

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого
Кафедра Електропостачання та енергоменеджменту

«До захисту в ЕК»

«До захисту допущено»

Директор інституту (декан факультету)

Завідувач кафедри

_____ Блаженко С.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

_____ Балюта С.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«__» _____ 2021 р.

«__» _____ 2021 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

з спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми «Електротехнічні системи електроспоживання»
на тему: «Компенсація реактивної потужності в системах електропостачання при наявності вищих гармонік напруги та струму»

Виконав: студент 2 курсу, групи ЗЕЛ-2-3М

_____ Скакун Олексій Анатолійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник _____ Балюта Сергій Миколайович _____
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)
(прізвище та ініціали) (підпис)

Консультанти _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____ Бондар В.І. _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що в цій дипломній
роботі немає запозичень із праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ 2021 р.

Національний університет харчових технологій
Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім акад І.С. Гулого
Кафедра Електропостачання та енергоменеджменту
Освітній ступень магістр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».
Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕПЕМ

/Балюта С.М./

« 09 » листопада 2020 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР

Скакун Олексій Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) «Компенсація реактивної потужності в системах електропостачання при наявності вищих гармонік напруги та струму»
керівник проекту (роботи) Балюта Сергій Миколайович, д. т. н., професор
затверджені наказом вищого навчального закладу від « 09 » 11. 2020р. № 935-кв
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 04 лютого 2021 року
3. Вихідні дані до роботи (проекту) є підвищення ефективності функціонування системи компенсації реактивної потужності шляхом зниження перевантажень конденсаторних батарей струмами вищих гармонік при різних умовах виникнення гармонійних спотворень в нарузі і струмі.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Розробка алгоритму формування схеми заміщення мережі для визначення режимів роботи і параметрів конденсаторних установок при різних умовах виникнення вищих гармонік. 2 Виявлення залежності перевантаження КБ від потужності компенсуючих пристроїв, потужності лінійної і нелінійної навантажень, спектрального складу струму і напруги, параметрів електричної мережі та опору додаткових реакторів в мережі підприємства. 3 Розробка способів і вибір параметрів засобів зниження впливу вищих гармонік на установки КРП при різних факторах виникнення спотворень. 4 Розробка структури системи КРП при наявності вищих гармонік, що виникають як з боку зовнішнього джерела щодо введення підприємства, так і з боку самого підприємства 5 Оцінка ефективності вибору структури системи КРП при наявності вищих гармонік напруги і струму на основі розрахункових досліджень.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентація (24 слайдів)

6. Консультанти розділів роботи (проекту)

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

По р. №	Назва етапів виконання проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Отримання завдання на дипломне проектування	09.11.2020	
2	Вступ	10-13.11.2020	
3	Характеристика проблеми і постановка завдання дослідження		
4	Загальна частина	14-24.11.2020	
5	Постановка завдання дослідження		
6	Науково-технічні проблеми врахування вищих гармонік в електричних мережах промислових підприємств		
7	Математичне моделювання електротехнічного комплексу при наявності вищих гармонік		
8	Технологічна частина	25.11-29.12.20	
9	Рациональний вибір потужності КБ за наявності спотворень струму і напруги		
10	Спеціальна частина	30.12.20-26.01.21	
11	Вибір додаткових пристроїв для забезпечення безпечної роботи КБ		
12	Структура системи КРП за наявності вищих гармонік		
13	Висновки		
14	Список посилань		
15	Оформлення пояснювальної записки	27-31.01.2021	

Магістрант

_____ (підпис)

Скакун О.А.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Балюта С. М.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Скакун О.А. Компенсація реактивної потужності в системах електропостачання при наявності вищих гармонік напруги та струму. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Освітньо-професійна програма: Електротехнічні системи електроспоживання. Магістерська робота. Національний університет харчових технологій. Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С. Гулого. Кафедра електропостачання та енергоменеджменту. – Київ.: НУХТ, 2021.

Стор. - __; рис. - ; табл. - ; джерел – .

У магістерській роботі виконано дослідження режимів системи компенсації реактивної потужності режимів системи електропостачання в системах електропостачання при наявності вищих гармонік напруги та струму.

Представлений алгоритм формування схеми заміщення мережі для визначення режимів роботи і параметрів конденсаторних установок при різних умовах виникнення вищих гармонік.

Виявлені залежності перевантаження конденсаторних батарей (КБ) від потужності компенсуючих пристроїв, потужності лінійної і нелінійної навантажень, спектрального складу струму і напруги, параметрів електричної мережі та опору додаткових реакторів в мережі підприємства.

Запропоновані способи визначення параметрів засобів зниження впливу вищих гармонік (ВГ) на установки компенсації реактивної потужності (КРП) при різних факторах виникнення спотворень. Розроблена структури системи КРП при наявності ВГ, що виникають як з боку зовнішнього джерела щодо вводу підприємства, так і з боку самого підприємства.

Ключові слова: ВИЩІ ГАРМОНІКИ, КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ; КОНДЕНСАТОРНІ БАТАРЕЇ, СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Annotation

Skakun O.A. Reactive power compensation in power supply systems in the presence of higher voltage and current harmonics. 141 - Power engineering, electrical engineering and electromechanics. Educational and professional program: Electrical power consumption systems. Master thesis. National University of Food Technology. Educational and Scientific Engineering and Technical Institute. acad. I.S. Gulogo. Department of Power Supply and Energy Management. - Kyiv .: NUHT, 2021.

P. - __; Fig. -; table. -; sources –

In the master's work the research of modes of system of compensation of reactive power of modes of system of power supply in systems of power supply in the presence of higher harmonics of voltage and current is executed.

The algorithm of formation of the scheme of substitution of a network for definition of operating modes and parameters of condenser installations at various conditions of occurrence of higher hormones is presented.

The dependences of capacitor bank (KB) overload on the power of compensating devices, power of linear and nonlinear loads, spectral composition of current and voltage, parameters of the electric network and resistance of additional reactors in the enterprise network are revealed.

Methods for determining the parameters of the means of reducing the influence of higher harmonics (VG) on the settings of reactive power compensation (RRP) for various factors of distortion are proposed. Developed the structure of the PKK system in the presence of VG, arising both from an external source for the input of the enterprise, and from the enterprise itself.

Keywords: HIGHER HARMONICS, REACTIVE POWER
COMPENSATION; CAPACITOR BATTERIES, POWER SUPPLY SYSTEM

АННОТАЦИЯ

Скакун А.А. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения при наличии высших гармоник напряжения и тока. 141 - Электроэнергетика, электротехника и электромеханика. Образовательно-профессиональная программа: Электротехнические системы электропотребления. Магистерская работа. Национальный университет пищевых технологий. Учебно-научный инженерно-технический институт им. акад. И.С. Гулого. Кафедра электроснабжения и энергоменеджмента. - Киев .: НУХТ, 2021.

Стр. - __; рис. -; табл. -; источников -.

В магистерской работе выполнено исследование режимов системы компенсации реактивной мощности режимов системы электроснабжения в системах электроснабжения при наличии высших гармоник напряжения и тока.

Представлен алгоритм формирования схемы замещения сети для определения режимов работы и параметров конденсаторных установок при различных условиях возникновения высших гармоник.

Обнаруженные зависимости перегрузки конденсаторных батарей (КБ) от мощности компенсирующих устройств, мощности линейной и нелинейной нагрузки, спектрального состава тока и напряжения, параметров электрической сети и сопротивления дополнительных реакторов в сети предприятия.

Предложенные способы определения параметров средств снижения влияния высших гармоник (ВГ) на установки компенсации реактивной мощности (КРМ) при различных факторах возникновения искажений. Разработанная структуры системы КРП при наличии ВГ, возникающие как со стороны внешнего источника по вводу предприятия, так и со стороны самого предприятия.

Ключевые слова: высшие гармоники, компенсация реактивной мощности; Конденсаторные батареи, СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Зміст

	Стор.
Вступ	9
РОЗДІЛ 1. НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ПРОБЛЕМИ ВРАХУВАННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	11
1.1. Вплив вищих гармонік на роботу електрообладнання.....	11
1.2. Особливості виникнення вищих гармонік в електричних мережах.....	14
1.3. Мінімізація вищих гармонік на конденсаторних батареях.....	18
1.4. Науково-технічні завдання розробки методів зменшення рівня вищих гармонік в електричних мережах промислових підприємств.....	22
1.5. Мета і завдання досліджень.....	24
Висновки до розділу 1.....	25
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПРИ НАЯВНОСТІ ВИЩИХ ГАРМОНІК.....	26
2.1. Вибір об'єкта дослідження.....	26
2.2. Аналіз існуючих схем заміщення для мереж, що містять вищі гармоніки.....	33
2.3. Математичне моделювання електричної мережі з КБ.....	38
2.4. Розрахунок показників надійності роботи КБ.....	48
Висновки до розділу 2.....	51
РОЗДІЛ 3. РАЦІОНАЛЬНИЙ ВИБІР ПОТУЖНОСТІ КБ ЗА НАЯВНОСТІ СПОТВОРЕНЬ СТРУМУ І НАПРУГИ.....	53
3.1. Принципи визначення потужності КБ при наявності спотворень..	53
3.2. Вибір потужності КБ з урахуванням коефіцієнта перевантаження.	54
3.3. Коригування параметрів обраних пристроїв, що компенсують коефіцієнт потужності.....	62
3.4. Алгоритм вибору потужності КБ.....	64
Висновки до розділу 3.....	65
РОЗДІЛ 4. ВИБІР ДОДАТКОВИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ КОНДЕНСАТОРНИХ БАТАРЕЙ.....	67
4.1. Зниження впливу вищих гармонік на КБ шляхом розміщення в мережі додаткових реакторів.....	67
4.2. Перевантаження на КБ в залежності від співвідношення лінійного і нелінійного навантаження.....	71
4.3. ВПЛИВ ОПОРУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ НА ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ КБ.....	78
4.4. Структура додаткових пристроїв системи компенсації реактивної потужності.....	81
Висновки до розділу 4.....	82
РОЗДІЛ 5. СТРУКТУРА СИСТЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗА НАЯВНОСТІ ВИЩИХ ГАРМОНІК.....	83
5.1. Розробка структури системи компенсації реактивної потужності при наявності спотворень струму і напруги.....	83

5.2 Моделювання електричної мережі при різних джерелах гармонійних спотворень.....	85
5.3. Аналіз роботи електричної мережі підприємства і вибір засобів зменшення перевантажень КБ.....	88
5.4. Моделювання режимів електричної мережі підприємства і порівняння їх з теоретичними результатами.....	95
5.5. Оцінка зниження терміну служби КБ.....	97
Висновки до розділу 5.....	98
ВИСНОВКИ.....	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	102
ДОДАТКИ.....	110
ДОДАТОК А.....	111
ДОДАТОК Б.....	112
ДОДАТОК В.....	113
ДОДАТОК Г.....	114

ВСТУП

В умовах збільшення вартості енергоресурсів, зростання виробництва та інфраструктури міст все більш актуальною стає проблема енергозбереження і зокрема, ефективного використання енергії. Більшість електричних установок разом з активною потужністю споживають і реактивну потужність, яка створює електромагнітні поля. При наявності реактивної потужності знижується якість електроенергії, збільшується оплата за електроенергію, виникають додаткові втрати енергії, перегрів проводів, перевантаження трансформаторів підстанцій, необхідність завищення потужності трансформаторів і перетину кабелів, просадки напруги в електромережі [43, 48].

Зменшення в розподільних мережах баластних потоків реактивної потужності за рахунок її компенсації у споживача або на кінцевих підстанціях електромережних компаній дозволяє:

- забезпечити підключення додаткових або збільшити встановлену потужність вже підключених споживачів (при наявності в енерговузла тих же обсягів активної потужності і тієї ж пропускної здатності мереж);
- споживачам електричної енергії збільшити виробничі потужності без збільшення струму в мережі;
- покращити техніко-економічну ефективність систем електропостачання споживачів і електромережних компаній [55];
- підвищити стійкість електроенергетичних систем, систем електропостачання та навантаження споживачів при зниженні і провалах напруги в мережі.

Одним з джерел реактивної потужності в навантажувальних вузлах є конденсаторні батареї (КБ) поперечного включення. Однак конденсатори практично ніколи не працюють при номінальних умовах. Це пояснюється тим, що напруга електричної мережі змінюється в часі при зміні навантажень, крім того, форма кривих напруг і струмів в більшій чи меншій мірі можуть відрізнятися від синусоїдальних. Причиною цього є насичення трансформаторів

і головним чином наявність в мережі інших нелінійних елементів, потужних вентилів: випрямлячів і тиристорних перетворювачів.

В ряді випадків несинусоїдальність кривої напруги досягає 10-15% [12]. В результаті, значно зростають активні втрати в електродвигунах і трансформаторах, прискорюється старіння ізоляції кабелів, електричних машин і трансформаторів, знижуються якість і надійність роботи систем автоматики, телемеханіки та зв'язку. У більшості випадків є неможливим ефективне використання конденсаторних батарей.

Значне збільшення амплітуд гармонік струму, які знаходяться в резонансних і близьких до резонансних режимах, призводить до того, що діючі значення несинусоїдального струму в колі батарей конденсаторів значно перевищують допустимі. При певних умовах струм КБ може не тільки бути вище номінального, а й в декілька разів його перевершувати. Це призводить до перевантаження конденсаторів, комутаційної апаратури і в кінцевому підсумку до їх виходу з ладу. Навіть при дотриманні показників якості електричної енергії, зокрема, у разі відповідності коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги в мережі підприємства нормативним значенням, перевантаження на конденсаторах струмами вищих гармонік може перевищувати допустиме значення. Це одна з причин актуальності гашення вищих гармонік.

РОЗДІЛ 1. НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ПРОБЛЕМИ ВРАХУВАННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1. Вплив вищих гармонік на роботу електрообладнання

В даний час на промислових підприємствах значного поширення набули частотні електроприводи, а також навантаження, вольт або вебер-амперні характеристики яких нелінійні. Зазвичай такі приймачі називають нелінійними. Ці навантаження споживають з мережі струм, крива якого виявляється несинусоїдною, що призводить до появи вищих гармонік струму. В результаті виникають нелінійні спотворення кривої напруги мережі, вид яких для прикладу наведено на рис. 1.1.

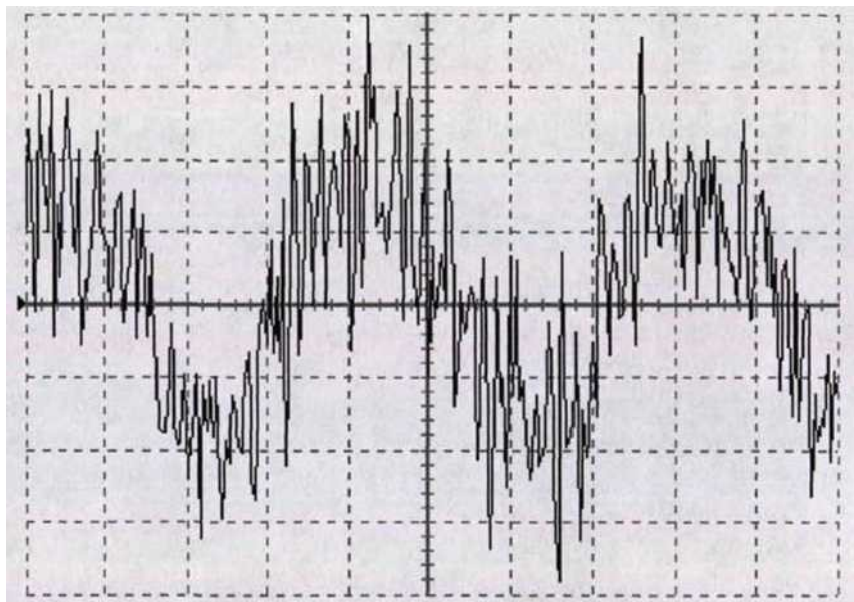


Рис. 1.1. Крива напруги однієї фази підстанції 0,4 кВ машинобудівного заводу

Інтенсивне поширення нелінійного навантаження на підприємствах призводить до появи гармонійних спотворень напруги не тільки в межах самого підприємства, але і в мережі живлення. Тому при підключенні декількох промислових споживачів до однієї розподільчої підстанції та наявності потужного нелінійного навантаження на одному з них спотворюється напругу живлення групи підприємств. Так, наприклад, робота нелінійного навантаження металургійних заводів, частка якої сягає 50% [83], може призводити до

спотворення напруги іншим промисловим споживачам. Відомі випадки, коли напруга на шинах тягових підстанцій змінного струму спотворюється внаслідок роботи електрорухомого складу зі статичними, а отже, спотворюється і напруга на затискачах споживачів інших промислових підприємств, підключених до того ж ввідного фідера [69].

Дослідження режимів роботи електричної мережі ряду підприємств, таких як ПАТ «Укртатнафта» та ін., показали, що в мережі цих підприємств має місце значне спотворення струму і напруги вищими гармоніками [71, 84].

