванні зон резонансних частот є врахування режимних параметрів перетворювача при розв'язанні характеристичного рівняння для комплексного опору вузла навантаження (5) і введення в аналітичні залежності параметрів мережі живлення, що дозволяє забезпечити оптимальну роботу компенсуючих пристроїв при децентралізованому принципі побудови електричних мереж.

Рівняння для визначення частотної характеристики LC-контурів мережі живлення, покладене в основу моделі резонансних явищ, має вигляд:

$$Z_{1n} = \frac{(r_c + jx_{cn})(r_k - jx_{kn})}{r_c + r_k + j(x_{cn} - x_{kn})} = \frac{r_c r_k (r_c + r_k) + x_{cn}^2 r_k + x_{kn}^2 r_c}{(r_c + r_k)^2 + (x_{cn} - x_{kn})^2} + j \frac{x_{cn} x_{kn} (x_{kn} - x_{cn}) + r_k^2 x_c - r_c^2 x_k}{(r_c + r_k)^2 + (x_{cn} - x_{kn})^2}, \quad (5)$$

де x_{cn} – еквівалентний індуктивний опір мережі живлення на частоті n -ої гармоніки; x_{kn} – ємнісний опір батареї конденсаторів для n -ої гармоніки.

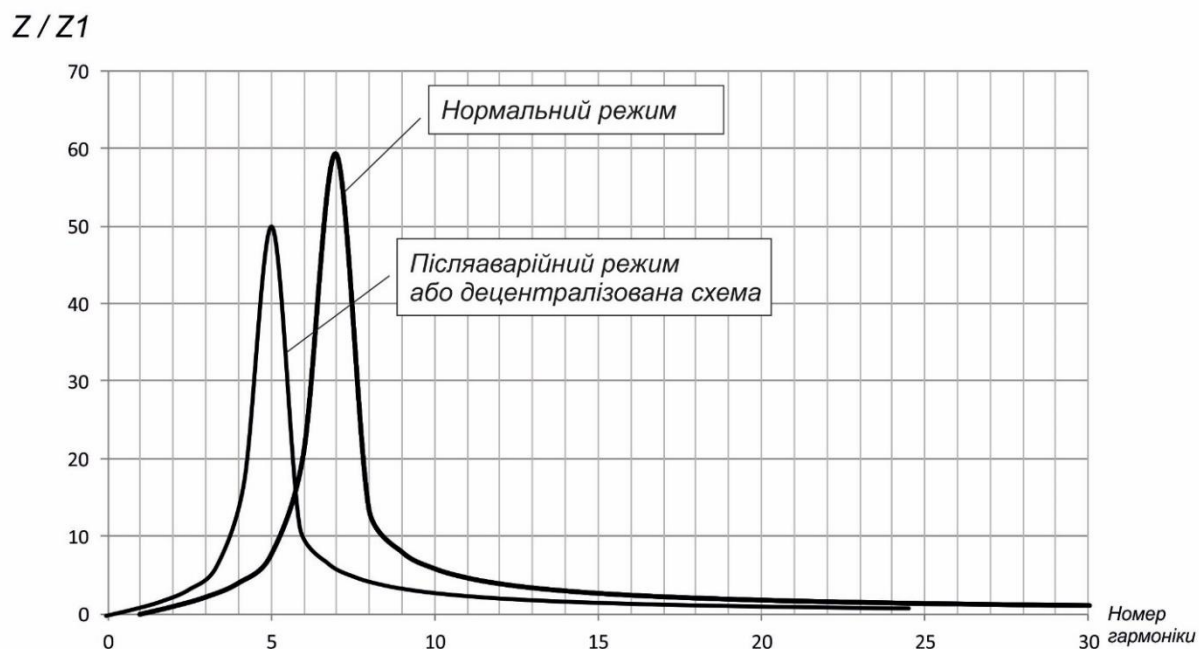


Рис. 4. Амплітудно-частотні характеристики вузла навантаження шахти при переході до децентралізованого живлення

Доведено, що резонансні явища у вузлах навантаження 6...10 кВ гірничих підприємств помітні на частотах гармонік та інтергармонік, особливо в періоди

незначного електричного навантаження в ремонтну зміну або при переході до децентралізованої схеми живлення.

Моделювання інтергармонічного спектру електромагнітних завад виконувалось на основі спектрально-кореляційної теорії випадкових процесів. Результати перевірено стендовими дослідженнями електромагнітної сумісності в сертифікованих лабораторіях та отримано нові залежності рівнів інтергармонік від навантаження приводних двигунів (рис. 5-6).

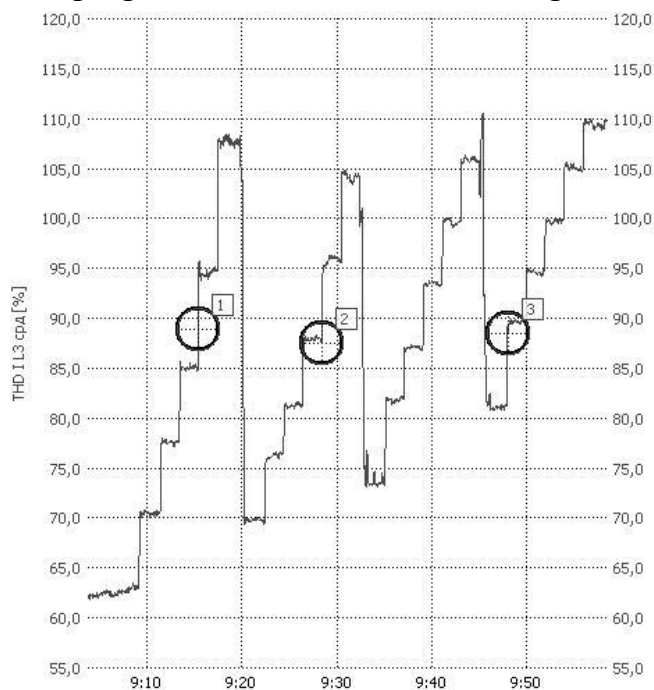


Рис. 5. Значення THD_I при експериментальних дослідженнях енергетичних показників роботи перетворювача частоти з ланкою постійного струму при частоті $f_2=50...20$ Гц

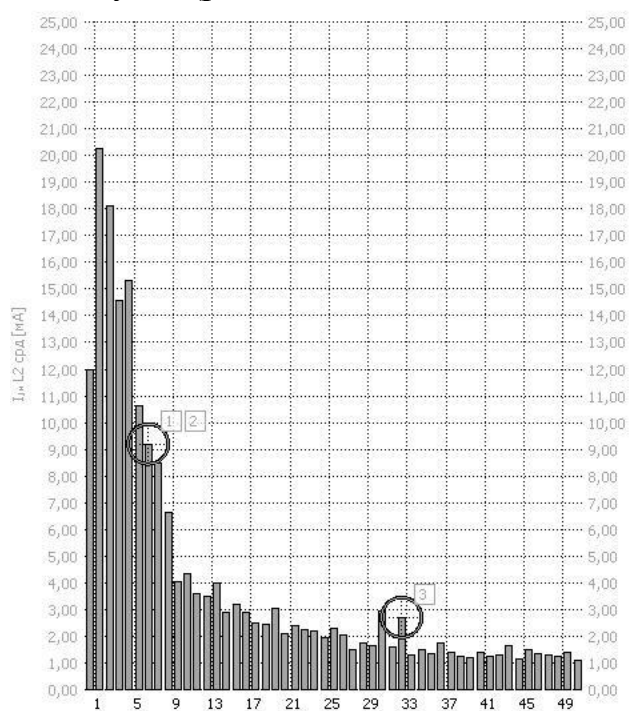


Рис. 6. Значення інтергармонік струму при експериментальних дослідженнях енергетичних показників роботи перетворювача частоти з ланкою постійного струму при частоті $f_2=50...20$ Гц

Стендові дослідження показали, що робота перетворювача частоти в зоні 30...20 Гц супроводжується підвищенням (до 50%) рівнем генерації вищих гармонік та інтергармонік.

Врахування індивідуальних профілів вищих гармонік у поєднанні з прогнозованими зонами резонансів на частотах інтергармонік створюють нові можливості врахування, так званого, «електромагнітного сліду» від джерела завади, що дозволяє на якісно новому рівні виконувати договірні взаємовідносини в умовах функціонування нового ринку електроенергії.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи виконано дослідження надійності роботи елементів системи електропостачання при варіативній комутації потужних нелінійних електроприймачів.

Теорія надійності електроенергетичних систем базується на статистичних показниках, значення яких отримано в результаті десятилітніх досліджень процесів старіння ізоляції та механічних частин. Враховуючи зростаючу частку

перетворювачів, проведено дослідження впливу вищих гармонік на теплові процеси в ізоляції та виведено нові залежності показників надійності від показників якості напруги.

У елемента з прихованими дефектами, однак нестаріючого протягом тривалого часу, небезпека відмови різко підвищена спочатку і швидко падає; функція надійності добре описується законом Вейбула при $\alpha < 1$. Якщо у елемента майже немає прихованих дефектів, проте він швидко старіє, то небезпека відмови монотонно зростає, функція надійності добре описує його законом Вейбула при $\alpha > 1$.

Найбільш розповсюдженими номінальними параметрами головних знижувальних підстанцій гірничих підприємств є первинна напруга 110-150 кВ, тому найбільший інтерес представляє моделювання параметрів надійності силових трансформаторів 110-150/6-10 кВ. Розрахункову функцію $R(t)$ для трансформатора з високою напругою 150 кВ зображено на рис. 7.