Вищі гармоніки напруги чинять негативний вплив на роботу системи електропостачання, викликаючи: додаткові активні втрати в трансформаторах, електричних машинах і мережах; підвищену аварійність в кабельних мережах; збільшення струмів і напруг вищих гармонік внаслідок паралельного і послідовного резонансів; зниження ефективності процесів генерації, передачі, використання електроенергії, а також обмежене застосування батарей конденсаторів для компенсації реактивної потужності [67, 83].

Гармоніки струму в лініях призводять до додаткових втрат електроенергії. У кабельних лініях гармоніки напруги збільшують вплив на діелектрик паралельно зі збільшенням максимального значення амплітуди гармоніки. Це, в свою чергу, збільшує число ушкоджень кабелю і вартість ремонтів [25].

При роботі синхронних і асинхронних двигунів в умовах несінусоїдальної напруги виникають додаткові втрати потужності, зумовлені вищими гармоніками струму в обмотках ротора і статора [30]. З'являються також додаткові втрати в сталі ротора і статора. Основна частина додаткових втрат від гармонік в синхронних машинах приходить на частку демпферної обмотки і обмотки статора; втрати в обмотці ротора, як правило, виявляються меншими. На рис. 1.2 показані залежності середнього значення питомих втрат від номера вищої гармоніки. З розгляду кривих випливає, що відношення $\Delta'_{iv} / \Delta'_{ном}$ має найбільше значення на частотах гармонік низького порядку, в першу чергу другого і третього. Те ж саме відноситься і до асинхронних двигунів (рис. 1.3).

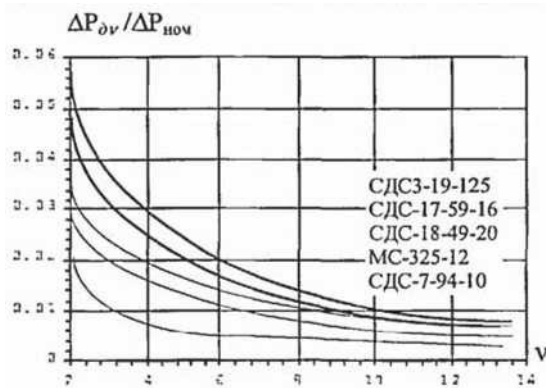


Рис. 1.2. Криві відносних втрат від вищих гармонік в асинхронних двигунах

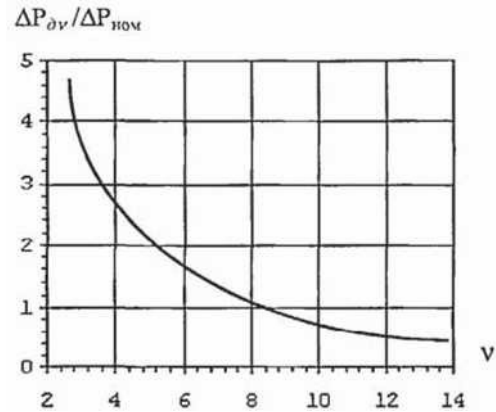


Рис. 1.3. Крива відносних втрат від вищих гармонік в синхронних двигунах

Гармоніки струму в статорі викликають відповідні моменти обертання: гармоніки, що утворюють пряму послідовність в напрямку обертання ротора, а зворотної послідовності утворюють моменти у зворотному напрямку.

Струми гармонік в статорі машини викликають рушійну силу, що приводить до появи на валу обертаючих моментів в напрямку обертання магнітного поля гармоніки. Зазвичай вони дуже малі і до того ж частково компенсуються через моменти протилежного напрямку. Незважаючи на це, вони можуть привести до вібрацій валу двигуна.

Додаткові втрати - одне з найбільш негативних явищ, що викликається гармоніками в обертових машинах. Вони призводять до підвищення загальної температури машини і до місцевих перегрівів, найбільш імовірних в роторі. Так, при коефіцієнті спотворення синусоїдальної форми кривої напруги $K_U = 10\%$ сумарні втрати в мережах підприємств, великих промислових центрів, мережах електрифікованої залізничної транспорту можуть досягати 10 ... 15% [31].

Гармоніки напруги викликають у трансформаторах збільшення втрат на гістерезис і втрат, пов'язаних з вихровими струмами в сталі, а також втрат в обмотках. Тому потрібно встановлювати більшу потужність трансформатора. Скорочується також термін служби ізоляції.

Найбільш вразливим приймачем щодо вищих гармонік є КБ, призначені для компенсації реактивної потужності (КРП), оскільки їх опір обернено пропорційний частоті напруги живлення.

При несинусоїдній напрузі на затискачах батареї конденсаторів в їх діелектриках з'являються додаткові активні втрати, зумовлені вищими гармоніками [29, 34, 53]. Додаткові втрати в електричних конденсаторах призводять до їх перегріву. У загальному випадку конденсатори проектуються так, щоб допускати певні струмові перевантаження. Конденсатори, що випускаються в Великобританії, допускають перевантаження 15%, в Європі і Австралії - 30%, в СНД - 30% [7]. При перевищенні цих величин, що спостерігаються в умовах підвищених напруг вищих гармонік на вводах конденсаторів, останні перегріваються і виходять з ладу.

З літературних джерел [30, 33, 38, 82] відомо, що перевантаження за струмом КБ від несинусоїдальності напруги може досягати величин, що в декілька разів перевищують допустимі значення.

З вищесказаного випливає, що від вищих гармонік, перш за все, схильні до виходу з ладу КБ.

Оскільки КБ представляють собою частину всього електротехнічного комплексу підприємства, включаючи електричні мережі, тому необхідно добре уявляти природу виникнення вищих гармонік в електричній мережі, що є істотним чинником при вивченні їх впливу на роботу конденсаторів.

1.2. Особливості виникнення вищих гармонік в електричних мережах

Для зменшення впливу вищих гармонік на електрообладнання, перш за все, необхідно знати джерело і природу їх виникнення, а також зону їх дії. Причому, як буде показано нижче, слід чітко розділяти виникнення вищих гармонік або в струмі, або в напрузі, або в струмі і напрузі одночасно.

Останнім часом основними джерелами вищих гармонік є електроприводи з вентильними перетворювачами. Робота вентильних перетворювачів заснована на безперервній комутації транзисторних або тиристорних ключів [46, 49, 75].

Найбільш популярними є 6-ти і 12-пульсні схеми частотних перетворювачів. Решта багатопульсних схеми засновані на паралельному з'єднанні 6-пульсної груп. Важливим фактором у цьому випадку є з'єднання обмоток трансформаторів, що входять до складу перетворювачів.

Джерелами вищих гармонік можуть бути потужні однофазні приймачі, до яких, наприклад, відносяться електричні печі, електричний транспорт і т.д. На відміну від попередніх, ці приймачі можуть вносити і несиметрію в напругу трифазної системи. Потужність представлених вище приймачів варіюється в дуже широких межах і може досягати декількох мегавольтампер.

Крім цього, джерелами вищих гармонік можуть бути: електрозварювальні установки [21, 30], системи освітлення з застосуванням газорозрядних і флуоресцентних ламп [32], а також, але в меншій мірі машини, що обертаються.

Зупинимося на першому виді джерел вищих гармонік - асинхронному електроприводі з вентильним перетворювачем, як найбільш поширеному. Для подання принципу впливу вищих гармонік на роботу мережі і навантаження скористаємося найпростішою однофазною схемою заміщення, показаною на рис. 1.4.

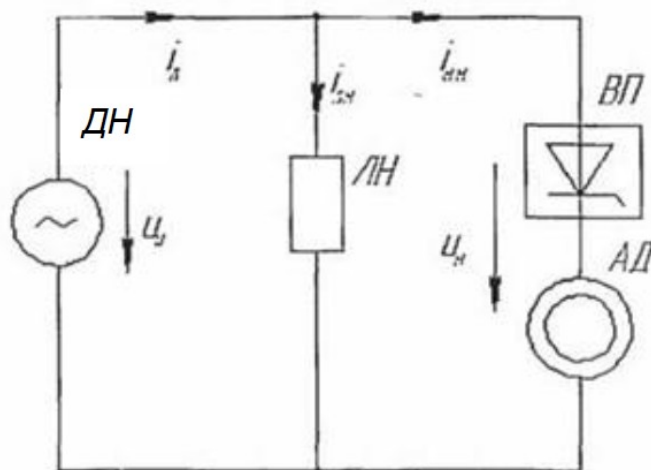


Рис. 1.4. Однофазна схема заміщення: ДН - джерело синусоїдальної напруги; ЛН – лінійне навантаження; ВП – вентильний перетворювач; АД – асинхронний двигун, i_n – загальний струм мережі; $i_{лн}$ – струм лінійного

навантаження; $i_{нн}$ – струм нелінійного навантаження; u_n – напруга на навантаженні; u_n – напруга джерела

Очевидно, що напруга на навантаженні, незалежно від наявності нелінійності буде синусоїдальним. Струм на ЛН ($i_{лн}$) також буде синусоїдальним. Несинусоїдальними будуть струми $i_{нн}$ і $i_s = i_{лн} + \dots$. Ніякого впливу нелінійність не робить на ЛН. Картина нереальна, але дозволяє чітко уявити принцип виникнення несинусоїдальності, причому тільки в струмі.

Розглянемо іншу, більш реальну схему, представлену на рис. 1.5.

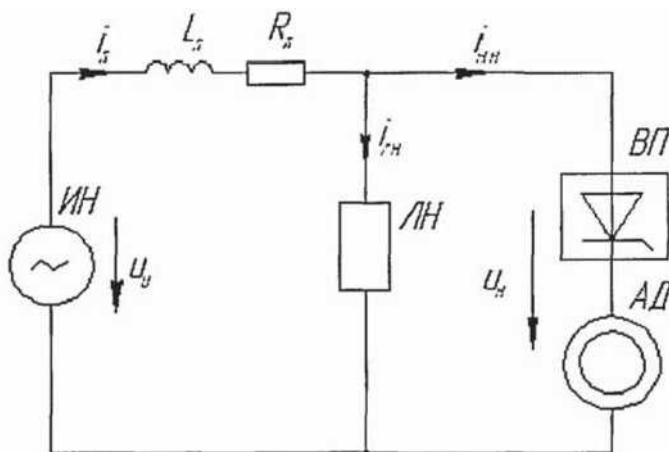


Рис. 1.5. Однофазна схема заміщення: R_n і L_n - активний і індуктивний опір живильної мережі

На відміну від попередньої схеми, тут додані R_n і L_n - відповідно активний опір і індуктивність мережі живлення. Аналогічно схемою на рис. 1.4, джерелом вищих гармонік в мережі є нелінійний струм $i_{нн}$. Напруга u_n буде нелінійною, оскільки :

$$u_n = \dots - \dots \cdot \dots - \frac{di_n}{dt} \dots = \dots + \dots \quad (1.1)$$

де u_n - синусоїдальна напруга.

Падіння напруги $R_n \cdot i_n + L_n \frac{di_n}{dt}$ від несинусоїдального струму i_n створює несинусоїдальність в напрузі u_n . Звідси випливає, що несинусоїдальність напруги на навантаженні обумовлена падінням напруги в мережі і тільки цим.

Наступний ще більш складний варіант представлений на рис. 1.6.

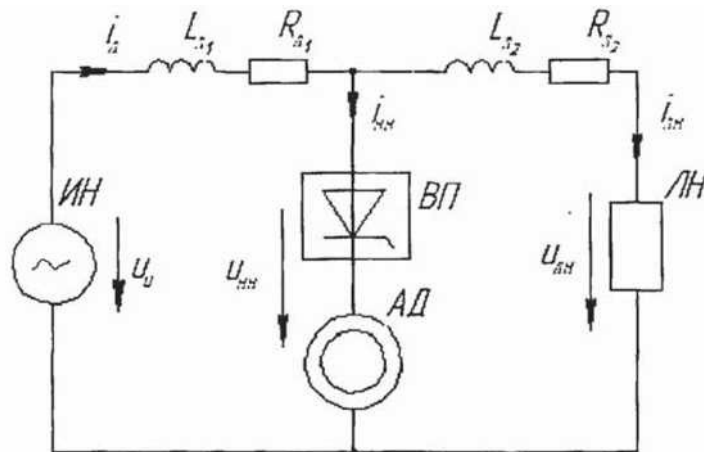


Рис. 1.6. Однофазна схема заміщення: $R_{л1}, R_{л2}, L_{л1}, L_{л2}$ - відповідно активні опори й індуктивності першої і другої лінії, $u_{нл}$ - напруга на нелінійному навантаженні; $u_{лн}$ - напруга на лінійному навантаженні.

Знову ж, джерелом несинусоїдальності в мережі є струм $i_{нл}$. Падіння напруги в першій лінії:

$$\Delta u_{л1} = i_{л1} \cdot R_{л1} + L_{л1} \frac{di_{л1}}{dt}; \text{ але } i_{л1} = i_{лн} + i_{нл}, \quad (1.2)$$

тоді:

$$\Delta u_{л1} = i_{лн} \cdot R_{л1} + L_{л1} \frac{di_{лн}}{dt} + i_{нл} \cdot R_{л1} + L_{л1} \frac{di_{нл}}{dt} = \Delta u_{лн} + \Delta u_{нл} = u_{лн} - u_{нл} \quad (1.3)$$

тобто напруга $u_{нл}$ буде несинусоїдальна через несинусоїдальне падіння напруги в першій лінії. Несинусоїдальність струму викликана несинусоїдальністю напруги $u_{нл}$:

$$u_{нл} = i_{лн} \cdot R_{л2} + L_{л2} \frac{di_{лн}}{dt} + u_{лн} \quad (1.4)$$

Очевидно, що в цьому випадку, чим більше $R_{л1}$ і $L_{л1}$ тим більше буде несинусоїдальна напруга $u_{нл}$.

Нарешті розглянемо ще один варіант схеми, показаної на рис. 1.7.

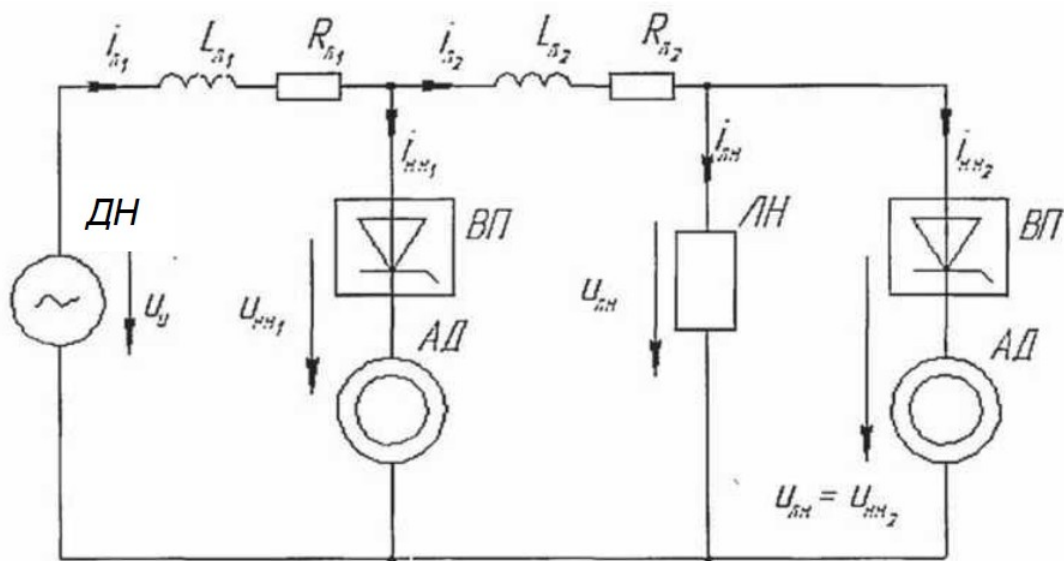


Рис. 1.7. Однофазна схема заміщення мережі

У цьому випадку напруга $u_{нн}$ буде несинусоїдальною внаслідок несинусоїдальності падіння напруги в першій лінії ($R_{л1}, L_{л1}$). Несинусоїдальність же напруги $u_{лн} = \dots$ буде обумовлена двома факторами: несинусоїдальністю напруги $u_{нн}$ і падінням несинусоїдальної напруги в другій лінії ($R_{л2}, L_{л2}$), обумовленого вже несинусоїдальним струмом $i_{лн}$ та $i_{нн2}$.

З вищесказаного випливає, що якщо вищі гармоніки надходять із зовнішнього (живильної) мережі, то досліджувати вищі гармоніки необхідно перш за все в напрузі. Якщо вищі гармоніки обумовлені роботою навантаження підприємства, то перш за все необхідно дослідити струм навантаження.

1.3. Мінімізація вищих гармонік на конденсаторних батареях

Нераціональне управління потоками реактивної потужності, низька надійність електротехнічного комплексу промислового підприємства, наявність вищих гармонік в мережі призводять до збільшення оплати за електроенергію, витрат на технічне обслуговування і ремонт електрообладнання, погіршення якості електроенергії, як в системі, так і в мережах підприємства.

Дуже часто вимоги міждержавного стандарту ГОСТ 13109-97 «Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення» не виконуються, зважаючи на складний вирішення завдання підвищення якості електроенергії в різних умовах виникнення вищих гармонік (ГОСТ передбачає спотворення несинусоїдальності кривої напруги в межах від 5 до 8%) [22].