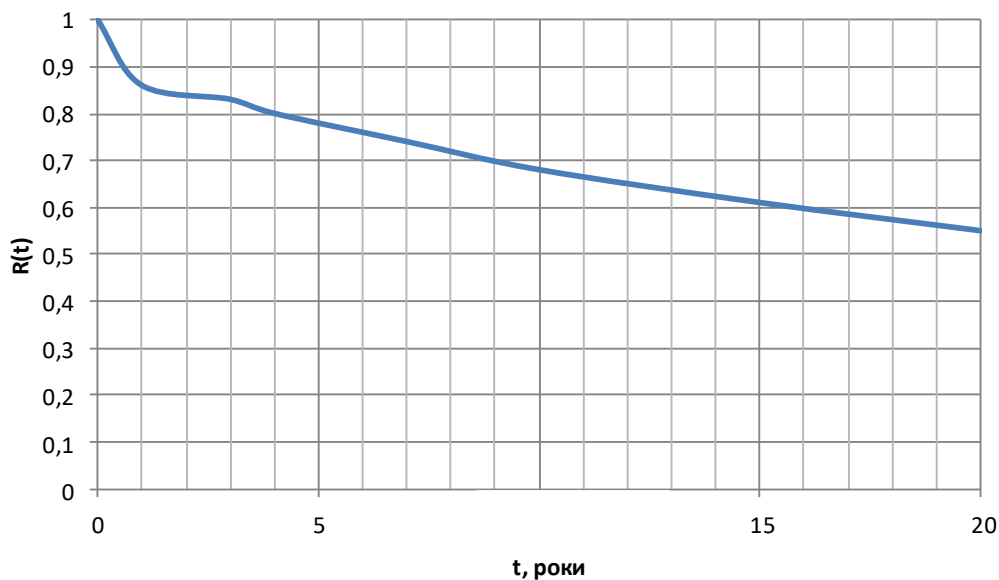


Рис. 7. Криві надійності $R(t)$ для силового трансформатора ТРДН-32000/150

Розроблено математичні моделі визначення «індексу надійності» для систем електропостачання гірничих підприємств, що на відміну від існуючих параметрів враховують індивідуальні показники надійності елементів системи електропостачання, параметри енергосистеми та рівні резервування електричних мереж. За загальноприйнятими підходами індекс розраховано за залежністю:

$$p = 1 - q_{\text{деф}}, \quad (6)$$

де $q_{\text{деф}}$ – інтегральна ймовірність виникнення дефіциту потужності.

В енергосистемі України значення індексу надійності знаходиться в межах 0,996. Перехід на більш високий рівень надійності (за прикладом країн з розвинутою економікою) потребує витрат $K_{\text{баз}}$ у розмірі:

$$K_{\text{баз}} = K \left(\frac{\lg p}{\lg p_{\text{баз}}} \right)^a, \quad (7)$$

де $K_{баж}$ – капіталовкладення для досягнення бажаного рівня індексу надійності $p_{баж}$; K – капітальні витрати, при яких забезпечується індекс надійності p ; $a > 1$ – показник ступеня. При $p = 0,996$ і $p_{баж} = 0,9998$ $K_{баж} = K(1,9)^a$. Отже потрібне збільшення витрат не менше, ніж у 1,9 рази.

Оціночні розрахунки показали: для забезпечення більш високого рівня надійності необхідні витрати в розмірі 0,1-0,2 тис. дол./рік на 1 МВт навантаження.

Враховуючи стратегічне значення вугільних шахт для забезпечення енергетичної незалежності України, розроблено математичну модель розрахунку показників надійності електрообладнання на прикладі типової схеми гірничого підприємства (рис. 8). Схему розбито на зони, в яких відбувається емісія електромагнітних завад (точка розподілу з енергосистемою, вузол навантаження 6-10 кВ зі стаціонарними установками, мережі 0,66 кВ підземних споживачів). Подібний підхід дозволяє отримати гнучкі залежності показників надійності при довільних кількості та потужності вентиляційних перетворювачів у мережі.

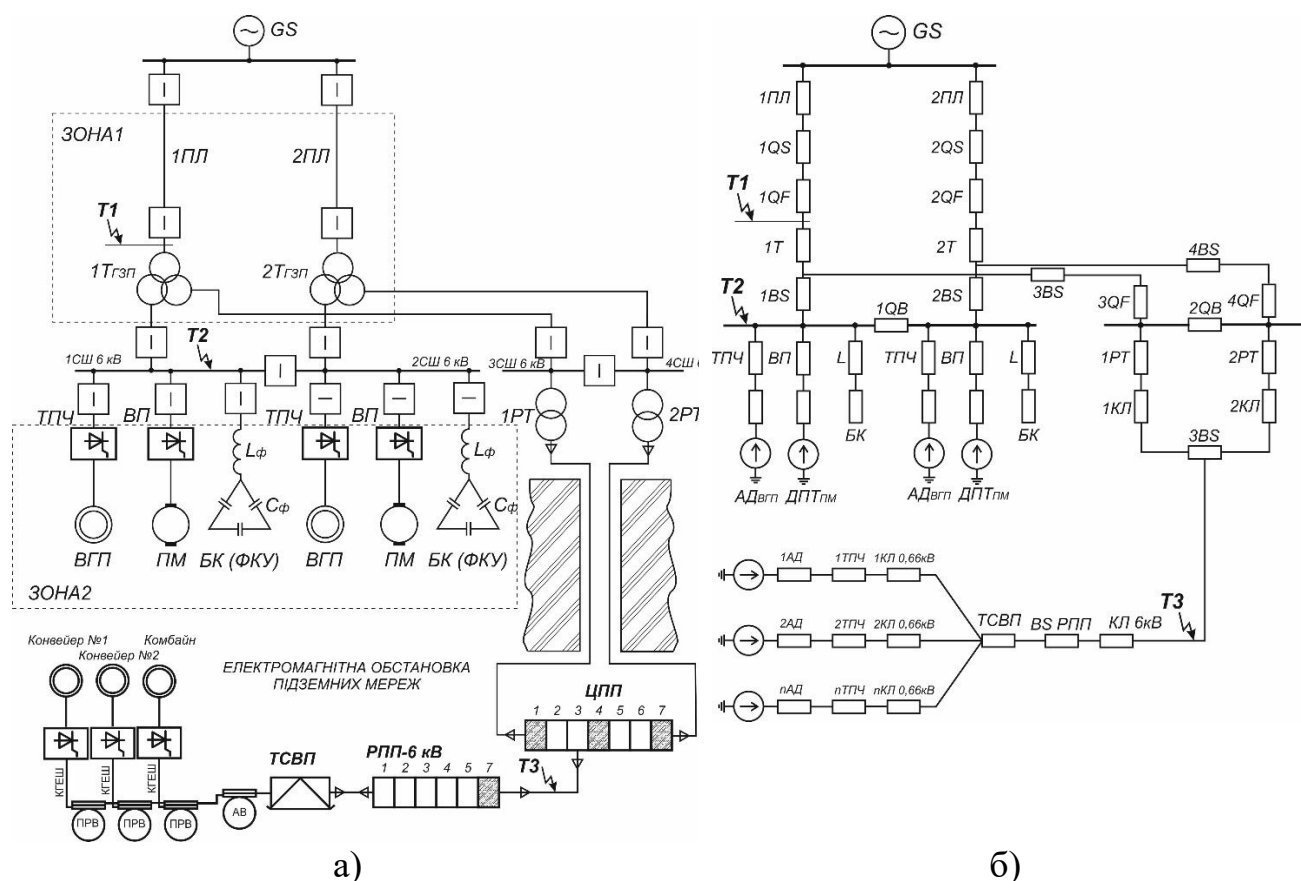


Рис.8. Принципова схема електропостачання вугільної шахти (а) та її схема заміщення (б)

Моделювання показників надійності електрообладнання виконано з урахуванням додаткових втрат активної потужності, що виникають при періодичній дії вищих гармонік. Додаткові втрати в трансформаторах визначаються із застосуванням коефіцієнтів ВГ:

$$\Delta P_n = \Delta P_{ном} \cdot \rho \cdot \sum_{n=2}^n \Lambda_n (K_{MTHD} U_n)^2, \quad (8)$$

де $\Delta P_{ном}$ – номінальні втрати при синусоїдальній напрузі; ρ – індекс втрат; $\Lambda_n = \frac{1}{n\sqrt{n}}$ – коефіцієнт гармонійних втрат і його значення залежать від кількості вищих гармонік у спектрі.

Додаткові втрати викликають дефіцит ізоляції та сприяють її швидкому старінню. Дефіцит ізоляції розраховується за формулою:

$$\Delta T = 0,086 \cdot \Delta \tau + \left(\frac{(0,086 \cdot \Delta \tau)^2}{2} \right), \quad (9)$$

де 0,086 – параметр Монтзингера, що не враховує несинусоїдальність напруги та вимагає уточнення; $\Delta \tau$ – перегрів ізоляції, викликаний ВГ.

Описана вище методологія може дати тільки значення дефіциту ізоляції, оскільки співвідношення між додатковими втратами ґрунтується на поправці, що всі трансформатори, електричні машини й інші елементи об'єднано в одну систему.

Тому значення додаткового нагріву електричних машин, викликане вищими гармоніками, можна знайти зі співвідношення:

$$\Delta \tau = \tau_s \cdot \frac{\Delta P_n}{\Delta P_{ном}}, \quad (10)$$

де $\Delta P_{ном}$ – номінальні втрати, викликані чистим синусоїдальним сигналом; ΔP_n – втрати при несинусоїдальній напрузі; τ_s – нагрів електрообладнання при синусоїдальній напрузі.

Результатом моделювання є отримання залежностей терміну служби електрообладнання від коефіцієнту викривлення синусоїдальності напруги. Електрообладнання, підключене до точок $T1$, $T2$, $T3$, має різні показники надійності, що дозволяє уніфікувати розрахунки залежно від місця підключення джерела електромагнітної перешкоди. Подібний підхід до оцінки енергетичної ефективності має універсальний характер та може бути застосований на підприємствах, де вентильні перетворювачі отримують живлення від різних ступенів розподілу електроенергії, а також при наявності джерел розподіленої генерації.

Отримані залежності дозволяють оцінити зниження терміну служби електрообладнання гірничих підприємств при застосуванні характерних для даного об'єкту дослідження співвідношень уніфікованих схем заміщення. Середнє значення зменшення терміну служби при коефіцієнті викривлення синусоїдальності 10 % складає 2-7 років – залежно від комбінації режимних параметрів. Це дозволило отримати специфічні комбінації параметрів мережі з режимними параметрами перетворювачів, що є важливою складовою оцінки енергетичної ефективності системи електропостачання при нестаціонарності нелінійного навантаження та постійних змінах конфігурації підземних електричних мереж (рис. 9).

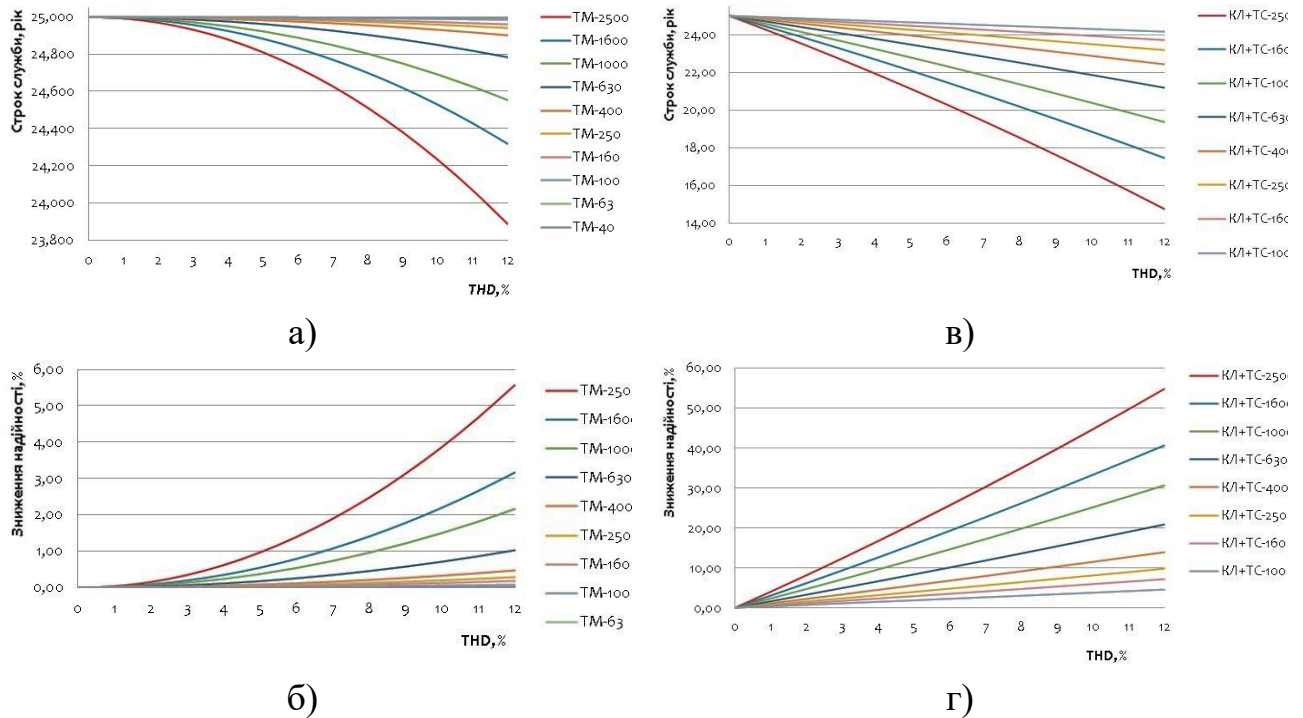


Рис. 9. Залежності показників надійності силових трансформаторів (а, б) і підземних кабельних ліній (в, г) від несинусоїдальності напруги

У **четвертому розділі** виконано дослідження раціональних перетоків реактивної потужності в електричних мережах гірничих підприємств при наявності нелінійних навантажень на стороні 6-10 кВ та 0,4-0,66 кВ.

При комплексному моніторингу параметрів електроспоживання та показників якості напруги в системах електропостачання вугільних шахт виявлено, що незадовільні значення коефіцієнту реактивної потужності в підземних і поверхневих електричних мережах формуються в результаті унікальних технологічних особливостей потужних стаціонарних установок, що характеризуються періодичною роботою електрообладнання без навантаження. При цьому коефіцієнт потужності (*power factor*) знижується до 0,3-0,4.

Для компенсації реактивної потужності та абсорбції ВГ застосовуються конденсаторні установки (БК) та фільтро-компенсуючі пристрої (ФКП), вибір параметрів яких для гірничих підприємств має свої особливості.

Кінцеве значення вибору тих або інших засобів оптимізації несинусоїдальних режимів напруги приймається на основі техніко-економічних розрахунків. Таким чином, задача полягає в складанні цільових функцій і обмежень при використанні окремих засобів мінімізації ВГ та ІГ з подальшим порівнянням варіантів за загальними народногосподарськими витратами, відповідними до оптимальних параметрів несинусоїдального режиму напруги при виконанні всіх накладених обмежень. При підключенні перетворювачів з підвищеною пульсністю випрямлення або з покращеними енергетичними характеристиками функція приведених витрат:

$$Z = E_{\text{пр}} K_{\text{пр}} + 3'_{n\Sigma\text{Зал}}, \quad (11)$$

де Z – загальні витрати, грн./рік; $E_{\text{пр}}$ – сумарний коефіцієнт відрахувань від капітальних $K_{\text{пр}}$ витрат на встановлювані перетворювачі; $Z'_{n\Sigma\text{зал}}$ – залишковий збиток, обумовлений несинусоїдальністю напруги, що також включає в себе вартість втрат у мережах, що живлять перетворювач, грн./рік.

У СЕП з ВП з 6-пульсною схемою випрямлення при встановленні одного ФКП функція приведених витрат є випуклою на сегментах параметрів $x_{p \min} \leq x_p \leq x_{p \max}$ і $Q_{p \min} \leq Q_p \leq Q_{p \max}$, що забезпечують налаштування ФКП на частоти 100-150 Гц. При цьому можливий один мінімум. При встановленні двох і більше ланок ФКП і точного налаштування їх на частоти найнижчих порядків ВГ напруги спектра ($n_p^{(6\Phi)} = 5, 7, \dots$) ситуація аналогічна: два і більше мінімумів можливі в електричних мережах з ВП при 12-пульсній схемі випрямлення. При резервних і децентралізованих схемах електропостачання значення частот налаштування ФКП збільшуються до значень 350-400 Гц.

Таким чином, при прогнозуванні значень дефіциту реактивної потужності у вузлах навантаження 6-10 кВ гірничих підприємств для компенсації рекомендується використовувати БК та ФКП з наступними значеннями: $Q_{\text{ФКП}} = (0,35 \dots 0,4) Q_p$, $Q_{\text{БК}} = (0,6 \dots 0,65) Q_p$.

Доведено, що компенсація реактивної потужності в електричних мережах гірничих підприємств при наявності потужних нелінійних навантажень і вищих гармонік вимагає обґрунтування нових алгоритмів пошуку оптимального розподілу ємності компенсуючих пристроїв в мережах 0,4, 0,66 та 6...10 кВ. При цьому необхідно враховувати особливості зміни навантаження стаціонарних установок, нестаціонарних і нестабільних навантажень підземних споживачів та можливість обмеження потужності енергосистеми при децентралізованому електропостачанні. Для отримання цільової функції оптимізації компенсації реактивної потужності використано дві складові втрат активної потужності: втрати від перетоку реактивної потужності на частоті основної гармоніки та додаткові втрати при протіканні вищих гармонічних складових. Функція втрат активної потужності при цьому мінімізується та має наступний вигляд:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^m (Q_i - Q_{ki})^2 \cdot R_i / U^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{n=2}^p \left((Q_{ni} - Q_{ki})^2 \cdot R_{ni} / U_n^2 \right) \rightarrow \min, \quad (12)$$

де Q_i, Q_{ni} – реактивна потужність ділянки електричної мережі на основній частоті та на частоті вищих гармонік відповідно; Q_{ki} – сумарна потужність компенсуючих пристроїв на основній частоті та на частоті вищих гармонік; R_i, R_{ni} – опори елементів системи електропостачання на основній частоті та на частоті вищих гармонік відповідно; U_n – напруга n -ої гармоніки.

Відносний мінімум цільової функції визначається при умові недопущення генерації реактивної енергії в електричні мережі енергосистеми:

$$\sum_{i=1}^m Q_{ki} = Q_k, \quad \text{або} \quad \sum_{i=1}^m Q_{ki} - Q_k = 0. \quad (13)$$

Функція Лагранжа для наведеної цільової функції має вигляд:

$$L = \sum_{i=1}^m (Q_i - Q_{ki})^2 \cdot R_i / U^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{n=2}^p \left[(Q_{vi} - Q_{nki})^2 \cdot R_{ni} / U_n^2 \right] + \lambda \left(\sum_{i=1}^m Q_{ki} - Q_k \right) \rightarrow \min, \quad (14)$$

Мінімум функції Лагранжа має місце при прирівнюванні до нуля часткових похідних первинної функції:

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{k1}} = -2R_1(Q_1 - Q_{k1}) / U^2 - 2R_{n1}(Q_{n1} - Q_{k1}) / U_n^2 + \lambda \rightarrow \min, \quad (15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{k2}} = -2R_2(Q_2 - Q_{k2}) / U^2 - 2R_{n2}(Q_{n2} - Q_{k2}) / U_n^2 + \lambda \rightarrow \min,$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{k3}} = -2R_3(Q_3 - Q_{k3}) / U^2 - 2R_{n3}(Q_{n3} - Q_{k3}) / U_n^2 + \lambda \rightarrow \min,$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^m Q_{ki} - Q_k = 0.$$

Аналізуючи систему рівнянь (15), отримано співвідношення для оптимального розподілу ємності конденсаторних батарей за трьома рівнями розподілу електроенергії гірничого підприємства з урахуванням вимог електромагнітної сумісності:

$$\begin{aligned} R_1(Q_1 - Q_{k1}) + R_{n1}(Q_{n1} - Q_{k1}) &= R_2(Q_2 - Q_{k2}) + R_{n2}(Q_{n2} - Q_{k2}) = \\ &= R_3(Q_3 - Q_{k3}) + R_{n3}(Q_{n3} - Q_{k3}). \end{aligned} \quad (16)$$

Таким чином, при комплексній оцінці енергетичної ефективності роботи системи електропостачання гірничих підприємств отримано залежності оптимального розподілу компенсуючих пристроїв за рівнями ієрархії розподілу електроенергії. При цьому, маючи достовірну інформацію про технічні параметри системи електропостачання та режими роботи нелінійного навантаження, можна отримати нові співвідношення кількості й потужності засобів компенсації реактивної потужності.