Одним з параметрів якості електричної енергії, за яким оцінюється ефективність роботи засобів зниження рівня вищих гармонік, є коефіцієнт несинусоїдальності, значення якого регламентується в [22]. Розрахунок даного коефіцієнта здійснюється за формулою:

$$K_{нс} = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_{ном}}, \quad (1.5)$$

де U_v - діюче значення напруги v -й гармоніки; $U_{ном}$ - номінальна напруга мережі; n - порядковий номер останньої з врахованих гармонік. У зарубіжній літературі таким параметром якості електроенергії відповідає коефіцієнт Total Harmonic Distortion (THD), допустимі і граничні значення якого регламентуються в [81].

Зниження несинусоїдальності напруги забезпечується або раціональною побудовою системи електропостачання підприємства, при якій параметри, що характеризують несинусоїдальність напруги, будуть перебувати в допустимих межах, або застосуванням спеціальних схем комутації нелінійних навантажень, а також коригувальних пристроїв. На практиці, як правило, поєднують різні методи [29].

Одним з напрямків робіт зі зниження вищих гармонік є збільшення числа фаз вентильних перетворювачів. Найбільш поширеним є збільшення кількості фаз в число раз, кратне 6. Для досягнення цього можливі два шляхи: використання трансформаторів, що живлять перетворювачі, зі спеціальним виконанням обмоток, що дозволяють реалізувати потрібний багатофазний режим перетворення; забезпечення еквівалентного багатофазного режиму групи перетворювачів, кожна з яких має схему з меншим числом фаз.

Зниження рівнів гармонік засобами мережі живлення досягається в основному раціональною побудовою схеми електропостачання, при якій забезпечується допустимий рівень гармонік напруги на шинах споживача. Найбільш поширеними засобами є: застосування трансформаторів, що живлять перетворювачі, з підвищеною напругою 110-220 (330) кВ; живлення нелінійних навантажень від окремих трансформаторів або підключення їх до окремих обмоток триобмоткових трансформаторів; з'єднання в зірку первинних обмоток трансформаторів і вторинних обмоток в трикутник (в цьому випадку гармоніки струму 3-го порядку не протікають по первинній обмотці трансформатора).

Відомі коригувальні пристрої, що дозволяють зменшити вплив генерованих вищих гармонік, до яких відносяться насамперед: фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКУ) [85], активні фільтри і установки поздовжньо-ємнісної компенсації (КПК) [58, 78].

ФКУ є досить простий пристрій, що складається з послідовно з'єднаних реактора і конденсаторів. При зміні складу навантаження, і як наслідок, зміні гармонійного складу кривих напруги і струму, неможливо за допомогою ФКУ забезпечити придушення вищих гармонік в необхідному обсязі.

Активні фільтри - найбільш сучасний пристрій не тільки для поліпшення якості електроенергії з точки зору вищих гармонік, але і для збільшення коефіцієнта потужності електричних мереж. Фільтри володіють двома основними недоліками: велика ціна і відсутність конструкцій, які відповідають умовам їх роботи в мережах 6-10 кВ.

Відомий спосіб підвищення якості електричної енергії, що полягає в зниженні рівня вищих гармонік шляхом настроювання кількох груп з послідовних контурів на резонанс напруг за 5, 7, 11 і 13 гармонікам [30]. Принцип дії таких пристроїв заснований на виникненні резонансу в їх власному коливальному контурі, налаштованому на певну частоту. Фільтри можуть встановлюватися в мережі для поділу лінійних і нелінійних навантажень (загороджувальні фільтри) і для поглинання (шунтування) струмів вищих гармонік.

Недоліком використання даних фільтрів є неповна компенсація вищих гармонік. Для кожного порядку гармонік потрібен окремий фільтр, налаштований на цю гармоніку. Як правило, встановлюються кілька фільтрів, що призводить до збільшення вартості обладнання.

Відомий спосіб підвищення якості електричної енергії, що полягає у виділенні з напруги електричної мережі вищих гармонік напруги, а також першої гармоніки, яка визначається напругою нульової послідовності, випрямленні виділених гармонік напруги, перетворення випрямленої напруги в змінну напругу з частотою, рівною частоті першої гармоніки мережі, і повернення змінної напруги в електричну мережу [61].

Недоліком цього способу є неповна компенсація вищих гармонік, обмежена характеристиками фільтрів, що входять до його складу. Спосіб заснований на застосуванні силових напівпровідникових систем, що призводить до збільшення вартості обладнання. Багато сучасних засобів зниження рівня вищих гармонік засновані на застосуванні таких систем [4, 51, 62, 64].

У роботах [5, 6, 26, 28] розглядаються сучасні технології підвищення якості електроенергії при її транспортуванні по лініях електропередач. Для компенсації втрат напруги і управління потоками реактивної потужності пропонуються пристрої поздовжньої і поперечної компенсації з тиристорним керуванням. Використовуються гнучкі системи передачі енергії змінного струму, керовані реактори трансформаторного типу для компенсації зарядної потужності ліній електропередач і зменшення втрат потужності в лінії. Більшість з цих систем засновані на принципах, які були відомі ще півстоліття тому. Вирішальне значення має вклад силової електроніки, що є ключем до розвитку протягом прийдешніх десятиліть.

Розглянуті в [6, 26, 28] пристрої мають безсумнівні переваги і недоліки, їх принципи застосовні також для вирішення завдань щодо зниження впливу вищих гармонік на роботу електрообладнання, зокрема конденсаторних батарей, що розглядаються в даній роботі.

Завдання компенсації реактивної потужності в мережах промислових підприємств повинна вирішуватися з одночасним виключенням перевантажень КБ струмами вищих гармонік. Так, наприклад, пропонуються засоби регулювання реактивної потужністю з інтенсивним використанням силової перетворювальної техніки [10, 18, 39, 44, 50, 72]. Пристрої компенсації реактивної потужності на основі КБ з тиристорним регулюванням, фільтрокомпенсуючі пристроїв, тиристорно-реакторні групи спільно із застосуванням активних фільтрів різних видів для вирішення завдання підвищення якості електричної енергії це комплексні пристрої, що мають два основні недоліки: велика ціна і відсутність конструкцій, які відповідають умовам їх роботи в мережах 6-10 кВ. Одночасно зі збільшенням кількості елементів, що входять до складу комплексного пристрою, знижується його надійність.

Таким чином, розглянуті основні засоби мінімізації впливу вищих гармонік на роботу електрообладнання, зокрема КБ. Проведений теоретичний огляд дозволяє виявити переваги та недоліки даних методів, визначити малодосліджені області проблеми і вибрати варіант напрямки подальших досліджень.

1.4. Науково-технічні завдання розробки методів зменшення рівня вищих гармонік в електричних мережах промислових підприємств

Наявність реактивної потужності є несприятливим фактором для мережі в цілому [45, 47]. В результаті цього виникають додаткові втрати в провідниках внаслідок збільшення струму, знижується пропускна здатність розподільчої мережі, відхиляється напруга мережі від номіналу (падіння напруги через збільшення реактивної складової струму мережі живлення).

Для боротьби з цими явищами виконується КРП. Одним з основних джерел реактивної потужності є конденсаторні установки, які мають порівняно

низьку вартість, малі втрати енергії і можуть бути встановлені практично будь-якої потужності в будь-якій точці мережі.

Додатковою проблемою, тісно пов'язаною з рівнем реактивної потужності, є наявність вищих гармонік як наслідок застосування частотно-регульованих приводів, навантажень керованих тиристорами і інших нелінійних електроприймачів. Передчасний вихід з ладу КБ і їх комутаційно-захисної апаратури в мережах промислових підприємств - досить поширене явище. В даний час на багатьох промислових підприємствах, де є потужні вентиляльні перетворювачі, батареї конденсаторів без застосування спеціальних заходів захисту від вищих гармонік, по суті, не працюють.

Таким чином, завдання КРП повинна вирішуватися в комплексі з одночасним покращенням якості споживаної електричної енергії в мережах промислових підприємств.

Показники режимів роботи КБ в умовах появи вищих гармонійних складових напруги і струму значно погіршуються, що призводить до неефективної компенсації реактивної потужності. Зростає кількість відключень конденсаторних установок внаслідок перевантаження їх струмами вищих гармонік, скорочується термін їх служби, збільшуються втрати потужності і напруги.

Створення математичної моделі електричної мережі з вентиляльного навантаженням і компенсують пристроями являє собою складну задачу. Ці питання розглядалися в роботах Б.М. Абрамовича, Дж. Арріллага, І.В. Жежелснко, Ю.С. Железко, В.П. Ілляшова, А.К. Шидловського, Я.Е. Шклярського і ін. Розроблені в цих роботах моделі дозволяють розраховувати режими електричної мережі при наявності нелінійного навантаження. В основі моделей лежить заміщення такого навантаження або джерелами напруги (при відомому спектрі гармонік), або джерелами струму. Однак в них не враховані різні умови виникнення вищих гармонік, як показано в розділі 1.2.

Крім цього, до цих пір не розроблена структура системи КРП при наявності гармонійних спотворень, що виникають як з боку зовнішнього джерела щодо введення підприємства, так і з боку самого підприємства.

У зв'язку з цим очевидна необхідність розробки структури і вибору параметрів системи КРП в зазначених умовах.

1.5. Мета і завдання досліджень

На основі аналізу існуючих розробок, наведеного вище, були визначені основні цілі та завдання досліджень. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування системи компенсації реактивної потужності шляхом зниження перевантажень конденсаторних батарей струмами вищих гармонік при різних умовах виникнення гармонійних спотворень в напрузі і струмі. Основні завдання досліджень, поставлені при виконанні науково-дослідної роботи:

1. Розробка алгоритму формування схеми заміщення мережі для визначення режимів роботи і параметрів конденсаторних установок при різних умовах виникнення вищих гармонік;

2. Виявлення залежності перевантаження КБ від потужності компенсуючих пристроїв, потужності лінійної і нелінійної навантажень, спектрального складу струму і напруги, параметрів електричної мережі та опору додаткових реакторів в мережі підприємства;

3. Розробка способів і вибір параметрів засобів зниження впливу вищих гармонік на установки КРП при різних факторах виникнення спотворень;

4. Розробка структури системи КРП при наявності вищих гармонік, що виникають як з боку зовнішнього джерела щодо введення підприємства, так і з боку самого підприємства;

5. Оцінка ефективності вибору структури системи КРП при наявності вищих гармонік напруги і струму на основі розрахункових досліджень.

Очевидно, що поставлені завдання повинні бути вирішені за умови забезпечення максимальної ефективності роботи конденсаторних установок, тобто за умови забезпечення заданого або максимально можливого коефіцієнта

потужності мережі та електромагнітної сумісності елементів системи електропостачання підприємства.

Висновки до розділу 1

Розглянуто вплив вищих гармонік струму і напруги на основне електрообладнання підприємств. В умовах несинусоїдальної напруги виникають додаткові втрати потужності в електричних мережах і електрообладнанні, обумовлені вищими гармоніками струму. Встановлено, що конденсаторні установки при наявності вищих гармонік є найбільш вразливою ланкою в електротехнічному комплексі підприємства.

Розглянуто сучасні способи зниження вищих гармонік в мережах підприємств, показані їх переваги та недоліки. Для зниження рівня вищих гармонік в електричних мережах необхідно, в першу чергу, проаналізувати природу їх виникнення і на підставі такого аналізу робити вибір того чи іншого методу зниження рівня гармонік.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПРИ НАЯВНОСТІ ВИЩИХ ГАРМОНІК

2.1. Вибір об'єкта дослідження

Для проведення науково-дослідних робіт в області зниження впливу вищих гармонік на електрообладнання в електричних мережах промислових підприємств необхідно вибрати об'єкт дослідження з подальшим визначенням меж зміни його параметрів, особливостей режимів роботи електрообладнання, а також характерних властивостей об'єкта.

Основними особливостями системи електропостачання потужних промислових підприємств (машинобудівних, металургійних, мінерально-сировинного комплексу) є значні потужності технологічних установок і вузлів навантаження, специфічний характер навантаження численних електроприймачів і їх велика територіальна розкиданість.

Переважає більшість приводів технологічних агрегатів, механізмів і верстатів приводиться в обертання асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. Умови їх експлуатації значно відрізняються великою різноманітністю режимів роботи окремих машин і механізмів, значними коливаннями напруги в дільничній електричній мережі при пуску потужного споживачів. З цих причин режим електроспоживання металургійних та машинобудівних підприємств є змінним і знаходиться в тісному зв'язку з технологічними характеристиками агрегатів.

КРП здійснюється в основному за допомогою конденсаторних установок (КУ). При КРП необхідно також враховувати характер зміни навантаження. Якщо навантаження піддається значним коливанням реактивної потужності, необхідно встановити КУ з автоматичним регулюванням її потужності. При завантаженні більшої частини графіка постійної реактивним навантаженням можлива установка у відповідній частині постійно включеної нерегульованої КУ, а іншу частину КУ передбачають з автоматичним регулюванням її потужності в залежності від графіка реактивної потужності підприємства.

Синхронні компенсатори, які використовуються в якості генератора реактивної потужності, в металургійній промисловості і в машинобудуванні поширення не отримали, так як за багатьма техніко-економічними показниками поступаються статичним конденсаторів. При проектуванні електропостачання промислових підприємств рекомендується при потужності менше 5000 квар при напрузі 6 кВ і потужності менше 10000 квар при напрузі 10 кВ застосовувати статичні конденсатори [60].

В установках значної потужності, де регулювання швидкості електродвигуна не потрібно (вентилятори головного провітрювання, компресори, приводні двигуни системи Г-Д в підйомних установках і т.п.), широко застосовуються синхронні двигуни. Тому для підвищення загальнозаводських коефіцієнта потужності можливо використовувати компенсаційну здатність синхронних двигунів.

Однак останнім часом на насосних установках, приводах прокатних станів і верстатів все частіше застосовують потужні асинхронні двигуни з частотним регулюванням, що створює проблеми якості електропостачання з точки зору вищих гармонік.

Раціональна схема електропостачання окремих цехів, що забезпечує безперебійне, економічне і безпечне живлення споживачів електроенергії залежить від багатьох факторів: площі і характеру розташування цехів, способів обробки матеріалів, потужності електромеханічного обладнання та т. д. [11].

За характером приєднання електроприймачів цехових ТП і високовольтних електроприймачів до ліній електропередачі схеми розподільних мереж підрозділяються на радіальні (рис. 2.1, а, б), магістральні (рис. 2.1, в, г) і змішані (рис. 2.1, д).

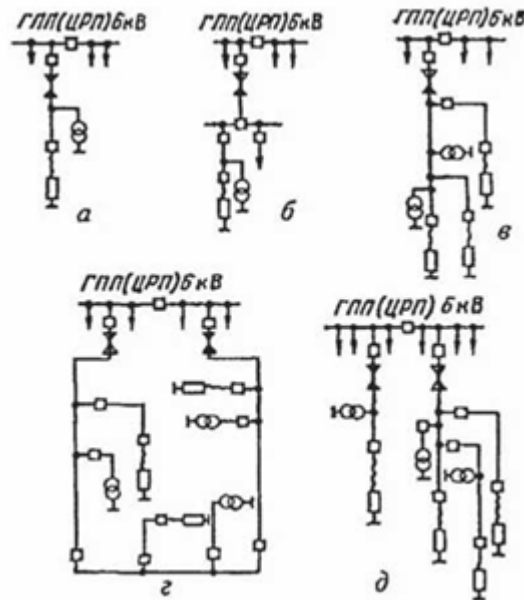


Рис. 2.2. Схеми розподільчих мереж потужних споживачів і цехів

Основні споживачі реактивної потужності промислового підприємства - асинхронні двигуни, трансформатори, перетворювачі, реактори і зварювальні трансформатори [66].

Зниження споживання реактивної потужності від енергосистеми або її компенсація до оптимальних значень на промислових підприємствах може бути забезпечена завдяки застосуванню синхронних двигунів приводів головних перетворювальних агрегатів екскаватора, потужних вентиляторів, насосів і проведенням вищеописаних заходів. Якщо ж на підприємстві не використовуються установки з приводом від синхронних двигунів або їх потужність недостатня, то зниження споживаної реактивної потужності від енергосистеми може бути досягнуто установкою в мережах спеціальних джерел реактивної потужності [66]. Найбільшого поширення в електричних мережах промислових підприємств отримали КУ. Застосовуються як регульовані, так і нерегульовані КБ.

Широко застосовуються частотно-регульовані приводи в складі основного обладнання, такого як насоси, вентилятори, прокатні стани і т.д.

Розглянемо особливості електропостачання збагачувальних фабрик.

Для ведення процесу збагачення на фабриці застосовується енергоємне обладнання, і в зв'язку з цим збагачувальні фабрики є великими споживачами електроенергії.

Вибір системи розподілу електроенергії на проммайданчиках фабрики залежить від споживаної потужності, особливостей технологічного процесу, напруги джерела живлення, способу резервування окремих споживачів, розташування електроспоживачів та інших факторів [9].