Відмінності отриманої цільової функції та її рішення полягають в одночасному врахуванні втрат потужності на основній гармоніці та на частотах вищих гармонік. Враховуючи високе значення частки нелінійного навантаження та перспективу переходу до децентралізованого принципу побудови систем електропостачання, необхідно вводити низку змінних, що враховують несинусоїдальність, в усі основні електротехнічні розрахунки (вибір елементів СЕП, розрахунок струмів КЗ, вибір уставок релейного захисту тощо). Тільки в результаті комплексного дослідження з виводом поправкових коефіцієнтів на вказані параметри можна забезпечити надійне функціонування та можливість роботи систем електропостачання потужних підприємств взагалі.

При дослідженні схем електропостачання з розподіленою генерацією отримано значення регулюючого ефекту за різних комбінацій параметрів

енергосистеми і відновлюваних джерел енергії. При цьому регулюючий ефект для показників якості напруги підвищився на 21...45 %, що підкреслює надважливість дотримання норм електромагнітної сумісності при впровадженні концепції Smart Grid та відмові від централізованого електропостачання для всіх суб'єктів народного господарства.

Використання підходів, заснованих на застосуванні відносних втрат потужності в мережі, що також представляють собою часткові похідні від параметрів досліджуваних процесів, підтверджує достатню коректність отриманих результатів, що характеризує економічний еквівалент реактивної потужності.

У **п'ятому розділі** виконано дослідження залежностей втрат електричної енергії від показників якості напруги та зв'язків втрат з енергетичною ефективністю.

Виконаний аналіз літературних джерел і результатів наукових досліджень вітчизняних та світових вчених показав: відносні втрати електроенергії в електричних мережах промислово розвинених країн світу знаходяться в межах 4-6 %. Ці значення визначаються з низки показників, у тому числі внутрішнього валового продукту (ВВП), що характеризує кінцевий результат виробничої діяльності економічних одиниць у сферах виробництва і визначається вартістю товарів і послуг, вироблених цими одиницями для кінцевого використання. Такі промислово розвинені країни характеризуються високим значенням внутрішнього валового продукту за паритетом купівельної здатності (ПКЗ) на душу населення, що перевищує 50 тис. доларів США. У той же час в країнах з ВВП за ПКЗ менше 10 тис. дол. США відносні втрати більші. У Молдові, Росії, Албанії, Польщі відносні втрати перевищують 20 %. В Україні значення ВВП у 2015-2016 роках склало 8500 доларів США, а рівень відносних втрат – близько 20 %. Проблема для енергетики України полягає в тому, що існуючі методи розрахунку втрат електроенергії не відповідають сучасному стану електричних мереж і складу навантаження промислових підприємств та житлово-комунального сектору. Враховуючи зміну характеру навантаження, що полягає у використанні електроенергії в перетвореному вигляді, при переході до новітніх принципів побудови систем електропостачання необхідне врахування рівнів електромагнітної сумісності та стану мережі живлення в розрахунках загальних втрат. Тому розроблено і запропоновано до використання низку поправок у розрахунки додаткових втрат потужності.

Розроблено математичні моделі для дослідження електромагнітної складової втрат при несинусоїдальності напруги, що визначаються збільшенням втрат активної потужності, споживання активної та реактивної потужностей і прискоренням старіння ізоляції електрообладнання.

Додаткові втрати активної потужності, обумовлені несинусоїдальністю напруги, при встановленому режимі роботи елементів визначають за виразом:

$$\Delta P_n = \frac{\Delta P_{ном}}{z_{1*}^2} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(K_{MTHD} U_{n*})^2}{n\sqrt{n}}, \quad (17)$$

де $\Delta P_{ном}$ – номінальні втрати активної потужності в струмопровідних частинах електрообладнання, кВт; $z_{1*} = z_1/z_{ном}$ – відносний повний опір елемента мережі струму основної частоти; $U_{n*} = U_n/U_{ном}$ – відносне значення гармоніки напруги порядку n ; n – число гармонік напруги, що враховуються.

При протіканні через елемент системи електропостачання (двигуни, трансформатори, конденсатори, кабелі тощо) вищих гармонік струму має місце прискорення старіння ізоляції, обумовлене дією на неї як додаткового нагріву струмоведучих частин, так і діелектричного нагріву під дією височастотних електромагнітних полів. Відносне (по відношенню до синусоїдального режиму струму) скорочення терміну служби ізоляції Δt_{n*} визначають як

$$\Delta t_{n*} = \begin{cases} 0,087\tau_1 \frac{\Delta P_n}{\Delta P_{ном}} & \text{– для ізоляції класу А, Е;} \\ 0,069\tau_1 \frac{\Delta P_n}{\Delta P_{ном}} & \text{– для ізоляції класу В, F.} \end{cases} \quad (18)$$

При розрахунку втрат, обумовлених додатковим тепловим старінням ізоляції, відносне скорочення терміну її служби оцінюється відповідним відносним збільшенням відрахувань ΔB_{p*} на реновацію електрообладнання

$$\Delta t_{n*} = \Delta B_{p*}.$$

Щорічний збиток (грн/рік), обумовлений додатковими втратами активної потужності та додатковим тепловим старінням ізоляції електрообладнання, розраховують за виразом

$$Y_n^{(\Delta P)} = \beta T^{(s)} \Delta P_n^{(s)} 10^3 + \Delta B_{p*}^{(s)} B_{p*}^{(s)} K^{(s)}, \quad (19)$$

де β – вартість 1 кВт·год втрат електроенергії (грн/кВт·год); $T^{(s)}$ – тривалість робіт s -го виду електрообладнання (тис. год/рік); $B_{p*}^{(s)}$ – нормований коефіцієнт відрахувань на реновацію від капітальних затрат $K^{(s)}$ s -го виду електрообладнання.

Таким чином, змінюючи значення коефіцієнтів несинусоїдальності для гірничої промисловості, отримано можливість прогнозувати темпи старіння ізоляції електрообладнання, зони збільшення втрат електроенергії та виконати оцінку електромагнітних збитків від неякісної напруги в умовах відсутності повної інформації про режим системи електропостачання.

В основу математичної моделі розрахунку додаткових втрат потужності покладено поправкові коефіцієнти k_{Rv} опорів елементів електричних мереж з урахуванням поверхневого ефекту при протіканні вищих гармонік (рис. 10-11).