Розподіл електроенергії усередині виробничих корпусів фабрик, а також цехів машинобудівних, металургійних і інших підприємств здійснюється в основному за радіальної схемою (рис. 2.2).

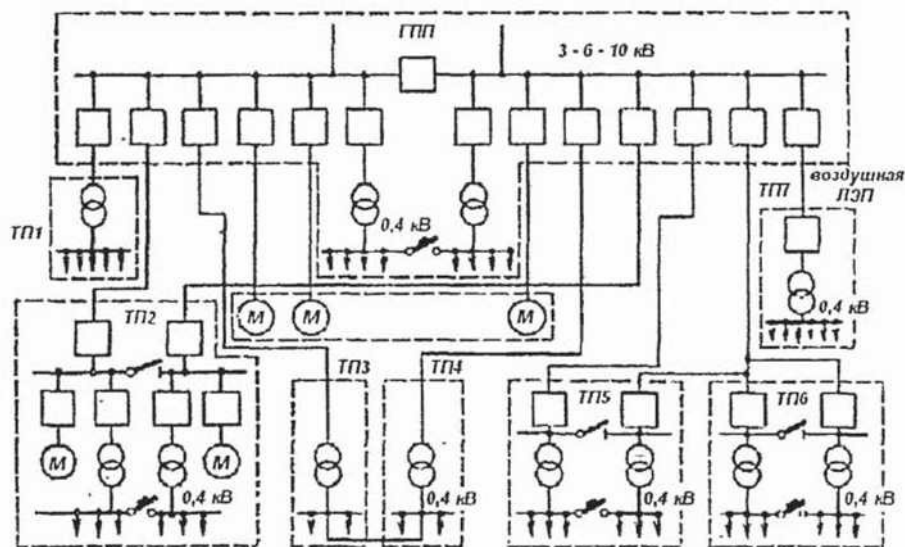


Рис. 2.2. Принципова схема внутрішнього електропостачання збагачувальної фабрики

Як відомо, характер зміни споживаної потужності за окремим технологічним корпусам або по всій фабриці в цілому визначається графіками навантаження окремих електроспоживачів фабрики, які мають найрізноманітніші режими роботи. Так, наприклад, такі споживачі, як щоківні і конусні дробарки крупного дроблення, мають нерівномірний, шпильчастий графік навантаження, обумовлений технологічним процесом дроблення, при якому відбувається роздавлювання окремих шматків руди. Навпаки, такі споживачі, як сепаратори, живильники, вентилятори і інші, мають плавний, малозмінний в часі графік навантаження.

На збагачувальних фабриках основними споживачами реактивної потужності є асинхронні двигуни і трансформатори. Для компенсації

реактивної потужності використовуються синхронні компенсатори, синхронні двигуни і КУ.

Синхронні компенсатори на збагачувальних фабриках можуть використовуватися тільки при централізованій компенсації, та й то в рідкісних випадках, так як вони дуже потужні (5000 кВА і більше) [9].

Синхронні двигуни, що встановлюються на млинах, вентиляторах, димососах і т.п., використовуються для підвищення коефіцієнта потужності в мережах напругою вище 1000 В.

КБ напругою 0,4-0,66 кВ можуть бути встановлені у групових розподільних щитів, в розподільних пунктах або на підстанції. Централізована установка конденсаторів на підстанціях або ДПП може бути прийнята в тому випадку, якщо їх неможливо встановити в цеху за умовами пожежної безпеки.

З точки зору застосування нелінійного навантаження, на збагачувальних фабриках використовуються частотно-регульовані приводи таких установок, як компресори, насоси, а також інші приводи невеликої потужності.

Електропостачання нафтопереробного заводу (НПЗ) здійснюється від двох незалежних джерел живлення: від ТЕЦ, яка зазвичай примикає до майданчика заводу, і від енергосистеми. Розподіл електроенергії виробляється на напрузі 6 і 35 кВ. Електропостачання нафтопереробного підприємства здійснюється за радіальної схемою (рис. 2.3).

Сучасний нафтопереробний завод є великим споживачем електричної енергії (20 - 50 МВт і вище).

В умовах НПЗ має місце варіація навантаження, обумовлена технологічним процесом, неритмічність поставки вихідної сировини і відвантаження готової продукції. Технологічний процес переробки нафти включає в себе значне число операцій з транспортування рідини, підтримці заданого температурного режиму в технологічних установках, електротехнічні комплекси НПЗ характеризуються наявністю значної кількості регульованих приводів [71].

Основна маса електродвигунів на нафтопереробному підприємстві працює в тривало-безперервному режимі. У нормальних умовах електродвигун повинен бути розрахований на безперервну роботу протягом міжремонтного періоду установки. Навантаження, як правило, рівномірне. Нерівномірність навантаження може мати місце лише в аварійних режимах.

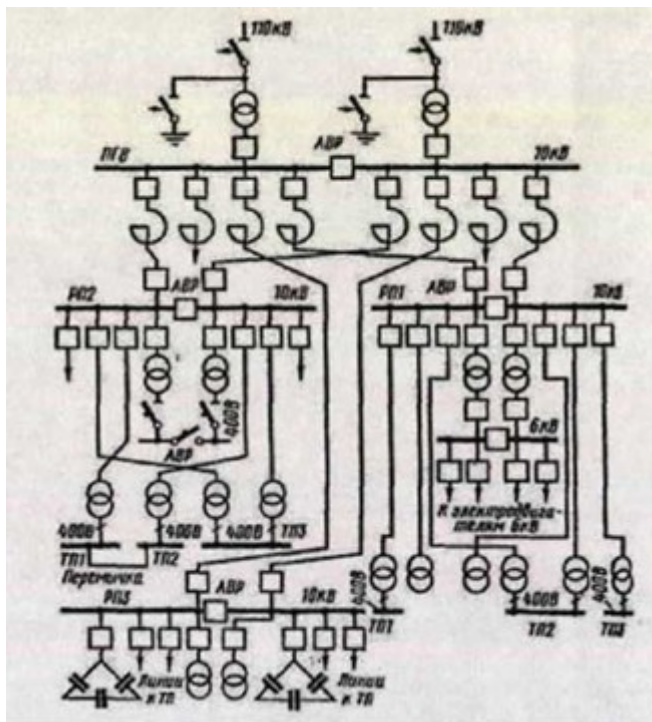


Рис. 2.3. Схема електропостачання нафтопереробного підприємства

КРП здійснюється за допомогою КУ, що підключаються як до секцій шин напругою 6-10 кВ, так і до секцій - 0,4-0,66 кВ. Частка нелінійного навантаження нафтопереробних підприємств, як правило, становить не менше 50%.

Живлення споживачів нафтової і газової промисловості електричною енергією здійснюється від мереж енергосистем або від власних місцевих електричних станцій. На рис. 2.4 представлений варіант схеми електропостачання споживачів нафтових промислів (живлення від енергосистеми) [14]. Електропостачання здійснюється як за радіальної, так і магістральної схемами.

При напрузі 6 кВ енергія подається до бурових установок, компресорних станцій, насосів перекачування нафти, водяним насосів системи підтримки пластового тиску, трансформаторних підстанцій 6/0,4 кВ, які живлять електрообладнання свердловин насосної експлуатації.

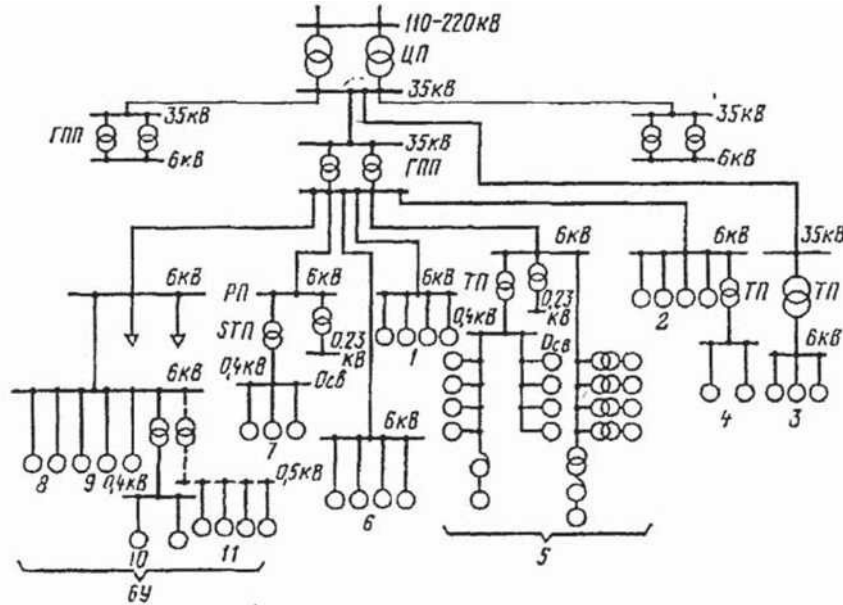


Рис. 2.4. Варіант схеми електропостачання об'єктів нафтових промислів: ЦП – центр живлення; ГПП - головна понижувальна підстанція; РП - розподільний пункт; ТП - трансформаторна підстанція; БО - бурова установка

Питання якості електроенергії мають особливо велике значення для тих споживачів, які працюють цілодобово і недовипуск продукції в робочий час з вини поганої якості електроенергії не покривається за рахунок понаднормових робіт. Змінний характер навантаження викликає різкі просадки і коливання напруги на затискачах електродвигунів, що призводить до вимушеного завищення встановленої потужності і погіршення енергетичних показників електроустановок і всієї системи електропостачання нафтопромислів [63].

На нафтових промислах реактивна потужність споживається в основному асинхронними двигунами. Синхронні двигуни виконують дві функції: надають рух виробничим механізмам і, будучи перезбудження, виробляють реактивну енергію.

На промислах установка конденсаторів в мережах до 1000 В раціональна для мереж глибинонасосної установок. Тут застосовується індивідуальна компенсація з установкою конденсаторів у окремих електродвигунів верстатів-качалок. Цей спосіб цілком доцільний, оскільки електродвигуни верстатів-качалок працюють тривалий час, а протяжність живлять їх магістралей велика [14].

Останнім часом частка нелінійного навантаження на цих підприємствах безперервно збільшується.

Таким чином, проаналізовані схеми електропостачання підприємств металургійної, видобувної і переробної промисловості, основне електрообладнання та режими їх роботи, особливості споживання і компенсації реактивної потужності.

Електропостачання підприємств здійснюється як за радіальної схемою, так і магістральної. Нелінійна навантаження присутнє практично на всіх розглянутих виробництвах, що призводить до спотворення форми кривої струму і напруги. Застосування радіальних схем отримало найбільше поширення [17], тому основою подальших досліджень є саме такий тип електропостачання.

Як компенсуючих пристроїв застосовують і синхронні двигуни, і конденсаторні батареї. Конденсаторні установки підключаються як до секцій шин напругою 6-10 кВ, так і до секцій - 0,4- 0,66 кВ. Застосовуються як регульовані, так і нерегульовані КБ.

2.2. Аналіз існуючих схем заміщення для мереж, що містять вищі гармоніки

Моделювання та аналіз режимів роботи електричної мережі при наявності вищих гармонік включає в себе наступні етапи:

- складання схеми заміщення системи електропостачання (СЕР) при наявності вищих гармонік;
- обчислення опорів елементів схеми заміщення для частот розглянутого спектра вищих гармонік;

- визначення спектрального складу струмів вищих гармонік, що генеруються в електричну мережу нелінійним навантаженням;
- розрахунок режимів мережі з урахуванням кожної з розглянутих гармонік.

Схеми заміщення СЕП для струмів вищих гармонік складають на основі принципової однолінійної схеми в трифазному або однофазному виконанні. Вибір того чи іншого варіанта схеми заміщення залежить від характеру поставленого завдання. Так при наявності в мережі підприємства несиметричних за фазами елементів і однофазних навантажень зі значною сумарною потужністю, а також для СЕП з ізольованою нейтраллю, що працюють в умовах тривало допустимих однофазних замикань на землю, розрахунок несинусоїдального режиму СЕП не можна проводити за однофазною схемою заміщення. Однак, системи електропостачання машинобудівних і гірничих підприємств не належать до перерахованих вище. Для них можна прийняти допущення про симетрію параметрів всіх елементів електричної мережі і представити СЕП однофазною схемою заміщення при аналізі режимів окремих вищих гармонік з подальшим використанням методу накладання [73].

Виходячи з результатів численних досліджень схем електропостачання у [3, 8] отримана узагальнена принципова однолінійна схема промислового підприємства, представлена на рис. 2.5.

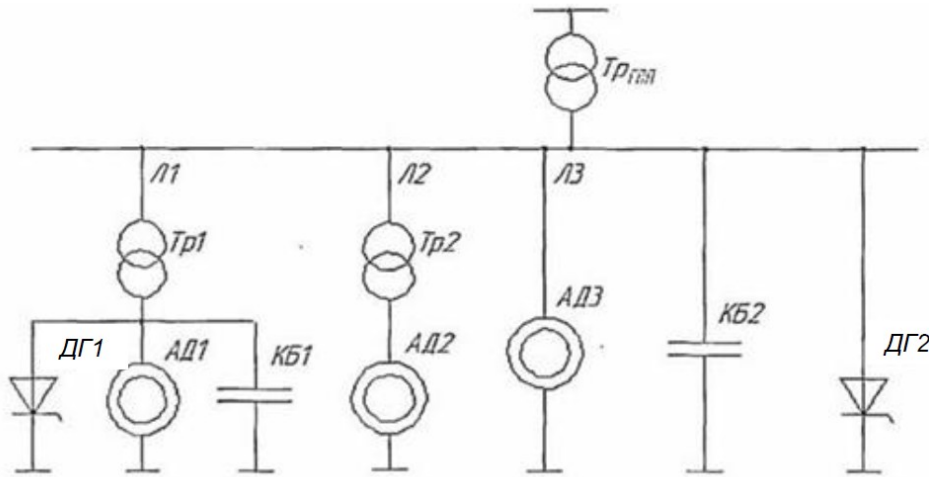


Рис. 2.5. Узагальнена принципова однолінійна схема підприємства: ДГ - еквівалентне нелінійне навантаження (джерело вищих гармонік); TrГПП - трансформатори ГПП; Tr - понижуючий трансформатор; АД - еквівалентне лінійне навантаження підприємства; КБ - конденсаторні батареї; Л - лінія електропередач.

Нелінійна навантаження в електричній мережі змінного струму може бути представлена двома видами схем заміщення: джерелом струму ν -й гармоніки або джерелом ЕРС гармоніки E_ν . Схема заміщення з джерелом ЕРС застосовується в разі, якщо необхідно визначити значення гармоніки струму в батареях конденсаторів в режимі резонансу струмів на частоті будь-якої гармоніки [30]. З урахуванням порівняно малого діапазону розглянутих порядків гармонік ($\nu <$) джерело спотворень в схемі заміщення можна представляти у вигляді еквівалентних джерел струмів різних гармонік нескінченної потужності [35].

На промислових підприємствах найбільшого поширення набули трифазні мостові схеми напівпровідникових перетворювачів [30]. Ці схеми є також основою для побудови більш складних схем багато мостових перетворювачів. Порядок гармонік струмів, що генеруються перетворювачем, визначається виразом:

$$\nu = \pm k \quad (2.1)$$

де p - число фаз перетворювача $k =$

Схема заміщення силових трансформаторів представляється у вигляді послідовно з'єднаних активного і індуктивного опорів [42], як показано на рис. 2.6 причому $R_{T\nu} =$, $X_{T\nu}$ - лінійно залежить від частоти.



Рис. 2.6. Схема заміщення силових трансформаторів

Схеми заміщення параметрів електричної мережі та навантаження представлені на рис. 2.7-2.10.

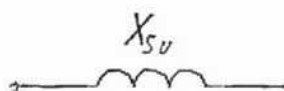


Рис. 2.7. Схема заміщення мережі живлення

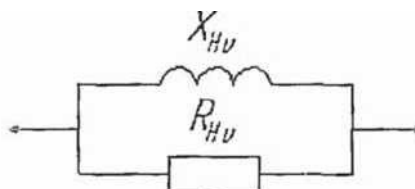


Рис. 2.8. Схема заміщення лінійного навантаження



Рис. 2.9. Схема заміщення ділянки ліній електропередач



Рис. 2.10 - Схема заміщення КБ

Опори елементів схеми заміщення струмів вищих гармонік можуть визначатися за відомими правилами, причому вихідною інформацією в даному випадку є параметри елементів на промисловій частоті. Активні опори елементів для частот гармонік невеликих порядків допустимо приймати незмінними, індуктивні опори збільшуються пропорційно частоті гармоніки, а ємнісні - зменшуються. Опір мережі живлення допустимо для орієнтовних і проектних розрахунків приймати лінійно залежним від частоти.

Оскільки діапазон розглянутих гармонік обмежений в малих межах і довжини ліній порівняно невеликі, тому дією поверхневого ефекту (скін-ефекту) і розподіленням параметрів ліній можна знехтувати.