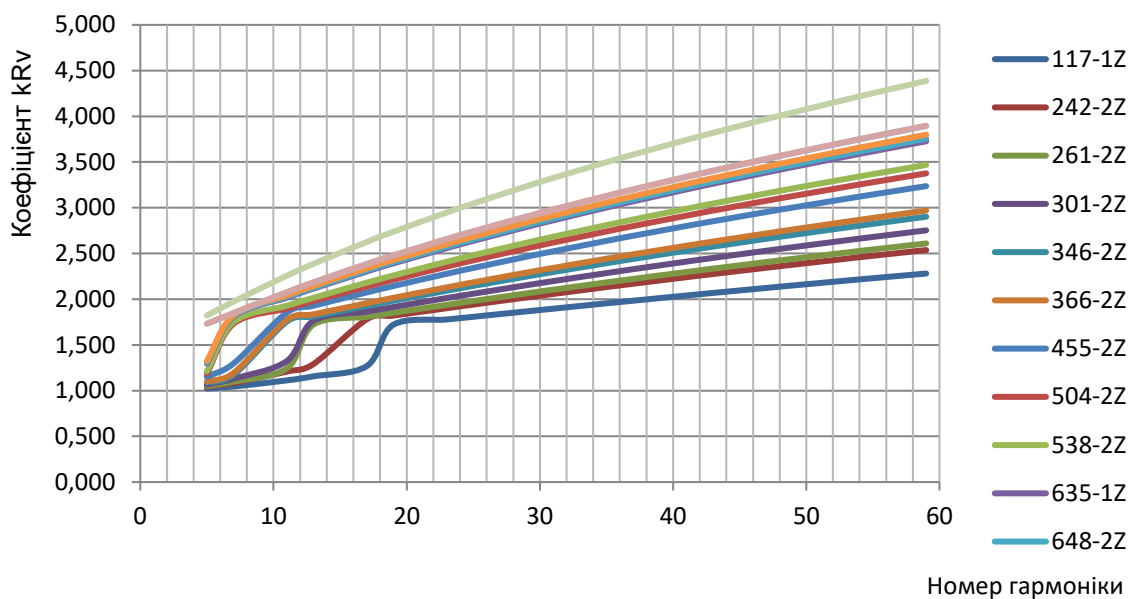


Рис. 10. Залежності коефіцієнта k_{RV} від номера ВГ проводів марки AEROZ

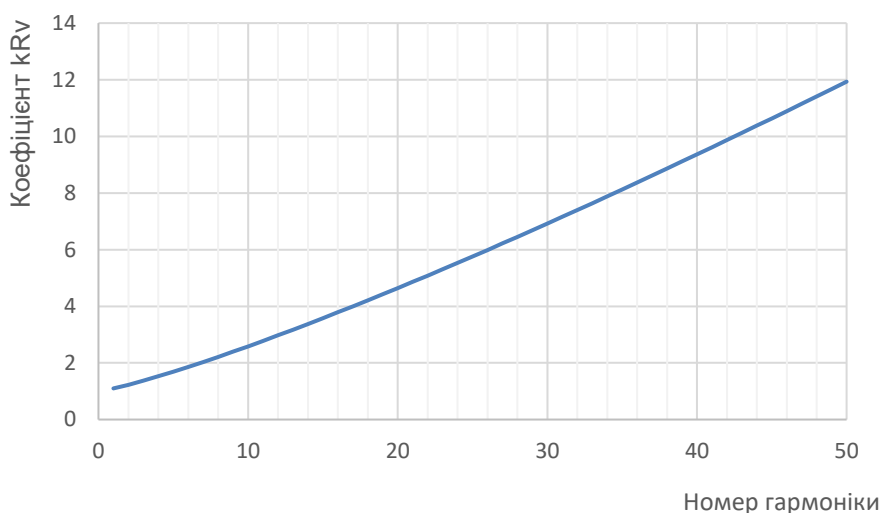


Рис. 11. Залежність коефіцієнта k_{RV} від номера ВГ для силових трансформаторів і реакторів

Із залежностей на рис. 10-11 видно, що при частотах вищих гармонік вище 1000 Гц опір елементів має лінійну залежність від частоти.

До моделі розрахунку додаткових втрат покладено типову схему електропостачання гірничого підприємства з трьома рівнями приєднання перетворювачів та еквівалентні схеми заміщення для кожної з точок (рис. 12). Подібний підхід до моделювання втрат має інноваційний характер, враховуючи, що приєднання нових видобувних комплексів має встановлену потужність близько 1 МВт. Крім того, майже всі електродвигуни комплексу приєднуються через тиристорні перетворювачі частоти (ТПЧ), тому врахування нелінійних навантажень на кількох рівнях розподілу електроенергії відкриває нові можливості пошуку раціональних режимів електричних мереж.

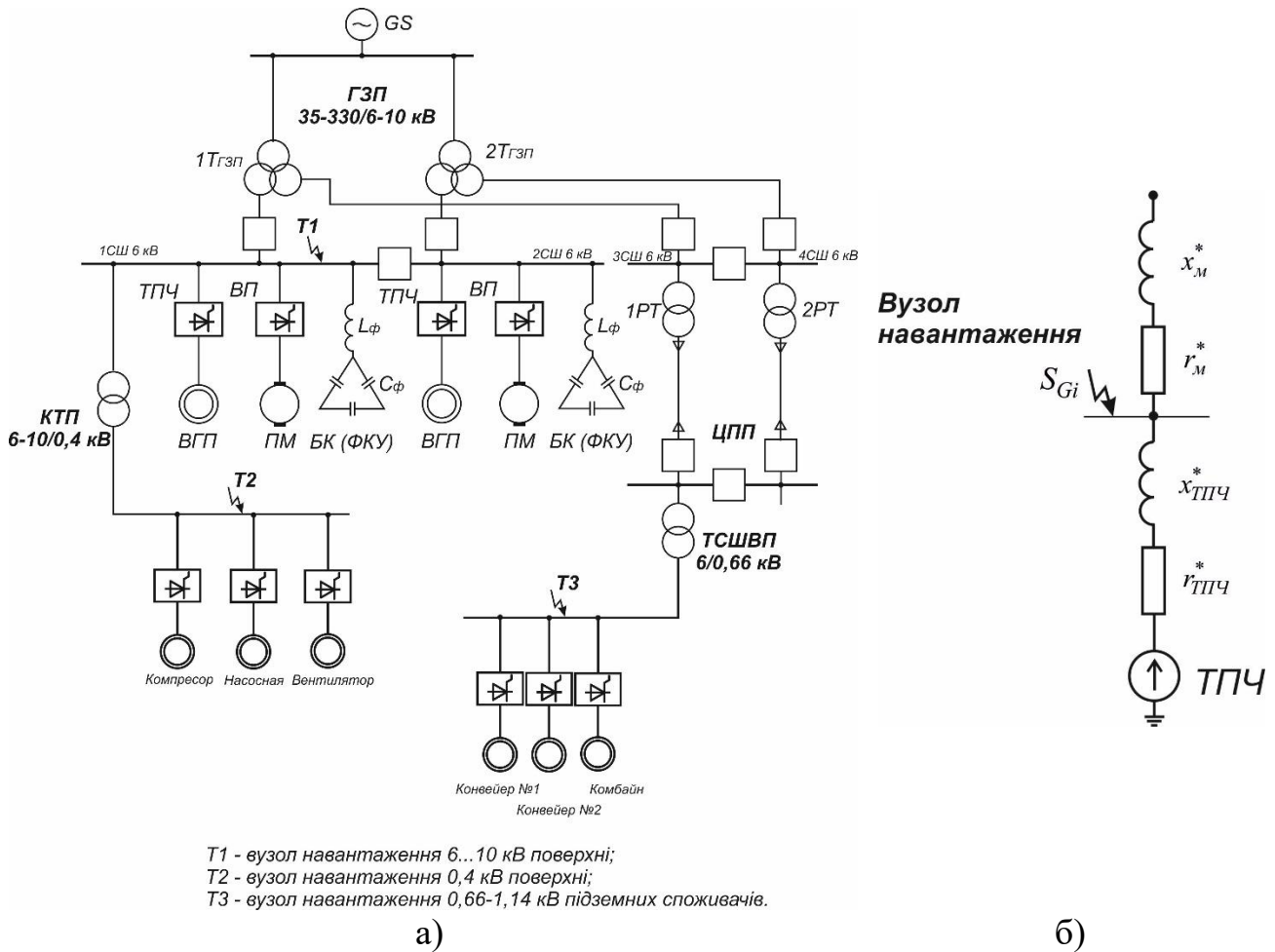


Рис. 12. Схема електропостачання гірничого підприємства з потужними нелінійними навантаженнями (а) та еквівалентна схема заміщення (б)

При розрахунках введено обґрунтоване припущення, що глибина комутаційних викривлень, а отже й вищі гармонійні складові напруги змінюються пропорційно значенню X (так званий параметр «віддаленість»):

$$X = \frac{z_M}{z_M + z_{ТПЧ}}, \quad (20)$$

де z_M – еквівалентний повний опір від умовної точки живлення нескінченної потужності (шини районної підстанції) до досліджуваної точки мережі живлення (T1, T2 або T3); $z_{ТПЧ}$ – повний опір ланцюга тиристорного перетворювача (опір від точки комутації до досліджуваної точки мережі).

На еквівалентній схемі заміщення (див. рис. 12) коло $(x_M^* - r_M^*)$ – еквівалентний контур мережі до точки i , а коло $(x_{ТПЧ}^* - r_{ТПЧ}^*)$ – активні й індуктивні опори перетворювача на межі підключення ТПЧ до розподільного пункту. Подібні схеми розраховані для всіх характерних точок ієрархії розподілу електроенергії гірничого підприємства (T1, T2, T3). Приклади розрахунку додаткових втрат для асинхронного двигуна потужністю 100 кВт і силового трансформатора ТМ-2500 наведені на рис. 13.

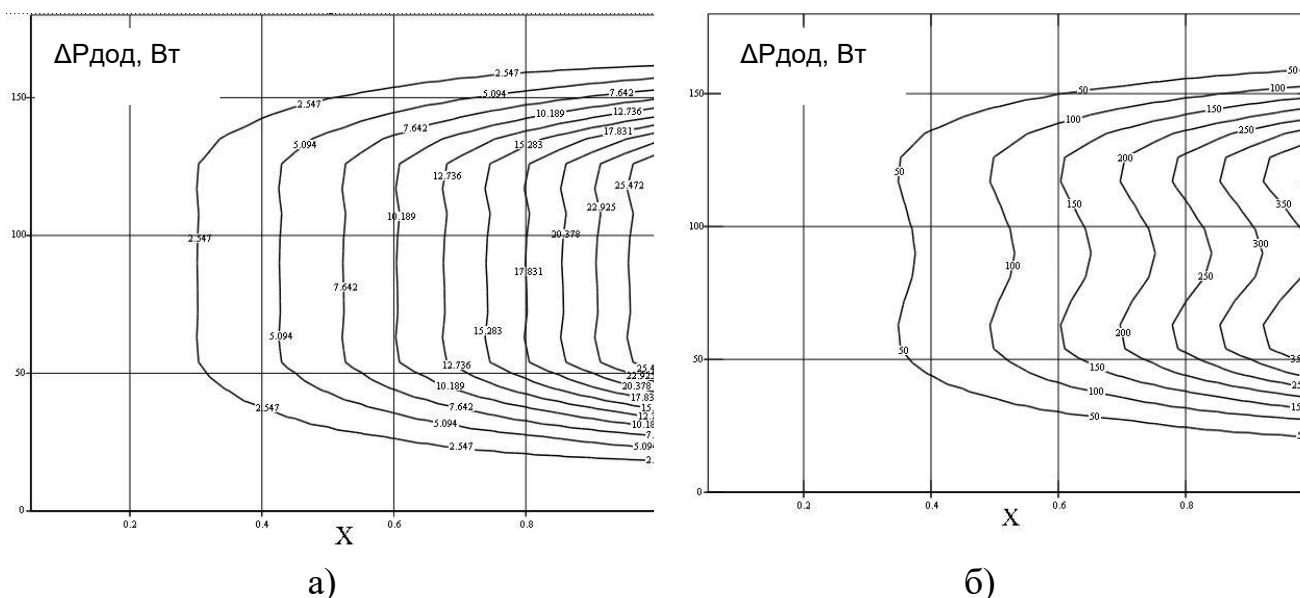


Рис. 13. Залежність додаткових втрат в елементах системи електропостачання від віддаленості джерела електромагнітної завади:
а) силові трансформатори 6...10/0,4; б) асинхронні двигуни

Результати комп'ютерного моделювання дозволили отримати залежності додаткових втрат активної потужності в електрообладнанні підприємства при різній віддаленості в системі електропостачання джерела електромагнітних завад. Показано, що при змінах принципів проектування електричних мереж і зниженні потужності КЗ значення ВГ та ІГ зростають у 2,5-3 рази порівняно з централізованим електропостачанням.