Опори елементів електричної мережі на ν -й гармоніці визначаються за такими формулами:

- опір трансформатора:

$$R_{TP\nu} = \frac{P_K \cdot U^2}{S_{HT}^2}, X_{TP\nu} = \frac{r_{JK}}{100} \cdot \frac{U^2}{S_{HT}} \cdot \nu; \quad (2.2)$$

- опір навантаження:

$$R_{H\nu} = \frac{r_{J^2}}{P_H}, X_{H\nu} = \frac{r_{J^2}}{Q_H} \cdot \nu; \quad (2.3)$$

- опір КБ:

$$X_{C\nu} = \frac{r_{r^2}}{Q_C}. \quad (2.4)$$

На підставі проведеного аналізу існуючих схем заміщення елементів для мереж, що містять вищі гармоніки, сформована однофазна схема заміщення, представлена на рис. 2.11, де U_0 - фазна напруга джерела даної мережі; R_L, R_T, R_H - активний опір лінії, трансформатора і навантаження відповідно; $\nu \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots$ - реактивні опори на ν -й гармоніці системи, лінії, трансформатора, лінійного навантаження і конденсаторної батареї відповідно; I_ν - складова струму ν -ої гармоніки.

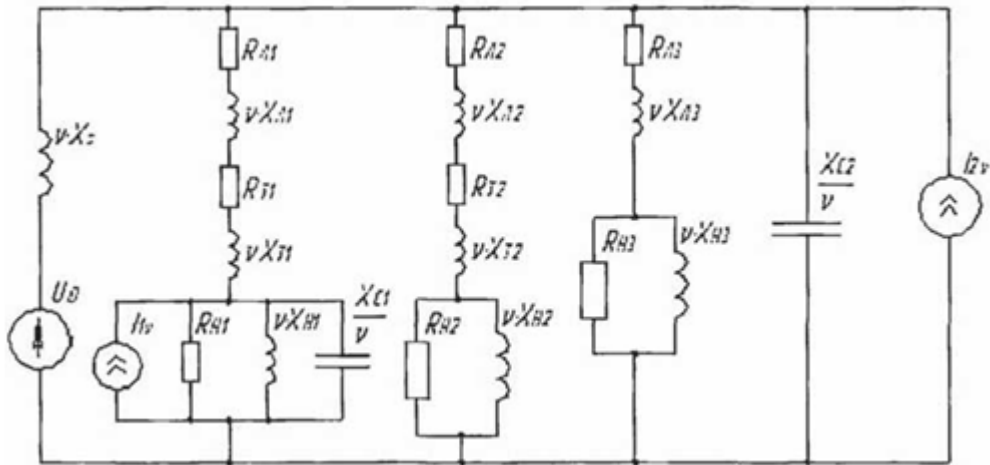


Рис. 2.11. Однофазна схема заміщення мережі

У розробленій схемі джерело напруги прийнятий синусоїдальним. У разі наявності вищих гармонік в напрузі, джерело буде замінений, як показано в розділі 2.3.2.

Характерний для промислових підприємств діапазон зміни параметрів схеми заміщення, представлений в додатку А, також визначений виходячи з результатів досліджень [3, 8].

Параметри елементів схеми заміщення приводяться до розрахункового напрузі шини ДПП 6 (10) кВ. З урахуванням перерахованих вище зауважень проводиться розрахунок параметрів і аналіз режимів роботи електрообладнання при наявності в мережі вищих гармонік.

2.3. Математичне моделювання електричної мережі з КБ

Багатовимірний статистичний аналіз даних

Математична постановка задачі і методи її реалізації

Схема заміщення, представлена на рис. 2.11 містить значну кількість електричних елементів, враховуючи які визначається перевантаження конденсаторних батарей струмами вищих гармонік на основі значення величини коефіцієнта перевантаження:

$$K_{пер} = \dots (S_{HH} / S_{ЛН}, Q_{КБ}, D_{ВГ}) \quad (2.5)$$

де P_{CX} - параметри схеми електропостачання підприємства, $S_{HH}/S_{ЛH}$ - співвідношення лінійної і нелінійної навантаження, Q_{KB} - потужність КБ, D_{BG} - параметри джерела вищих гармонік.

Врахування всіх елементів електричної мережі призводить до громіздких обчислень, виникнення якої складності при визначенні параметрів цих елементів в умовах змінних режимів електроспоживання і різного складу навантаження.

Тому на даному етапі роботи було доцільним провести статистичний аналіз даних, необхідний для зниження розмірності аналізованого простору ознак і відбору найбільш інформативних показників [16, 41, 59]. Методи зниження розмірності багатовимірному простору дозволяють без істотної втрати інформації перейти від початкової системи великого числа спостережуваних взаємопов'язаних факторів до системи істотно меншого числа факторів, що визначають варіацію початкових ознак.

В рамках цієї роботи статистичний аналіз застосовується для визначення найбільш значимих елементів електричної мережі при визначенні коефіцієнта перевантаження конденсаторних батарей струмами вищих гармонік.

Одним з основних багатовимірних статистичних методів є регресійний аналіз даних. Регресійний аналіз - це статистичний метод дослідження залежності випадкової величини Y від змінних X_j ($j = \dots$, розглянутих в регресійному аналізі як не випадкові величини незалежно від істинного закону розподілу X_j . Для проведення регресійного аналізу з $(Y, X_1, X_2, \dots, X_k)$ - мірної генеральної сукупності береться вибірка обсягом n і кожне i -е спостереження (об'єкт) характеризується значеннями змінних $(y_i, x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$, де x_{ij} - значення j -ї змінної для i -го спостереження ($i = \dots$, y_i -го - значення результативної ознаки для спостереження).

Найбільш часто використовувана множинна лінійна модель регресійного аналізу має вигляд:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_j x_{ij} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i, \quad (2.5)$$

де ε - випадкові помилки спостереження, незалежні між собою, мають нульову середню і дисперсію σ^2 .

У матричній формі регресійна модель має вигляд:

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (2.6)$$

де Y - випадковий вектор - стовпець розмірності $n \times 1$ можна побачити значень результативних ознаки (y_1, y_2, \dots, y_n) ; X - матриця розмірності $n \times k+1$ спостережуваних значень аргументів. Елемент матриці x_{ij} розглядається як $(i = 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, k) =$ не випадкова величина; β - вектор - стовпець $(k+1) \times 1$ розмірності невідомих, які підлягають оцінці параметрів (коефіцієнти регресії) моделі; ε - вектор - стовпець розмірності $n \times 1$ помилок спостережень (залишків).

Матриці Y, X, β мають вигляд:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} & 1 \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} & 1 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} \quad \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_k \end{pmatrix}$$

Основне завдання регресійного аналізу полягає в знаходженні за вибіркою обсягом n і оцінці невідомих коефіцієнтів регресії $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ моделі (2.6) або вектора β в (2.7) [27]. При знаходженні коефіцієнтів β можна визначити значимість того чи іншого елемента електричної мережі для розрахунку коефіцієнта перевантаження компенсуючих пристроїв в умовах даної схеми заміщення.

Всі статистичні розрахунки проводились з використанням пакета програм Statistica 6.1 [15, 70]. Вибірка спостережень обсягом n представлена в додатку 2.

Попередня обробка даних для побудови емпіричних залежностей зводиться, як правило, до двох процедур: перевірки відповідності розподілу

вихідних даних закону нормального розподілу і відсіювання різко виділяються спостережень.

Для оцінки закону розподілу даних скористаємося комплексом стандартних графічних і аналітичних методів математичної статистики, реалізованих в програмному продукті.

Візуальна перевірка здійснювалася за допомогою нормального імовірнісного графіка. Нормальний імовірнісний графік являє собою діаграму розсіювання, на якій зображена залежність між величинами обраної змінної і «очікуваними від нормального розподілу» значеннями, що формують пряму лінію на графіку. Для нормально розподіленого предиктора характерним є максимально можливе «прилягання» вибірових точок до прямої лінії.

Реалізація процедури відсіювання різко виражених спостережень в програмному продукті здійснюється графічними методами. Процедура виявлення аномальних точок в даному випадку заснована на правилі «трьох сигм», відповідно до якого 99,7% точок нормально розподіленого параметра повинні знаходитися в межах трьох стандартних відхилень 3σ від вибіркової середньої, 95,4% точок - в межах 2σ і 68, 3% точок - в межах 1σ . Нетипові точки називаються викидами, якщо вони віддалені більш ніж на 1,5 стандартних відхилень. На графіку відображається номер спостереження, що містить значення викиду.

Після проведення процедури множинного лінійного регресійного аналізу перевірено якість отриманої моделі за допомогою наступних стандартних методів математичної статистики: оцінка коефіцієнта детермінації R^2 перевірка значущості коефіцієнтів регресії; аналіз залишків.

Попередній аналіз даних показав, що при побудові кореляційної матриці виявляється високий ступінь парної кореляції між окремими предикторами. В такому випадку застосовуються альтернативні регресивні моделі, однією з яких є гребенева регресія, яка відрізняється стійкістю для випадків сильної корельованості залежних змінних один з одним.

Важливим питанням побудови рівняння множинної регресії є відбір найбільш істотних факторів з усієї можливої множини факторів, які ймовірно, впливають на відгук. Метод виключення вирішує проблему відбору факторів шляхом покрокового виключення найменш значимого фактора на основі порівняння моделі, що отримана на цьому етапі з моделлю, отриманою на попередньому кроці. Істотні фактори визначаються за виділеним рівнем значущості. Чим менше значення р-рівня, тим більше значущий предиктор.

Якість побудованої моделі в цілому оцінюється коефіцієнтом множинної детермінації, який визначається формулою:

$$R^2_{y, x_1, x_2, \dots, x_p} = \frac{S_{\text{повн}} - S_{\text{зал}}}{S_{\text{повн}}} \quad (2.9)$$

де $S_{\text{зал}}$ - залишкова сума квадратів відхилень, $S_{\text{повн}}$ - загальна сума квадратів відхилень значень Y_i від середнього арифметичного значення відгуку Y .

$$S_{\text{зал}} = \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \quad (2.10)$$

$$S_{\text{повн}} = \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (2.11)$$

Коефіцієнт детермінації R^2 характеризує частку «пояснених» отриманої емпіричної моделі варіацій (частку «пояснене» дисперсії) в загальній величині варіацій залежних змінних, тобто ступінь відповідності лінії регресії і експериментальних даних. Чим ближче значення R^2 до одиниці, тим повніше модель «пояснює» мінливість незалежних факторів.

Також оцінка тісноти множинної кореляційної зв'язку проводиться на основі множинного коефіцієнта кореляції:

$$R_{y, x_1, x_2, \dots, x_p} = \sqrt{R^2_{y, x_1, x_2, \dots, x_p}} \quad (2.12)$$

Діапазон зміни множинного коефіцієнта кореляції

$R^2_{y, x_1, x_2, \dots, x_p} = |0 \dots 1|$. «0» означає відсутність зв'язку, «1» - наявність функціональної множинної зв'язку між ознаками. Для класифікації тісноти зв'язку використовується шкала Чеддока (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. шкала Чеддока

Кількісна міра тісноти зв'язку	Якісна характеристика сили зв'язку
0,1-0,3	Слабка
0,3-0,5	Помірна
0,5-0,7	Помітна
0,7-0,9	Висока
0,9-0,99	Досить висока

Залишком (похибкою) називається різниця між спостережуваним і передбаченим моделлю значенням предиктор. В роботі проведено візуальний аналіз графіка залишків і перевірка залишків регресії по автокореляції сусідніх членів за допомогою критерію Дарбіна-Уотсона. Величина критерію Дарбіна-Уотсона, що перевищує значення 1,4, вказує на відсутність значимої автокореляції між залишками. Наближено можна вважати, що в тому випадку, коли такий показник наближається до 2, модель обрана досить коректно. При значенні показника, близькому до 0 або 4, необхідно змінити модель.

Визначення значущих чинників для розрахунку коефіцієнта перевантаження компенсуючих пристроїв

Нижче представлена первинна обробка даних для функції відгуку (коефіцієнта перевантаження). Статистичні розрахунки проводяться з використанням пакета програм Statistica 6.1.

Набл.	Станд. остатки					Вибросы							
	-5.	-4.	-3.	±2.	3.	4.	5.	Наблюд. Значение	Предск. Значение	Остатки	Станд. предск.	Станд. Остатки	Стд.Ош. предск
4	.	.	.	*	.	.	.	2,151599	1,558776	0,592823	1,895695	2,072969	0,094933
16	*	.	2,756598	1,558776	1,197822	1,895695	4,188517	0,094933
32	.	.	.	*	.	.	.	1,780000	1,127969	0,652031	-0,456102	2,280009	0,057985
Минимум	.	.	.	*	.	.	.	1,780000	1,127969	0,592823	-0,456102	2,072969	0,057985
Максим.	*	.	2,756598	1,558776	1,197822	1,895695	4,188517	0,094933
Среднее	*	.	.	2,229399	1,415174	0,814225	1,111763	2,847165	0,082617
Медиана	.	.	.	*	.	.	.	2,151599	1,558776	0,652031	1,895695	2,280009	0,094933

Рис. 2.12. Графік викидів

Статистичний аналіз даних показав, що присутні аномальні точки, які слід видалити з вихідних даних - № 4, 16, 32 (рис. 2.12). Після видалення зазначених

аномальних точок повторно проведені аналогічні процедури. Повторна обробка даних не виявила аномальних точок, тобто всі залишки знаходяться всередині ± 2 стандартних відхилень.

Побудований нормальний імовірнісний графік залишків (рис. 2.13) забезпечує швидкий візуальний спосіб перевірки того, якою мірою розподіл залишків підпорядковується нормальному закону.

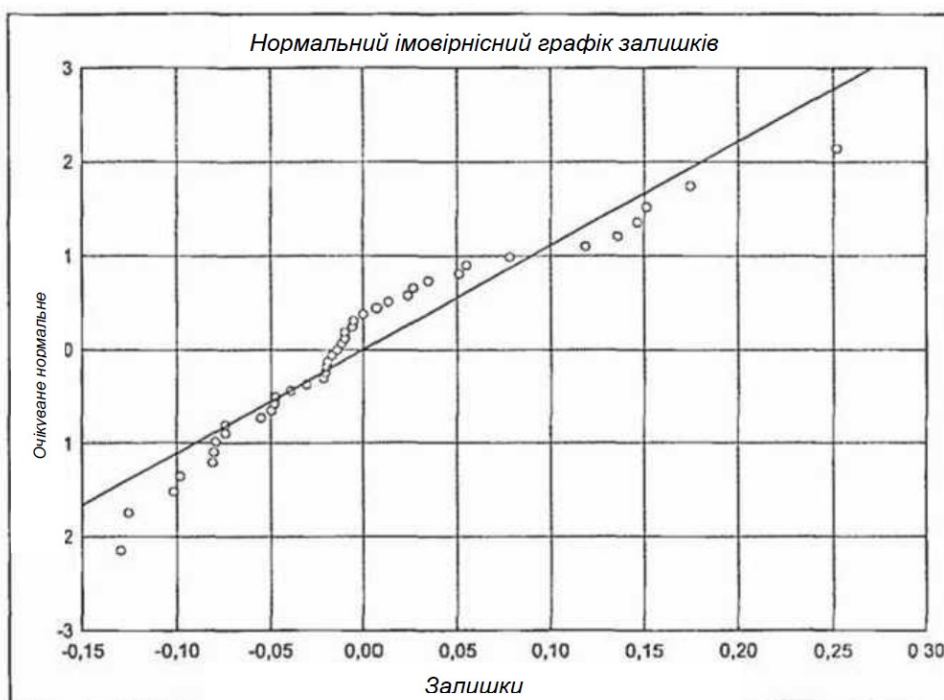


Рис. 2.13. Нормальний імовірнісний графік залишків

Оскільки на цьому графіку всі точки лежать близько до прямої лінії, тому спостерігаються залишки нормально розподілені. Таким чином, серйозних порушень припущень про лінійність і нормальності розподілу залишків не виявлено.

Коефіцієнт детермінації моделі R^2 дорівнює 0,643%, тобто запропонована модель пояснює 64,3% розкиду значень відносно середнього. Множинний коефіцієнт кореляції дорівнює 0,81 і зв'язок між ознаками є високою.

Статистика Дарбіна-Уотсона дорівнює 1,94, що вказує на хорошу якість запропонованої моделі, автокореляція залишків відсутня, модель обрана досить коректно.

Значимість факторів визначається по-рівня, значення якого представлено на рис. 2.14.

$N=41$	БЕТА	Стд.Ош. БЕТА	B	Стд.Ош. B	t(18)	p-уров.
Св.член			1,060	0,2502	4,23658	0,000496
Xs	0,278686	0,333141	0,003	0,1591	0,66849	0,517312
RL1	-0,089877	0,451734	-0,031	0,1552	-0,19896	0,844523
XL1	-0,089877	0,451734	-0,088	0,4433	-0,19896	0,844523
RT1	-0,089877	0,451734	-0,083	0,4194	-0,19896	0,844523
XT1	-0,089877	0,451734	-0,016	0,0788	-0,19896	0,844523
RL2	-0,089877	0,451734	-0,031	0,1552	-0,19896	0,844523
XL2	-0,089877	0,451734	-0,088	0,4433	-0,19896	0,844523
RT2	-0,089877	0,451734	-0,083	0,4194	-0,19896	0,844523
XT2	-0,089877	0,451734	-0,016	0,0788	-0,19896	0,844523
RL3	-0,089877	0,451734	-0,062	0,3103	-0,19896	0,844523
XL3	-0,089877	0,451734	-0,176	0,8867	-0,19896	0,844523
RD1	0,234254	0,369228	0,001	0,0012	0,63444	0,533773
XD1	0,234254	0,369228	0,178	0,2808	0,63444	0,533773
XC1	0,131743	0,264915	98,873	198,8176	0,49731	0,624994
RD2	0,296868	0,423558	0,001	0,0012	0,70089	0,492332
XD2	0,296868	0,423558	0,201	0,2865	0,70089	0,492332
RD3	0,296868	0,423558	0,002	0,0024	0,70089	0,492332
XD3	0,296868	0,423558	0,402	0,5730	0,70089	0,492332
XC2	-0,219068	0,319855	-104,323	152,3190	-0,68490	0,502135
Tok	0,249893	0,370943	0,000	0,0001	0,67367	0,509080
Xr1	-0,251949	0,223809	-0,015	0,0129	-1,12573	0,275066
Xr2	-0,579637	0,237192	-0,065	0,0264	-2,44375	0,025065

Рис. 2.14. Значення показників регресії

Чим менше значення p -рівня, тим більш значущий предиктор. Найбільше значення p -рівня рівне 0,845 і відповідає десяти факторам, отже, ці предиктори вносять найменший внесок в пророкування залежною змінною.

Далі був проведений множинний регресійний аналіз даних, який виключає найменш значущі елементи з оцінкою якості побудованої моделі за допомогою коефіцієнта множинної детермінації. Коефіцієнт детермінації моделі R^2 дорівнює 0,626%, тобто запропонована модель пояснює 62,6% розкиду значень відносно середнього. Множинний коефіцієнт кореляції дорівнює 0,79 і зв'язок між ознаками є високою. В обох випадках модель досить якісно описує дані, тому при розрахунку коефіцієнта перевантаження конденсаторних батарей

можна не враховувати опори ліній і трансформаторів $R_{Л1}, X_{Л1}, R_{Т1}, X_{Т1}, R_{Л2}, X_{Л2}, R_{Т2}, X_{Т2}, R_{Л3}, X_{Л3}$.

Такий багатовимірний статистичний аналіз проведено за умови, що функцією відгуку є коефіцієнт перевантаження високовольтних конденсаторних батарей. Аналіз, при якому за функцію відгуку прийнятий коефіцієнт перевантаження низьковольтних конденсаторних батарей, показав аналогічні результати за винятком значущості індуктивного опору понижувального трансформатора $X_{Т1}$. Це пояснюється тим, що індуктивний опір трансформатора є своєрідним загороджувальним фільтром вищих гармонік для низьковольтної навантаження і конденсаторних батарей. Тому при розрахунку коефіцієнта перевантаження низьковольтних конденсаторних батарей індуктивний опір $X_{Т1}$ необхідно враховувати.

Таким чином, при проведенні множинного регресійного аналізу вдалося знизити розмірність аналізованого простору ознак і виключити найменш інформативні ознаки без істотного впливу на розрахунок функції відгуку.

Формування схеми заміщення в залежності від факторів виникнення вищих гармонік

Проведення множинного регресійного аналізу дозволило без істотної втрати інформації знизити розмірність аналізованого простору ознак, відібрати найбільш значимі елементи електричної мережі для визначення коефіцієнта перевантаження конденсаторних батарей струмами вищих гармонік. На підставі такого аналізу створюється уточнена схема заміщення електричної мережі, представлена на рис. 2.15.

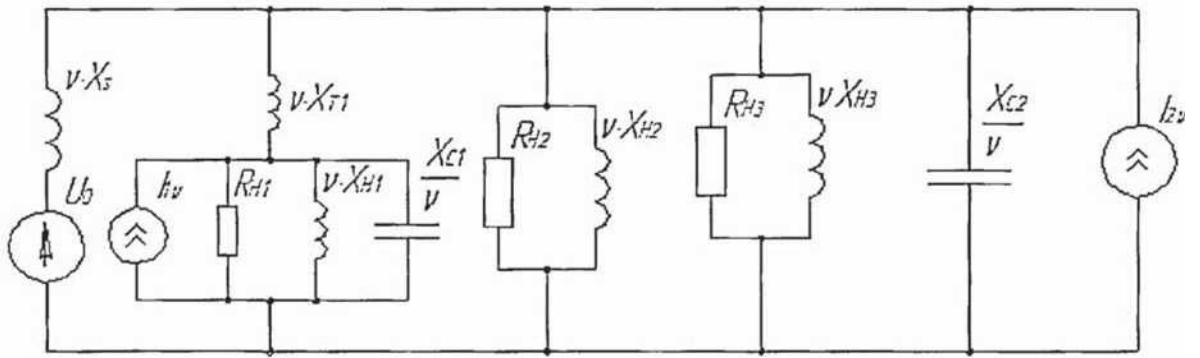


Рис. 2.15. Уточнена схема заміщення мережі

У той же час при складанні схеми заміщення мережі важливо проаналізувати джерело і природу виникнення вищих гармонійних складових напруги і струму, як показано в [80]. Природа виникнення вищих гармонік залежить від чинників, обумовлених роботою електрообладнання як у зовнішній мережі щодо вводу енергії на підприємство, так і в мережі самого підприємства. На схемі заміщення електричної мережі для розрахунку значень вищих гармонік зовнішнє джерело спотворень щодо вводу підприємства зазвичай представляється сукупністю джерел напруги частотами від 1 до n (U_0, U_3, \dots). Аналогічно, джерелами струму заміщається нелінійне навантаження самого підприємства, робота яких призводить до виникнення вищих гармонік (I_0, I_3, \dots, I_n). Узагальнена схема заміщення, яка об'єднує представлені вище варіанти, показана на рис. 2.16, де $ЛН$ - еквівалентна лінійне навантаження підприємства, X_s - опір системи.

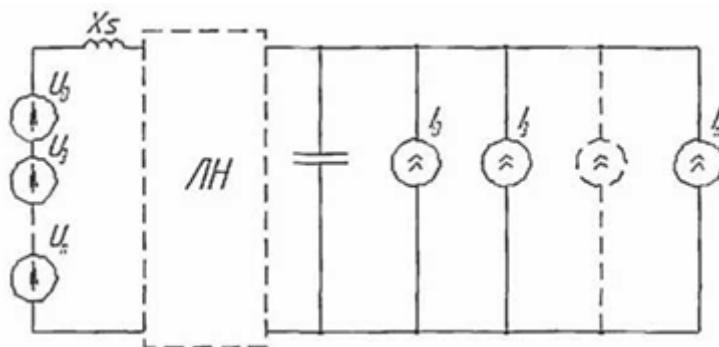


Рис. 2.16. Узагальнена схема заміщення для розрахунку вищих гармонік

На основі проведених досліджень розроблено алгоритм формування схеми заміщення мережі для розрахунку перевантаження КБ струмами вищих гармонік і аналізу режимів роботи компенсуючих пристроїв при різних факторах виникнення вищих гармонік, представлений на рис. 2.17.

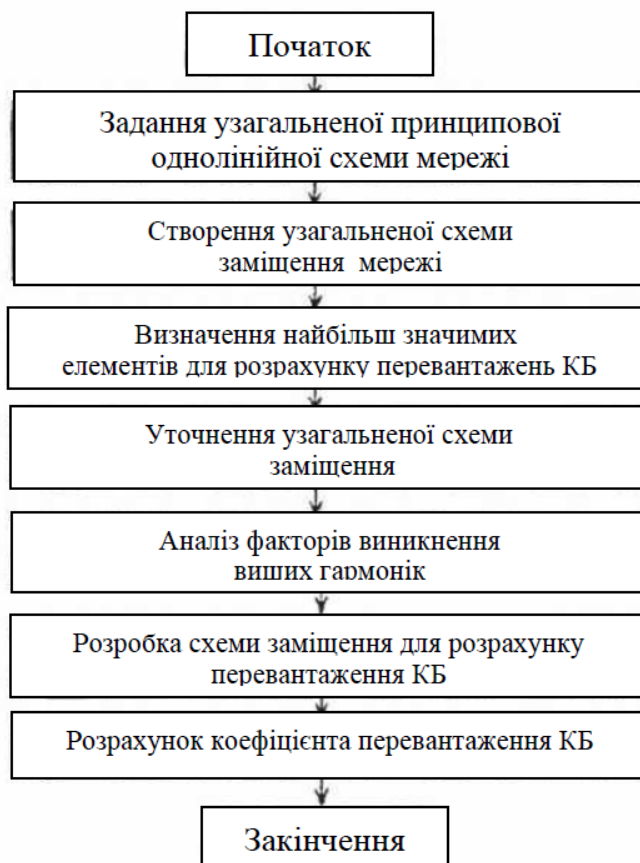


Рис. 2.17. Алгоритм формування схеми заміщення для розрахунку перевантаження КБ

Таким чином, створена узагальнена схема заміщення електричної мережі для розрахунку перевантаження КБ струмами вищих гармонік в залежності від умов їх виникнення. Узагальнена схема, як зазначалося вище, відповідає підприємствам з радіальною схемою електропостачання при наявності нелінійного навантаження і можливості спотворення напруги з боку енергопостачальної організації.

2.4. Розрахунок показників надійності роботи КБ

Однією з головних проблем експлуатації КБ є відносно швидкий вихід з ладу конденсаторів, які входять до їх складу. Конденсатори різних типів, що мають за паспортними даними термін служби до 15 років, насправді служать значно менше. Термін служби коливається від 1,5 до 2 років [77].

Одним з основних понять теорії надійності є відмова, тобто порушення працездатності об'єкта або елементів, що входять до його складу. До настання відмови об'єкт знаходиться в працездатному стані, в якому він здатний виконувати всі або частину заданих функцій. В результаті відмови об'єкт переходить в неробочий стан, в якому він не здатний виконувати задані функції.

Відмови відбуваються внаслідок зміни параметрів об'єкта або елементів, що входять до його складу, під впливом факторів, що впливають. Розрізняють раптові і поступові відмови [2].

Основними параметрами, що впливають на показники надійності роботи КБ, є їх перевантаження за струмом і напругою як в синусоїдальному режимі, так і при наявності вищих гармонік. Тому була виконана оцінка їх впливу на напрацювання на відмову, як показника надійності роботи конденсатора.

Напрацювання на відмову - це час, протягом якого досліджуваний об'єкт або його елемент будуть правильно виконувати всі свої функції. Для конденсаторів, які не є ремонтним елементом, можна прийняти, що напрацювання на відмову є одночасно і терміном служби.

Напрацювання на відмову може бути виражена таким чином [57]:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (2.13)$$

де $P(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи, тобто ймовірність того, що в межах заданої тривалості роботи елемента відмова не виникає.

Ймовірність безвідмовної роботи може бути обчислена за виразом:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (2.14)$$

де $\lambda(t)$ - інтенсивність відмов.

Залежність λ від часу для об'єктів СЕП, що побудована за результатами численних спостережень на промисловому підприємстві, наведена на рис. 2.18.

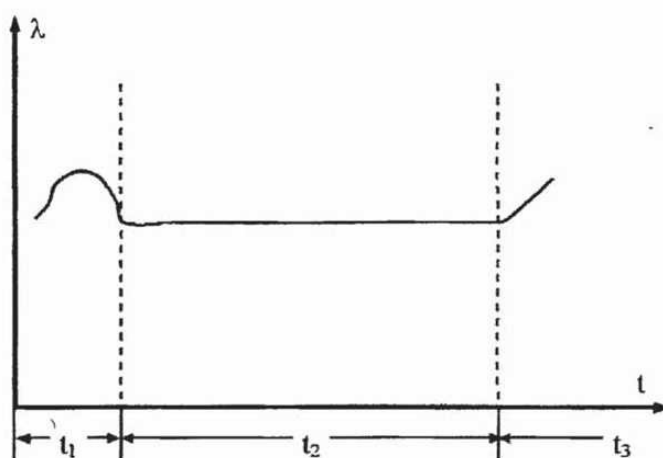


Рис. 2.18. Залежність інтенсивності відмов від часу

Перший відрізок t_1 називається періодом підробітки. За цей період відбуваються відмови, викликані прихованими дефектами в елементах СЕП. Цей час для конденсаторів не враховується, тому що в даній роботі випадки дефектів в розрахунок не приймаються, тобто передбачається експлуатація бездефектних елементів.

Другий відрізок t_2 - період нормальної експлуатації, тобто в нашому випадку період безвідмовної роботи.

Третій відрізок t_3 період, в який елемент досягає свого граничного стану, тобто конденсатор виходить з ладу.

Нас буде цікавити перш за все другий відрізок, на якому $\lambda(t)$ залишається постійною. В цьому випадку змінюється за експоненціальним законом:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (2.15)$$

Величина $P(t)$ залежить насамперед від втрат в конденсаторах, обумовлених перевантаженнями за струмом в сталих процесах (від підвищеного рівня напруги, від вищих гармонік і несиметрії напруги).

Експлуатація нелінійного навантаження супроводжується генеруванням вищих гармонік, що призводить до спотворення кривих напруги і струму. Це

може викликати значні перевантаження конденсаторів за струмом, а значить зменшити термін їх служби. Термін служби конденсаторів (напрацювання на відмову) може бути визначена як:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.16)$$

Зручніше користуватися поняттям кратності зниження терміну служби:

$$\gamma = \frac{T_{\phi}}{T_n} = \frac{\lambda_r}{\lambda} \quad (2.17)$$

де $T_{\phi}, T_n, \lambda_r, \lambda$ - відповідно фактичні й нормативні термін служби і інтенсивність відмов.

На підставі результатів досліджень, наведених в [76], зменшення терміну служби конденсаторів пропорційно додаткових втрат конденсаторів.

Величина додаткових втрат в конденсаторної установки, обумовлених несинусоїдальністю напруги живлення, визначається як:

$$\Delta P_k = Q_n \operatorname{tg} \delta \sum_{v=1}^{\infty} v U_v^2 \quad (2.18)$$

де Q_n - номінальна реактивна потужність КУ, $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс кута втрат в діелектрику на основній частоті.

Додатковий нагрів конденсаторів внаслідок збільшення втрат:

$$\Delta \tau = \theta - \theta_0 = \theta \left(\frac{\theta}{\theta_0} - 1 \right) \quad (2.19)$$

де θ і θ_0 - перехід температур між найбільш нагрітої точкою конденсатора і навколишнім середовищем відповідно в номінальному режимі і при наявності вищих гармонійних в напрузі.

Перепад температури [52]:

$$\theta = \Delta P_k / \Lambda \quad (2.20)$$

де Λ - параметр, що характеризує теплову провідність конденсатора.

З урахуванням (2.18):

$$\theta - \theta_0 = \Delta P_k / \Lambda_{к.н.}, \quad (2.21)$$

де $\Delta_{к.н}$ - втрати активної потужності в конденсаторах в номінальному режимі.

Тоді кратність зниження терміну служби конденсаторів:

$$\gamma = \exp\left(\sum_{v=1}^{\infty} J_v^2\right) \quad (2.22)$$

Для конденсаторів з паперовою ізоляцією $\theta \sim 30^\circ \text{C}$ і тоді $b = 1,6$, тому $b \cdot \theta = 1,6$.

$$\gamma = \exp\left(1,6 \sum_{v=1}^{\infty} J_v^2\right) \quad (2.23)$$

З вищесказаного випливає, що можливе перевантаження КБ струмами вищих гармонік буде впливати на всі представлені параметри, що характеризують термін служби конденсаторів.

Висновки до розділу 2

В результаті аналізу схем електропостачання промислових підприємств, проведеного в розділі 2, обраний об'єкт дослідження, електропостачання якого здійснюється за радіальної схемою.

Проаналізовано існуючі схеми заміщення елементів для мереж, що містять вищі гармоніки. Нелінійне навантаження може бути представлене або джерелами струму, або джерелами напруги v -ої гармоніки.

На основі регресійного аналізу проведено дослідження про значимість елементів схеми заміщення для розрахунку перевантаження КБ струмами вищих гармонік. Визначено, що найменш значущі - опори ліній електропередач і понижуючих трансформаторів.

Розроблено алгоритм формування схеми заміщення мережі при різних факторах виникнення вищих гармонік, що дозволяє проводити розрахунок перевантаження конденсаторних установок струмами вищих гармонік, а також визначати раціональний метод зниження впливу гармонік на КБ.

Підвищення терміну служби КБ досягається шляхом зниження рівня вищих гармонік струму і напруги в мережі. У наступних розділах представлені способи і заходи щодо їх зменшення.