Для верифікації методики дослідження впливу перетворювачів енергії на режим системи електропостачання та визначення характеру функції додаткових втрат проведено порівняльний аналіз результатів розрахунку з низкою результатів інших авторів, а також з результатами експериментів і комп'ютерного моделювання. Доведено адекватність запропонованої математичної моделі та достовірність результатів моделювання. Порівняння результатів розрахунку втрат за запропонованою методикою з експериментальними даними показало середню розбіжність результатів 10 % при максимальній розбіжності 22 %. Експериментальні дані були отримані на діючих підприємствах при виконанні комплексного моніторингу споживання електроенергії.

У шостому розділі виконано оцінку практичної цінності й області застосування розроблених в даній дисертаційній роботі методів та підходів.

На підставі оціночних розрахунків визначено об'єми збитків від неякісної напруги в системі електропостачання гірничих підприємств, а також перенесено дану модель розрахунків на енергосистему України взагалі, що дало можливість застосувати розроблені методи та моделі в інших розрахункових умовах.

Розроблено інженерні методи визначення показників якості напруги в різних точках системи електропостачання гірничих підприємств на основі коефіцієнтів передачі. Моделі мають практичну цінність для швидкого

визначення рівнів електромагнітних завад при довільних варіаціях приєднань перетворювачів (рис. 14). При цьому враховано основні вимоги до побудови відокремлених схем електропостачання гірничих підприємств.

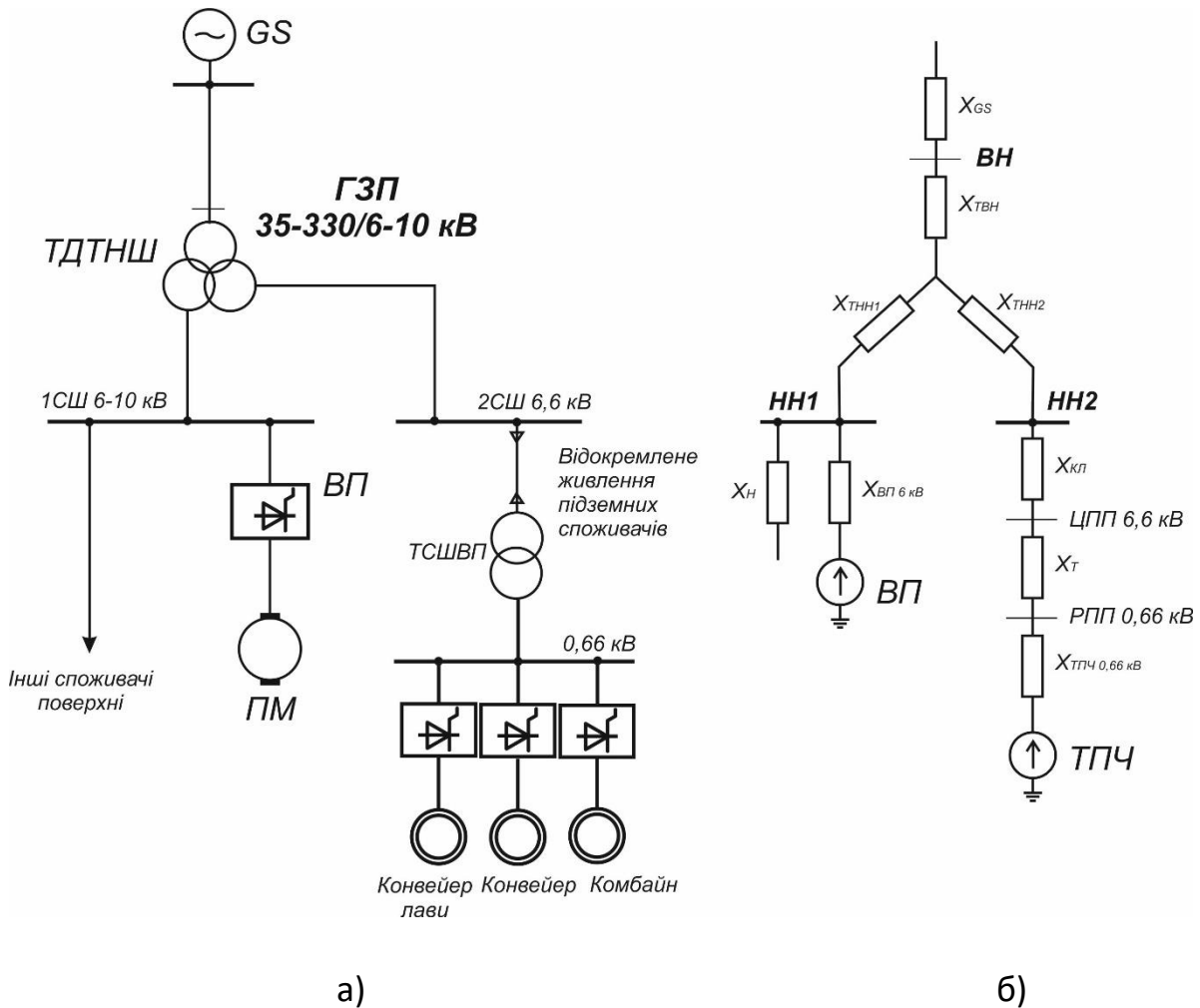


Рис. 14. Схема електропостачання шахти з триобмотковим трансформатором (а) та схема заміщення (б)

При складанні схем заміщення силових елементів (трансформаторів, реакторів, більшості навантажень) модуль передаточної функції представлено коефіцієнтом передачі із загальним виразом:

$$K_i = \frac{x_{ci}}{x_{ci} + x_{ei}}, \quad (21)$$

де x_{ci} – індуктивний опір СЕП до точки розрахунку; x_{ei} – індуктивний опір силового елементу.

Уніфіковані значення коефіцієнта передачі, запропоновані в даній роботі, знайшли застосування для практичних розрахунків показників якості напруги при збільшенні кількості та змінах місця підключення нелінійних навантажень в системах електропостачання гірничих підприємств. Слід відзначити, що подібні коефіцієнти можна розрахувати для будь-якої галузі промисловості, що є розвитком запропонованих наукових основ.

Значення коефіцієнтів передачі для типових трансформаторів з розщепленими обмотками з $U_{BH} = 150$ кВ

$S_{ном}, МВА$	$S_{КЗ}, МВА$	Коефіцієнти передачі	
		$K_{ВП-СТ}$	$K_{ВП-ВН}$
25	1000	0,145	0,564
	2000	0,122	0,488
	3000	0,104	0,386
	4000	0,095	0,323
40	1000	0,178	0,712
	2000	0,153	0,604
	3000	0,125	0,502
	4000	0,112	0,433
63	1000	0,228	0,815
	2000	0,195	0,706
	3000	0,156	0,613
	4000	0,136	0,546

Результати роботи впроваджено на гірничовидобувних підприємствах «ДТЕК ШУ імені Героїв Космосу» і «ДТЕК ШУ Павлоградська» у вигляді методики визначення додаткових втрат активної потужності та методики оптимального розподілу компенсуючих пристроїв при несинусоїдальності напруги.

Економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи забезпечується за рахунок зниження електромагнітних збитків від неякісної напруги. При цьому враховуються нові режими роботи електрообладнання з покращеними показниками енергетичної ефективності. Для умов системи електропостачання «ДТЕК Павлоградвугілля» ефект складає 250 тис. дол.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій набула подальшого розвитку теорія електромагнітної сумісності для створення методології пошуку раціональних енергоефективних режимів роботи системи електропостачання гірничих підприємств. Розвиток теорії полягає у встановленні закономірностей побудови системи електропостачання з оптимальними показниками надійності й якості залежно від режимних особливостей виробництва та обмежень електроенергетичної системи. Впровадження розроблених методів і моделей у систему керування якістю електроенергії збільшить період експлуатації електрообладнання, зменшить рівень втрат електроенергії в мережах і покращить стійкість систем електропостачання до електромагнітних завад.

Основні наукові та практичні результати, висновки і рекомендації полягають в наступному.

1. Аналіз електричних режимів типових приймачів електроенергії гірничих підприємств дозволив виявити їх унікальні особливості: циклічність роботи, значна частка часу роботи у ненавантаженому режимі. Враховуючи обов'язкове дотримання високих вимог надійності та вибухобезпечності систем електропостачання вугільних підприємств, визначаються особливі вимоги до структури електричних мереж і керування режимами електроспоживання. Поєднання показників надійності й якості електропостачання дозволило запропонувати комплексні показники ефективності роботи системи електропостачання, отримані при особливих комбінаціях режимів вугільних підприємств та енергетичної системи.

2. Використання коефіцієнтів графіків зміни несинусоїдальності струму та напруги окремих технологічних ланок вугільних підприємств, запропонованих в дисертації, дозволяє суттєво покращити якість розрахунків електромагнітних і технологічних збитків, що відрізняє отримані наукові результати оцінки енергоефективних режимів систем електропостачання від існуючих.

3. Доведено, що механізм забезпечення необхідних рівнів електромагнітної сумісності елементів системи електропостачання гірничого підприємства має дуальний характер оптимального рішення: по-перше, гармонійний фон вищих гармонік, що відіграє визначну роль у забезпеченні раціональних режимів на 80 %, корелюється з циклічними графіками роботи стаціонарних установок; по-друге, показники надійності елементів системи електропостачання погіршуються на 20-30 % при роботі керованих вентиляційних перетворювачів підйомних машин і вентиляторів, що обов'язково враховується при розробці енергоефективних заходів.

4. Результати моделювання резонансів у шахтних електричних мережах дали достовірні результати про можливі зони виникнення резонансів на частотах вищих гармонік та інтергармонік. Амплітудно-частотні характеристики, отримані для унікальних співвідношень параметрів енергосистеми і системи електропостачання потужного вугільного підприємства визначили діапазон зміни вхідного резонансного опору на рівні $Z/Z_1=80-120$. Це визначає важливість урахування потужності енергосистеми для виконання оптимальної компенсації реактивної потужності при децентралізованому принципі розподілу електроенергії.

5. Застосування індивідуальних графіків вищих гармонік стаціонарних установок шахти дозволяє підвищити точність визначення втрат електроенергії та економічних збитків на 19 %, що з урахуванням унікальних технологічних особливостей гірничих підприємств призведе до зниження загальних втрат електричної енергії в розподільчих мережах 0,66...10 кВ з 18 % до 11 % за рахунок обмеження роботи системи електропостачання в зонах з максимальним рівнем гармонік за рахунок фільтро-компенсуючих пристроїв.

6. Обґрунтовано вирішення проблеми електромагнітної сумісності систем електропостачання гірничих підприємств з мережею живлення, зокрема,

шляхом розробки методів і моделей, що забезпечують нормативні показники якості електроенергії в системах електропостачання за рахунок усунення резонансних явищ на частотах вищих гармонік та інтергармонік.

7. Отримали розвиток методи математичного моделювання фізичних процесів передачі та розподілу електроенергії в системах електропостачання гірничих підприємств з нелінійними електроприймачами, на основі яких визначаються рівні електромагнітної сумісності.

8. Нові теоретичні засади для виконання досліджень у сучасних системах електропостачання із зростанням потужностей нелінійних навантажень дозволили розвинути наукові основи аналізу та синтезу енергетичних процесів у багатофазних електричних системах і запропонувати методи корекції з урахуванням комплексної дії джерел електромагнітних завад, характерних для гірничих підприємств, та оцінки їх впливу на надійність і ефективність роботи основного електротехнологічного обладнання.

9. Розроблений метод компенсації реактивної потужності в електричних мережах на основі комплексного аналізу індивідуальних графіків вищих гармонік і координованого керування параметрами фільтро-компенсуючих пристроїв з обґрунтуванням заходів попередження та знешкодження аномальних режимів в системах електропостачання дозволяє оптимізувати перетоки реактивної потужності та зменшити втрати електричної енергії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Папаїка Ю.А., Півняк Г.Г., Жежеленко І.В. Енергетична ефективність систем електропостачання. – Д.: НТУ «ДП», 2018. – 149 с.
2. Папаика Ю.А., Лысенко А.Г. Выбор рациональных режимов электропотребления печей сопротивления с тиристорными регуляторами мощности. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2011. № 86. С. 7-12.
3. Папаика Ю.А., Мишанський Ю.А., Рухлов А.В. Анализ экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии на ПСП «шахта Степная». *Вісті Донецького гірничого інституту*. Донецьк. 2011. №2. С. 170-177.
4. Папаика Ю.А. Лысенко А.Г. Методика определения номинальной мощности цеховых трансформаторов при наличии электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2012. № 88. С. 28-33.
5. Папаика Ю.А., Хованская Е.И., Лысенко А.Г. Искробезопасность электрических цепей при откатке бесконтактными электровозами. *Науковий вісник НГУ*. 2012. № 4. С. 128-132. (науковометрична база **Scopus**).
6. Папаика Ю.А., Лысенко А.Г. Анализ режимов напряжения тяговой сети высокочастотного шахтного транспорта. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2012. № 89. С. 3-6.
7. Папаика Ю.А., Рогоза М.В., Бородай В.А., Якимец С.Н. Тягово-энергетические характеристики шахтных бесконтактных электровозов с

тиристорними преобразователями переменного напряжения. *Вісник Кременчуцького Національного Університету імені Михайла Остроградського*. 2014. № 2(2014)85. С. 9-14.

8. Папаїка Ю.А. Анализ составляющих полной мощности электропечей сопротивления с тиристорным регулированием. *Гірничя електромеханіка та автоматика*. 2013. № 91. С. 3-8.

9. Папаїка Ю.А., Берковський О.В. Аналіз несинусоїдальності напруги в системі електропостачання ТОВ МЗ «Дніпросталь» при роботі потужної дугової сталеплавильної печі. *Гірничя електромеханіка та автоматика*. 2015. № 94. С. 17-20.

10. Papaika Yu., Pivnyak G., Zhezhelenko I. Estimating economic equivalent of reactive power in the systems of enterprise power supply. *Науковий вісник НГУ*. 2016. № 5. С. 62-66. (науковометрична база **Scopus**).

11. Папаїка Ю.А. Жежеленко И.В., Лысенко А.Г. Оценочные методы определения экономического эквивалента реактивной мощности. *Гірничя електромеханіка та автоматика*. 2017. № 98. С. 3-7.

12. Папаїка Ю.А., Пивняк Г.Г., Жежеленко И.В., Лысенко А.Г. Интергармоники в системах электроснабжения. *Науковий вісник НГУ*. 2017. № 6. С. 109-114. (науковометрична база **Scopus**).

13. Папаїка Ю.А., Рогоза М.В., Лисенко О.Г., Якимець С.М. Використання імпульсних перетворювачів постійної напруги в системах керування приводом транспорту з індуктивною передачею енергії *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ. 2018. № 3(2018)43. С. 38-44.

14. Папаїка Ю.А., Жежеленко І.В., Лисенко О.Г. Оцінка енергетичної ефективності систем електропостачання за допомогою індексу надійності *Гірничя електромеханіка та автоматика*. 2018. № 100. С. 25-30.

15. Папаїка Ю.А., Рогоза М.В., Лисенко О.Г., Якимець С.М. Проблеми електромагнітної сумісності в задачах надійності та ефективності електропостачання з урахуванням тенденцій концепції Smart Grid. *Вісник Кременчуцького Національного Університету імені Михайла Остроградського*. 2018. випуск 4/2018(111). С. 16-22.

16. Papaika Yu., Lysenko O.G., Rogoza M.V., Stepanenko Yu.V., Tokar L.O. Energy losses withing the electric equipment in terms of poor voltage quality. *Вісник Кременчуцького Національного Університету імені Михайла Остроградського*. Випуск 1/2019 (114). Кременчук: КрНУ. 2019. С. 9-13.

17. Папаїка Ю.А. Жежеленко І.В., Лисенко О.Г., Родна К.С. Застосування індивідуальних графіків вищих гармонік в задачах електромагнітної сумісності та енергоефективності гірничих підприємств *Гірничя електромеханіка та автоматика*. 2019. № 101. С. 3-7.

18. Папаїка Ю.А., Рогоза М.В., Лисенко О.Г., Родна К.С., Якимець С.М. Оцінка вірогідності техніко-математичної моделі водовідливної установки в задачах електромагнітної сумісності. *Вісник Кременчуцького Національного Університету імені Михайла Остроградського*. 2019. Випуск 4/2019(117). С. 131-137.

19. Papaika Y., Pivnyak G., Zhezhelenko I. Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems. *CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems*. Leiden. The Netherlands, 2013 annual publication. P. 11-18. (науковометрична база **Scopus**).

20. Papaika Y., Pivnyak G., Rogoza M., Lysenko A. Advantages of application AC current thyristor converters in control circuits of electric traction drive of the no-contact electric mining locomotives. *Scientific Reports on Resource Issues (Volume 1)*. International University of Resources. Freiberg, Germany, 2014. P. 184-192.

21. Papaika Yu., Pivnyak G., Rogoza M., Lysenko A. Traction and energy characteristics of no-contact electric mining locomotives with AC current thyristor converters. *CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems*. Leiden, The Netherlands, 2015 annual publication. P. 1-6.

22. Papaika Yu., Zhezhelenko I. Reactive power and reliability of power supply systems. *CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems*. 2016. P. 47-51.

23. Papaika Yu., Rogoza M., Lysenko A., Tokar L. Estimation of electromagnetic compatibility of traction frequency converters for mine transport. "Energy Efficiency improvement of geotechnical systems", *Taylor&Francis Group (A Balkema Book)*. 2016. P. 27-32.

24. Papaika Y., Lysenko O., Kosobudzki G. Power Quality and Resonances in Power Supply Systems with non-sinusoidal Loads. *Advanced engineering forum*, Trans Tech Publication, Switzerland. 2017. P. 143-150.

25. Папаика Ю.А. Моделирование режимов цеховых электрических сетей при использовании технологического метода устранения несимметрии напряжений. Материалы Международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Россия, г. Самара, 21 ноября 2011 г.). Том 1. С. 313-318.

26. Папаика Ю.А., Мишанский Ю.А. Проблема электромагнитной совместимости в системах электроснабжения угольных шахт ОАО «Павлоградуголь». Матеріали міжнародної конференції "Форум гірників – 2011", (м. Дніпропетровськ, 12-15 жовтня, 2013 р.). С. 20-25.

27. Папаика Ю.А. Исследование резонансных явлений в системах электроснабжения угольных шахт. Матеріали науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених НГУ «Наукова весна – 2013» (м. Дніпропетровськ, 29 березня, 2013 р.). С. 400-401.