РОЗДІЛ 3. РАЦІОНАЛЬНИЙ ВИБІР ПОТУЖНОСТІ КБ ЗА НАЯВНОСТІ СПОТВОРЕНЬ СТРУМУ І НАПРУГИ

3.1. Принципи визначення потужності КБ при наявності спотворень

У сучасних мережах електропостачання навантаження нерідко має нелінійний характер внаслідок застосування напівпровідникових перетворювачів змінного струму (наприклад, при роботі імпульсних стабілізаторів і перетворювачів електроенергії) [56]. Це призводить до появи вищих гармонік струму, які за своєю величиною стають порівнянними з першою (50 Гц) гармонікою. Конденсатори в установках КРП в сукупності з індуктивністю навантаження можуть утворювати коливальні контури, близькі по частоті резонансу до частоти однієї з вищих гармонік. Це може призвести до значного збільшення струму конденсаторів і істотно скоротити їх термін служби. А перенапруги, що виникають при резонансі на елементах КУ і навантаження можуть привести до пробію ізоляції. Для усунення подібних проблем на етапі обстеження об'єкта до впровадження конденсаторних установок компенсації реактивної потужності необхідно проводити аналіз спектру спотворень в мережі живлення підприємства.

Це викликано тим, що ємнісний опір конденсаторів, установлюваних з метою КРП, з підвищенням частоти напруги, що підводиться зменшується [20, 33]. Тому, якщо в напрузі мережі живлення є вищі гармоніки, тоді опір конденсаторів на цих гармоніках виявляється значно нижчим, ніж на частоті 50 Гц. Через це в конденсаторах навіть невеликі напруги вищих гармонік, які відповідають вимогам ГОСТ 13109-97, можуть викликати значні струми гармонік. З цієї причини на підприємствах з великою питомою вагою нелінійних навантажень конденсаторні установки працюють неефективно. Яскравим прикладом такого роду підприємств є металургійні заводи [1]. В цьому випадку КБ або відключаються захистом від перевантаження за струмом або за короткий термін виходять з ладу через вспучування банок (або прискореного старіння ізоляції). Відомі випадки, коли на підприємствах з

розвиненою кабельною мережею напругою 6 - 10 кВ батареї конденсаторів виявляються в режимі резонансу струмів (або близьких до цього режиму) на частоті будь - якої з гармонік, що призводить до небезпечного перевантаження їх за струмом [24]. Коефіцієнт перевантаження визначається за (3.1), а його допустиме значення регламентується ГОСТ 1282-79 [23]:

$$K_{пер} = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^n I_v^2}}{I_{ноб}} \leq 1.3$$

де I_v - діюче значення струму v -ої гармоніки; $I_{ноб}$ - номінальний струм конденсаторної батареї; n - порядковий номер останньої з врахованих гармонік.

Все це підтверджує необхідність попереднього дослідження спектру гармонік перед впровадженням КУ.

Крім цього в роботі була поставлено завдання: при наявності певного спектру гармонік в напрузі мережі визначити можливість підбору такої потужності КБ, при якій було б відсутнє перевантаження їх за струмом, а коефіцієнт потужності задовольняв би вимогам системи. Для вирішення зазначеного завдання було проведено дослідження, результати яких наведені нижче.

3.2. Вибір потужності КБ з урахуванням коефіцієнта перевантаження

Для визначення залежності коефіцієнту перевантаження КБ від зміни навантаження і параметрів електричної мережі була використана схема заміщення, наведена на рис. 2.16 з виключенням низьковольтного нелінійного навантаження і низьковольтних КБ (рис. 3.1).

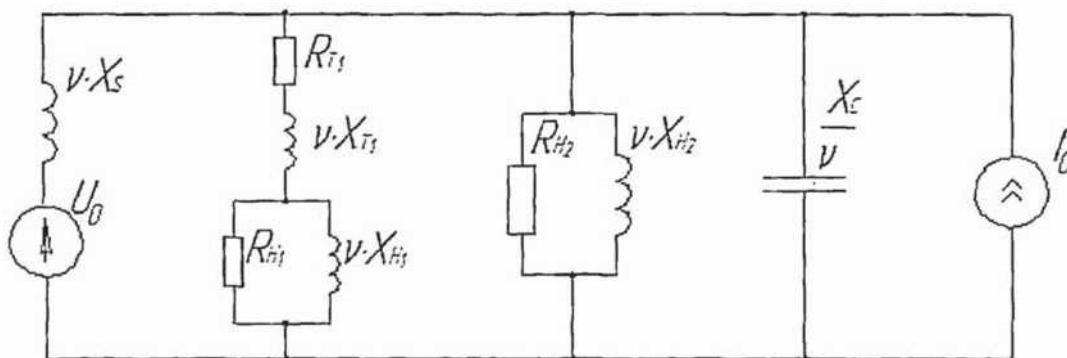


Рис. 3.1. Схема заміщення мережі

Така зміна видається справедливою, оскільки вирішується питання - чи реально вибрати таку потужність КБ, перевантаження якої буде знаходитися в допустимих межах за умови ефективної компенсації реактивної потужності.

В якості змінних параметрів при дослідженні прийняті ті з них, які безпосередньо впливають на роботу КБ і значимість яких виявлена в попередньому розділі. До цих параметрів відносяться: опір системи, потужність навантаження, потужність КБ, потужність трансформаторів і співвідношення лінійного і нелінійного навантаження.

Дані про гармонійний складі струму на шипах перетворювальної підстанції прийняті згідно [84] і наведені в таблиці 3.1, де ν - номер гармоніки, а I_ν - струм відповідної гармоніки, $U_H =$.

Таблиця 3.1. Гармонійний склад струму

ν	1	5	7	11	13	17	19	23	25
$I_\nu, \%$	100	4.1	1.5	2.8	2.1	0.75	0.8	0.68	0.7

При розрахунку прийнято припущення - нелінійна навантаження складається з приводів з однаковими частотними перетворювачами, тобто співвідношення гармонік струму для кожного приводу однакова.

Для розрахунку даної схеми заміщення використовується метод накладення, при цьому індуктивні опору на ν -ій гармоніці збільшуються в ν - раз, а ємнісні - зменшуються ν - раз. В результаті розрахунків визначаються струми через КБ і напруга на навантаженні з урахуванням кожної гармоніки.

З висновків, отриманих в розділі 1.2 витікає, що якщо джерелом вищих гармонік є навантаження підприємства, тоді для зменшення впливу вищих гармонік на роботу електрообладнання, необхідно зменшити опір системи в мережі живлення.

Коефіцієнт перевантаження КБ ($K_{пер}$) визначається в залежності від потужності навантаження (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5), опору системи (X_s) і величини компенсованої реактивної потужності ($Q_{кб}$).

Параметри схеми прийняті характерними для машинобудівних підприємств [8]. Повна потужність навантаження змінюється від S_1 до S_5 в бік збільшення:

$$S_1 \quad P_{H1}=1\text{МВт}, Q_{H1}=0,7\text{Мвар}, P_{H2}=0,75\text{МВт}, Q_{H2}=0,5\text{Мвар};$$

$$S_2 \quad P_{H1}=0,5\text{МВт}, Q_{H1}=0,35\text{Мвар}, P_{H2}=1,5\text{МВт}, Q_{H2}=1\text{Мвар};$$

$$S_3 \quad P_{H1}=1\text{МВт}, Q_{H1}=0,7\text{Мвар}, P_{H2}=1,5\text{МВт}, Q_{H2}=1\text{Мвар};$$

$$S_4 \quad P_{H1}=4\text{МВт}, Q_{H1}=2,8\text{Мвар}, P_{H2}=1,5\text{МВт}, Q_{H2}=1\text{Мвар};$$

$$S_5 \quad P_{H1}=1\text{МВт}, Q_{H1}=0,7\text{Мвар}, P_{H2}=6\text{МВт}, Q_{H2}=4\text{Мвар}.$$

Коефіцієнт перевантаження конденсаторних батарей і дослідження впливу вищих гармонік на компенсуючі пристрої здійснюються за такою математичною моделлю:

- при $\nu=1$

$$Z_T = Z_{H1} + \dots = \dots \cdot \gamma_M ;$$

$$Z_{H2} = K_{H2} + \dots = \dots + \dots$$

$$Z_{H2C} = Z_{H2} + \dots = \dots + \dots$$

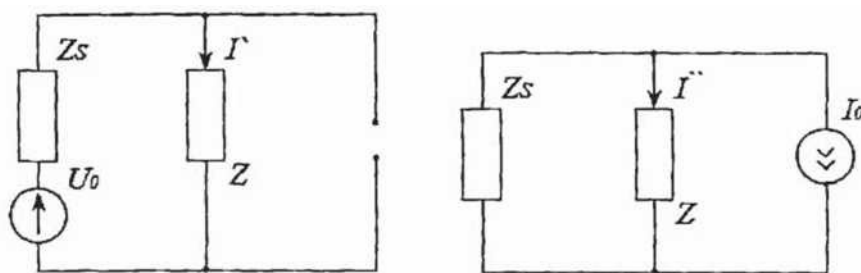


Рис. 3.2. Схеми заміщення мережі на першій гармоніці

$$U_0 = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad \text{В}$$

$$I' = \frac{I}{Z + \dots} \quad (3.1)$$

$$I'' = \frac{I}{Z + \dots} \quad (3.2)$$

$$I = + \quad (3.3)$$

- при $v=5$ Z_5 знаходиться з (3.2) при $v=5$

$$I_{C5} = \frac{I}{Z_5 + \dots} \quad (3.4)$$

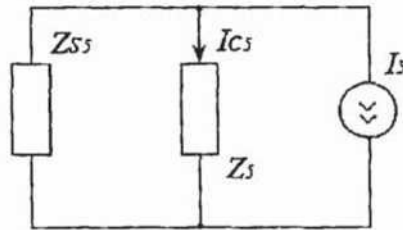


Рис. 3.3. Схема заміщення мережі для 5-ї гармоніки

Аналогічно знаходяться струми вищих гармонік при $v = 3, 17$.
 Моделювання і розрахунок таких схем заміщення проводиться в MS Excel, а також в програмному середовищі MatLab - пакет Simulink, питання застосування якої широко представлені в [54, 74].

В результаті отримано сімейство залежностей, представлене на рис. 3.4 - 3.7, де зазначено межу допустимого перевантаження КБ, рівною 1,3.

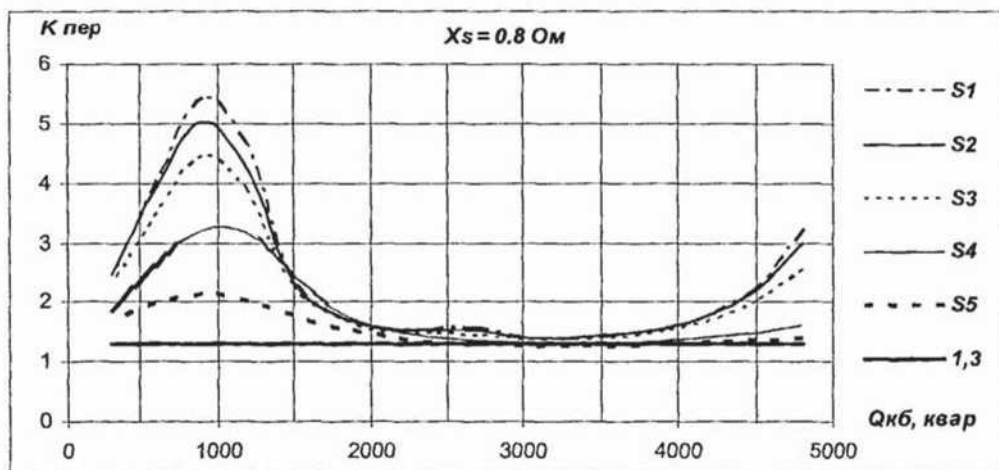


Рис. 3.4. Залежність $K_{пер}$ від $Q_{кб}$ при $X_s =$

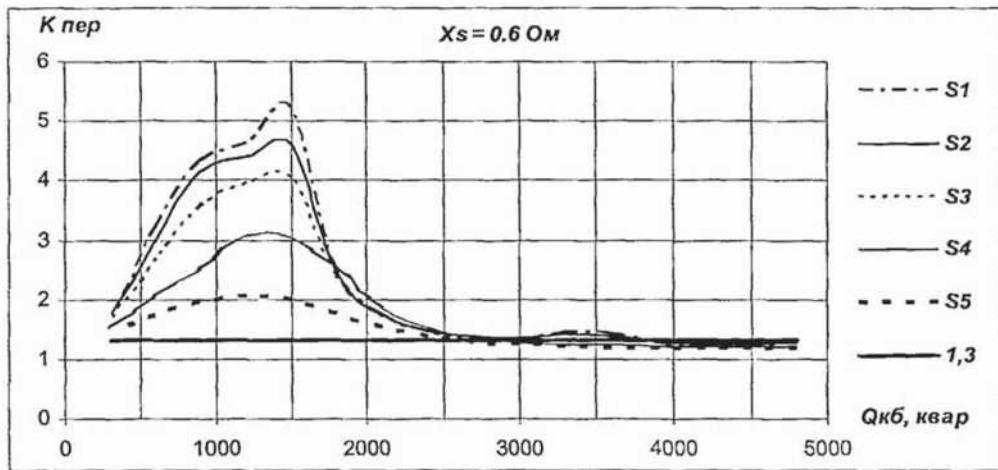


Рис. 3.5. Залежність $K_{пер}$ від $Q_{кб}$ при $X_s =$

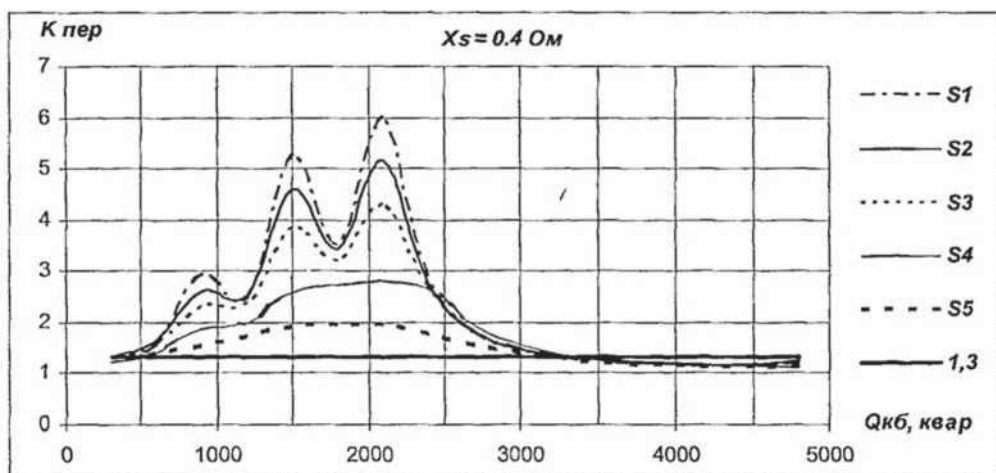


Рис. 3.6. Залежність $K_{пер}$ від $Q_{кб}$ при $X_s =$

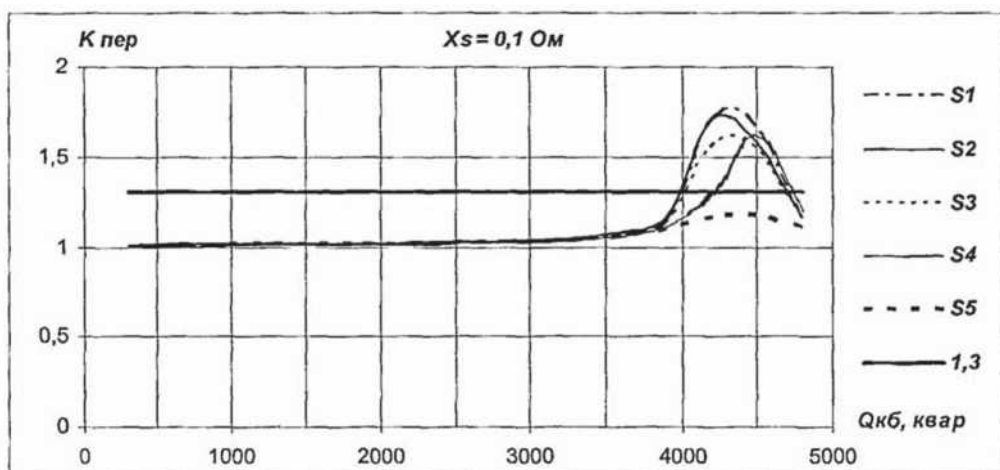


Рис. 3.7. Залежність $K_{пер}$ від $Q_{кб}$ при $X_s =$

Піки кривих, що отримані при побудові зазначених вище залежностей, являють собою не що інше, як резонанс на різних гармоніках. Зауважимо, що

при зменшенні опору системи резонансів на різних гармоніках стає більше і, отже, зростає струм, що протікає через КБ на цих гармоніках [68].

Також, виходячи з отриманого сімейства характеристик видно, що при зменшенні потужності навантаження в електричній мережі і відповідній зміні потужності конденсаторних установок збільшується навантаження КБ вищими гармонійними складовими струму.