28. Папаика Ю.А., Пивняк Г.Г., Жежеленко И.В. Резонансные процессы в системах электроснабжения угольных шахт с мощными нелинейными нагрузками. Матеріали VII Всеросійської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Енергетика: управління, якість та ефективність використання енергоресурсів» (Росія, м. Благовещенськ, 4-6 червня, 2013 р.). С. 132-138.

29. Папаика Ю.А. Лысенко А.Г. Оценка состояния электромагнитной совместимости систем электроснабжения предприятий горно-

металургического комплекса Украины. Матеріали міжнародної конференції "Форум гірників – 2016", (м. Дніпро, 5-8 жовтня, 2016 р.). С. 267-271.

30. Папаїка Ю.А., Півняк Г.Г., Жежеленко І.В., Трофімов Г.Г. Якість електроенергії та енергозбереження. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Актуальні питання енергозбереження як вимога безпеки життєдіяльності", (м. Київ, 7-8 червня, 2018 р.). С. 9-14.

31. Рапаїка Yu. Intergarmonics in power supply systems. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Енергоефективність та енергозбереження 2017", (м. Дніпро, 16-17 листопада, 2017 р.). С. 31.

32. Папаїка Ю.А., Рогоза М.В., Лисенко О.Г. Проблема електромагнітної сумісності в задачах надійності та ефективності електропостачання. Матеріали міжнародної конференції "Форум гірників – 2018", (м. Дніпро, 10-13 жовтня, 2018 р.). С. 269-275.

33. Папаїка Ю.А., Степаненко Ю.В., Лисенко О.Г. Особливості впровадження інформаційних технологій Smart Grid для систем електропостачання України. Тези доповіді на XII Міжнародній конференції з використання інформаційних технологій в науці, освіті та промисловості (м. Дніпро, 23-24 листопада, 2016 р.).

34. Папаїка Ю.А., Степаненко Ю.В., Лисенко О.Г. Підвищення функціональності мікропроцесорних реле захисту. Тези доповіді на XIII Міжнародній конференції з використання інформаційних технологій в науці, освіті та промисловості (м. Дніпро, 22-23 листопада, 2017 р.).

35. Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г. Power quality and resonances in power supply systems with non-sinusoidal loads. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Енергоефективність та енергозбереження 2017", (м. Дніпро, 16-17 листопада, 2017 р.). С. 31.

36. Рапаїка Y., Kosobudzki G., Rogoza M., Lysenko O. Frequency and Parametric Characteristics of Direct Current Pulse Conversion Filter of a Contactless Locomotive. 14th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), (Szczecin, Poland, November 19th-21th 2018). (науковометрична база **Scopus**).

37. Папаїка Ю.А. Расчеты показателей электромагнитной совместимости: / Г.Г. Пивняк, И.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка — Д.: Национальный горный университет, 2014. — 114 с.

38. Рапаїка Yu. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education/ G. G. Pivnyak, I.V. Zhezhelenko, Y.A. Papaika; under the editorship of G.G. Pivnyak; Ministry of Education and Science of Ukraine, National Mining University – 5th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. – Dnipropetrovsk: NMU – 2015. – 419 pp.

39. Папаїка Ю.А. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І. Несен; за ред. Г.Г. Півняка; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро: НГУ, 2016. – 600 с.

40. Папаїка Ю.А., Рогоза М.В., Лысенко А.Г. Оценка электромагнитной совместимости тяговых преобразователей частоты для рудничного транспорта. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2015. № 94. С. 146-152.

У роботах, виконаних у співавторстві: написано третій, четвертий та восьмий розділи у монографії [1]; побудовано математичні моделі, виконано обчислювальні експерименти, проведено аналіз результатів у працях [2; 3; 5–7, 9; 11; 17; 19; 20–25; 27–37, 40]; виконано аналітичний огляд у праці [18]; аналіз, постановку проблеми, обговорення та узагальнення результатів у працях [4; 10; 26; 33]; обробку та аналіз експериментальних даних, порівняльний аналіз з чисельними результатами у працях [12–16]; теоретичне обґрунтування у праці [34]. У посібнику [37] автором написано другий розділ, у посібнику [38] – четвертий та десятий розділи, у підручнику [39] – третій та дев'ятий розділ.

АНОТАЦІЯ

Папайка Ю.А. Енергетична ефективність систем електропостачання гірничих підприємств з нелінійними навантаженнями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2019.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-технічної проблеми енергетичної ефективності систем електропостачання гірничих підприємств з потужними нелінійними навантаженнями за рахунок забезпечення оптимальних показників надійності й якості електропостачання. У дисертації набула розвитку теорія електромагнітної сумісності при зростанні кількості перетворювачів енергії в електричних мережах. Показано, що ефективне використання та зменшення кінцевого споживання електроенергії досягаються шляхом врахування унікальних технологічних особливостей гірничого електрообладнання, що дозволяє забезпечити нормальний режим роботи системи при зменшенні потужності енергосистеми і керувати процесами споживання електроенергії. На основі теорії електромагнітної сумісності розв'язано задачу прогнозування втрат електроенергії при змінних умовах децентралізованої системи електропостачання. Досліджено вплив режимних параметрів мережі та параметрів перетворювачів на резонансні явища в системах електропостачання. Розроблено рекомендації щодо вибору раціональних параметрів компенсуючих пристроїв в мережах 6-10 та 0,4-0,66 кВ при рішенні оптимізаційної задачі мінімізації втрат активної потужності.

Ключові слова: ефективність споживання електроенергії, система електропостачання, електромагнітна сумісність, надійність електропостачання, перетворювачі частоти, додаткові втрати електроенергії, математичне моделювання, стендові дослідження.

АННОТАЦИЯ

Папаика Ю.А. Энергетическая эффективность систем электроснабжения горных предприятий с нелинейными нагрузками. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепро, 2019.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы энергетической эффективности систем электроснабжения горных предприятий с мощными нелинейными нагрузками за счет обеспечения оптимальных показателей надежности и качества электроснабжения. Актуальность проведения научных исследований для решения комплексной проблемы энергетической эффективности заключается в массовом применении вентильных преобразователей на электротехнических комплексах угольных шахт, что привело к увеличению количества ремонтов и аварий, связанных с нарушением электромагнитной совместимости.

В диссертации получила развитие теория электромагнитной совместимости при возрастании количества преобразователей энергии в электрических сетях. Показано, что эффективное использование и уменьшение конечного потребления электроэнергии достигаются путём учета уникальных технологических особенностей горного электрооборудования, что позволяет обеспечить нормальный режим работы системы при уменьшении мощности энергосистемы и управлять процессами потребления электроэнергии. При этом впервые предложены и теоретически обоснованы коэффициенты графиков высших гармоник, учитывая которые разработана методика определения дополнительных потерь активной мощности. При выводе значений указанных коэффициентов учитывались горно-геологические условия, характерные для угольных предприятий Западного Донбасса.

На основе теории электромагнитной совместимости решена задача прогнозирования потерь электроэнергии при изменяющихся условиях децентрализованной системы электроснабжения. Исследовано влияние режимных параметров сети и параметров преобразователей на резонансные явления в системах электроснабжения. Результаты математического моделирования резонансов показали, что амплитудно-частотная характеристика узла нагрузки 6-10 кВ имеет плавающий характер и ее экстремум смещается на частоты интергармоник при переходе шахты на послеаварийные и децентрализованные схемы электроснабжения.

Предложены новые зависимости показателей надежности электрооборудования от показателей качества напряжения, которые позволяют оценить ускорение процесса старения изоляции от действия высших гармоник.

Разработаны рекомендации по выбору рациональных параметров компенсирующих устройств в сетях 6-10 и 0,4-0,66 кВ при решении оптимизационной задачи минимизации потерь активной мощности. При этом

учитывались три уровня распределения электроэнергии и значения реактивной мощности на частотах высших гармоник. Оценочные методы, предложенные для практического применения в условиях действующих предприятий, позволяют оценить и прогнозировать уровни показателей электромагнитной совместимости при нестационарных подземных электрических нагрузках и произвольных комбинациях мощности, количества и узла подключения к сети вентильных преобразователей.

Ключевые слова: эффективность потребления электроэнергии, система электроснабжения, электромагнитная совместимость, надежность электроснабжения, преобразователи частоты, дополнительные потери электроэнергии, математическое моделирование, стендовые исследования.

ABSTRACT

Папаика Юрий. Energy efficiency of power supply systems of mining enterprises with nonlinear loads - Qualifying scientific work published as a manuscript.

A Doctoral dissertation thesis for procurement of the D.Sc.Eng. degree in specialty 05.09.03 - "Electrotechnical Complexes and Systems". – Dnipro, 2019, Dnipro University of Technology.

The dissertation thesis focuses on solution of a cutting-edge scientific and technical problem of energy efficiency of mine power supply systems with heavy non-linear loads by ensuring optimal indicators of reliability and high quality of power supply. The thesis develops the theory of electromagnetic compatibility in conditions of the increase in the number of converters in electric networks. It is proved that effective use and reduction of the final power consumption can be achieved due to unique technological features of mining electric equipment, which allows to ensure the standard mode of the system operation when the energy system capacity decreases, and to control the processes of electric power consumption. The problem of predicting the power losses under changing conditions of decentralized electric network was solved on the basis of the theory of electromagnetic compatibility. The impact of the network mode parameters and converters' indicators on resonance phenomena in power supply systems is studied. Recommendations are compiled to ensure selection of the rational parameters of compensators in the circuits of 6-10 kV and 0,4-0,66 kV while solving the optimization problem of minimizing active power losses.

Keywords: energy efficiency of power supply systems, electromagnetic compatibility, reliability, frequency converters, higher harmonics, interharmonics, mathematical modeling, bench research.

ПАПАЙКА Юрій Анатолійович

**ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ З НЕЛІНІЙНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ**

(Автореферат)

Підписано до друку 15.11.2019. Формат 60x90/16.

Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 1,0.

Обл.-вид. арк. 1,0. Наклад 100 прим. Зам. №

Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»
49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19