На підставі отриманих залежностей можна визначити - в якій зоні потужності конденсаторних установок їх робота забезпечується без перевантажень. Це справедливо як для нерегульованих КБ, так і для регульованих. В останньому випадку, можливий вибір діапазону регулювання КБ, при якому не виникає перевантаження їх струмами вищих гармонік.

Таким чином, проведені розрахунки показали, що за допомогою вибору потужності компенсуючих пристроїв в залежності від параметрів електричної мережі, потужності навантаження і спектрального складу струму і напруги мережі можна забезпечити режим роботи КБ без перевантажень.

Розглянемо інший випадок. Джерелом вищих гармонік є напруга мережі живлення (рис. 3.8). При цьому навантаження на підприємстві носить лінійний характер.

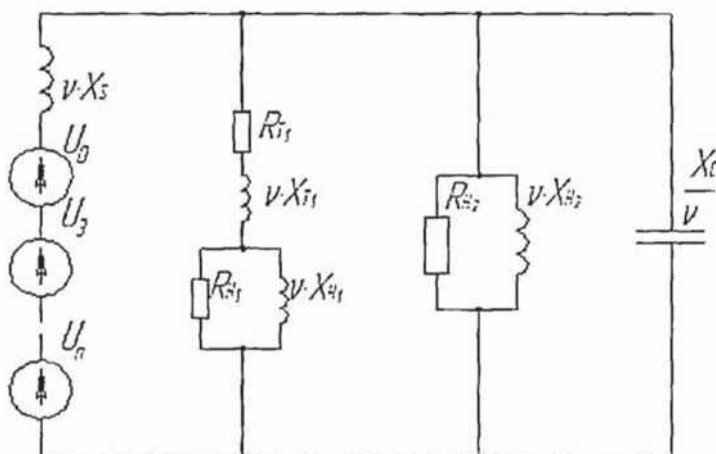


Рис. 3.8. Схема заміщення мережі при наявності спотворень з боку мережі живлення

Аналогічно раніше розглянутого випадку коефіцієнт перевантаження КБ визначається в залежності від потужності навантаження (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5), опору системи (X_s) і величини компенсованій реактивної потужності ($Q_{кб}$)

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги мережі живлення для розглянутого випадку, рівний близько 12%, визначається виходячи з таблиці 3.1 шляхом знаходження напруг v -ї гармоніки на шинах підстанції.

В результаті отримано сімейство характеристик, представлене на рис. 3.9 - 3.12.

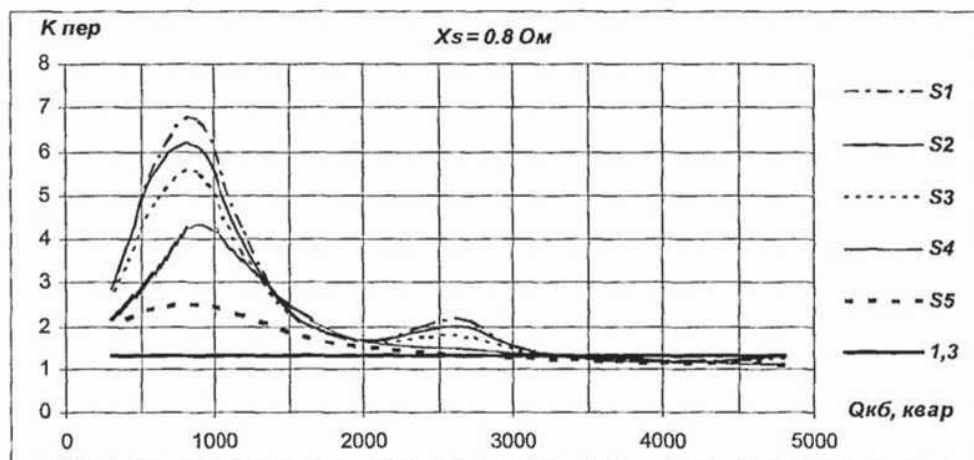


Рис. 3.9. Залежність $K_{пер}$ від $Q_{кб}$ при $X_s =$

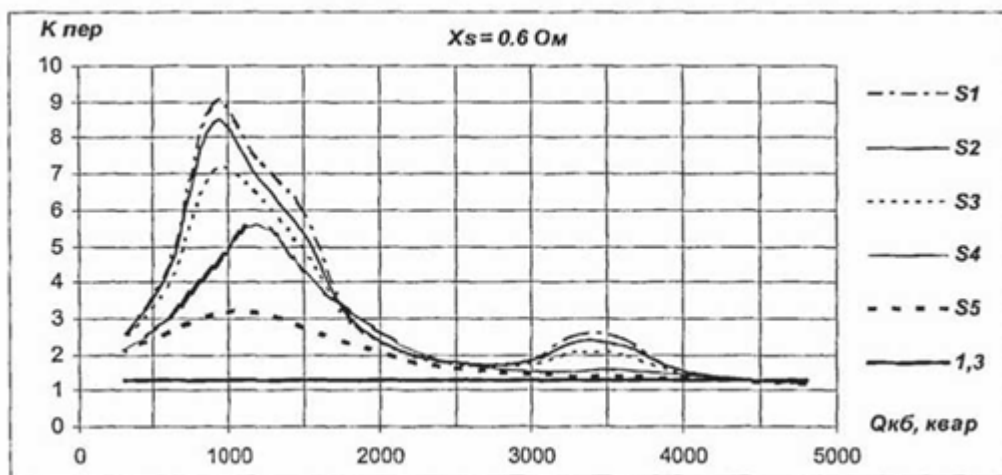


Рис. 3.10. Залежність $K_{пер}$ від $Q_{кб}$ при $X_s =$

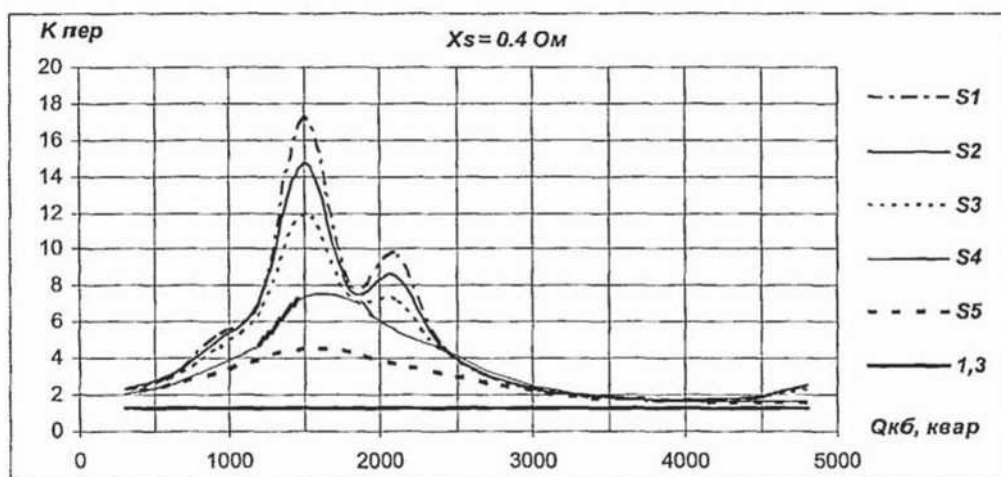


Рис. 3.11. Залежність $K_{пер}$ від $Q_{кб}$ при $X_s =$

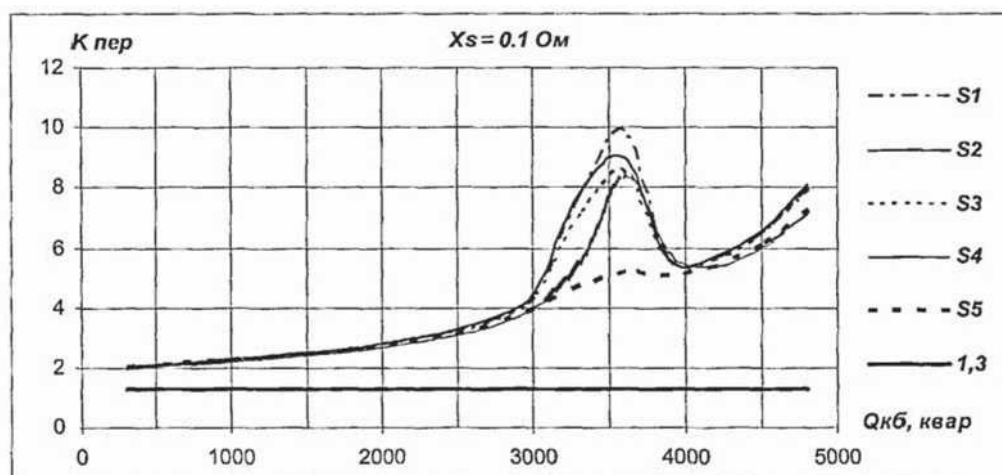


Рис. 3.12. Залежність $K_{пер}$ від $Q_{кб}$ при $X_s =$

Як і в разі появи вищих гармонік з боку нелінійного навантаження самого підприємства з графіків випливає, що при певному поєднанні параметрів навантаження, мережі і конденсаторних батарей можна забезпечити режим без перевантажень на конденсаторах.

Однак збільшення опору системи при наявності спотворень з боку мережі живлення призводить до зниження перевантаження конденсаторних установок струмами вищих гармонік. А це означає, що:

- якщо джерелом вищих гармонік є енергосистема живлення, тоді для зменшення перевантажень на КБ слід збільшувати опір системи;
- якщо джерелом вищих гармонік є навантаження підприємств, тоді для зменшення перевантажень на КБ слід зменшувати опір системи.

Очевидно, що зміна опору системи має відповідати умовам електромагнітної сумісності системи електропостачання при максимально можливому коефіцієнті потужності. Перш за все, необхідно при цьому підтримувати рівень напруги на допустимому рівні, про що буде сказано нижче (глава 4).

3.3. Коригування параметрів обраних пристроїв, що компенсують коефіцієнт потужності

Отримане графічне представлення сімейства характеристик коефіцієнта перевантаження КБ від опору системи, потужності навантаження, а також потужності компенсуючих пристроїв вимагає проведення математичного аналізу для вибору конкретних параметрів елементів електричної мережі. Причому, параметри компенсуючих пристроїв, що забезпечують режим роботи КБ без перевантажень, необхідно коригувати за коефіцієнтом потужності мережі, оскільки не всі значення потужності КБ, що задовольняють умову $K_{пер} <$, забезпечують ефективну компенсацію реактивної потужності в мережі підприємства.

Так, для визначення значень потужності КБ, опору системи і потужності навантаження, при яких забезпечується ефективна компенсація реактивної потужності без перевантажень, необхідно апроксимувати отриманий масив даних. При цьому виходить багатофакторна залежність коефіцієнта перевантаження від трьох змінних побудована на підставі дискретного діапазону зміни значень змінних. Тому при апроксимації крива побудованої функції повинна проходити точно через наявні точки даних. Такий різновид апроксимації називається інтерполяцією.

Істотним недоліком кускової інтерполяції є те, що в точках стику різних інтерполяційних поліномів виявляється розривною їх перша похідна (функція має злам). Цей недолік усувається при використанні особливого виду багатоінтервального інтерполяції - інтерполяції сплайнами (англ, spline - рейка, лінійка).

Сплайн - це функція, яка на кожному частковому інтервалі представляється поліномом деякої міри, і на всьому відрізку інтерполяції неперервна разом з кількома своїми похідними. На практиці широке застосування отримали В-сплайни. В-сплайни забезпечують зручний для застосування механізм побудови гладких кусочно-багаточленних (КМ) функцій деякого класу. Клас функцій характеризується послідовністю точок розриву, порядком сплайна і заданим ступенем гладкості в кожній внутрішній точці розриву. Відповідний В-сплайн порядку k знаходиться на заданій послідовності $t \in \dots$. Послідовність вузлів повинна відповідати таким вимогам:

- якщо КМ-функція повинна мати в точці ξ похідні j -го порядку включно, тоді величина ξ повинна входити j раз в послідовність вузлів $k-j$

- ξ_1 і ξ_n є кінцевими точками даного інтервалу; перші k вузлів послідовності повинні рівнятися ξ_1 , а k останніх - ξ_n це забезпечить безперервність праворуч В-сплайну поблизу ξ_1 і безперервність зліва поблизу ξ_n .

Після задоволення цих вимог генерується послідовність вузлів - вектор розмірності M , а потім обчислюються $m = \dots$ - В-сплайнів B_1, \dots порядку k складових КМ-функції на заданому інтервалі і має на ньому задану ступінь гладкості. Кожна КМ-функція має унікальну форму у вигляді лінійної комбінації В-сплайнів:

$$p = \dots + \dots + \dots + \dots \quad (3.5)$$

В-сплайн - це невід'ємна функція, відмінна від нуля тільки на послідовності інтервалів $[t_i, t_{i+1}]$. Така послідовність інтервалів називається носієм В-сплайну. Причому будь-яка інша КМ-функція, що входить в той же, що і В-сплайн клас, має більший, ніж В-сплайн, B_i носій. Ця обставина робить В-сплайни вельми привабливими для використання в якості базисних функцій: вплив конкретного В-сплайну поширюється лише на декілька інтервалів [13].

На першому етапі інтерполяції виводяться значення потужності навантаження, опору системи і потужності КБ, що задовольняють умови $K_{пер} < \dots$ на другому етапі проводиться вибір параметрів змінних, при яких коефіцієнт потужності мережі максимальний $K_{ном} \rightarrow \dots$. Для прикладу був проведений розрахунок, при якому був прийнятий мінімальний коефіцієнт потужності, що дорівнює 0,81.

Таким чином, за допомогою розробленого програмного продукту виводяться параметри елементів електричної мережі, при яких забезпечується режим роботи КБ без перевантажень з максимальним коефіцієнтом потужності мережі.

3.4. Алгоритм вибору потужності КБ

На підставі наведених вище досліджень розроблений алгоритм вибору потужності КБ, що дозволяє ефективно знизити споживання реактивної потужності і забезпечити відсутність перевантажень в мережі від вищих гармонік (рис. 3.13).

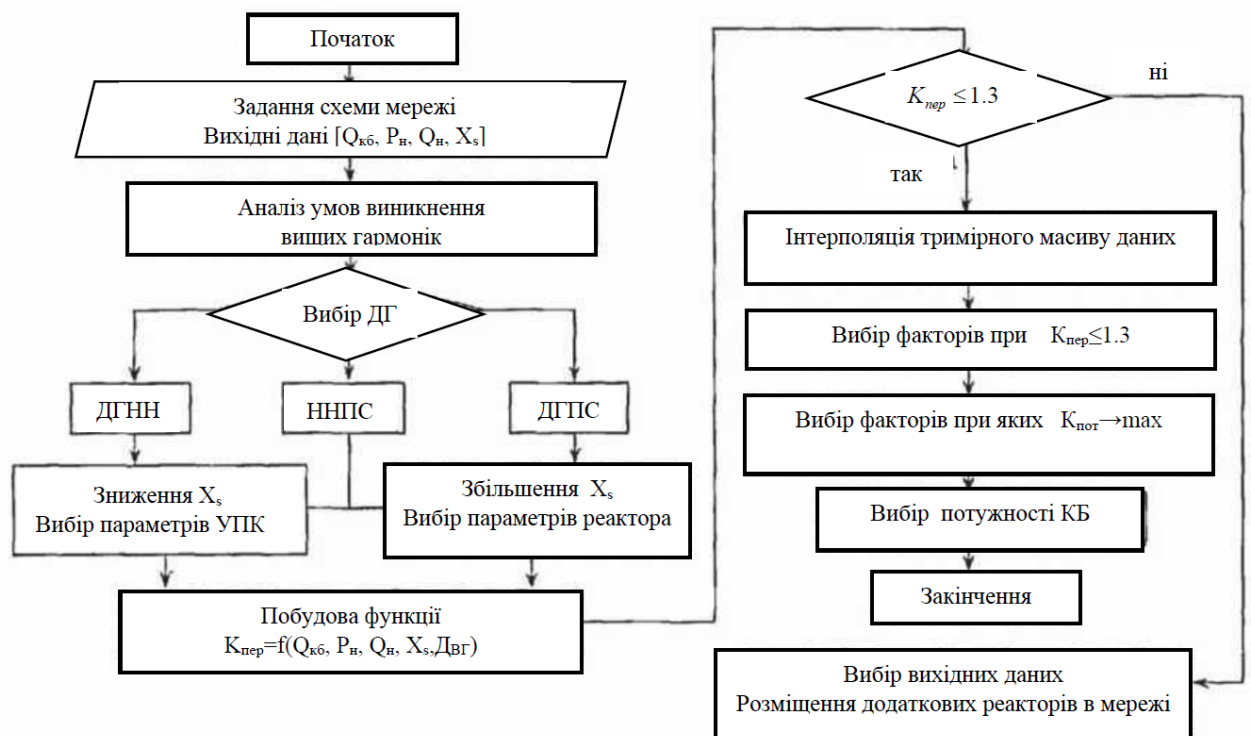


Рис. 3.13. Алгоритм вибору потужності компенсуючих пристроїв

Спочатку необхідно задати узагальнену схему заміщення мережі, на основі якої будуть проводитися розрахунки коефіцієнта перевантаження, що компенсуються. Важливо визначити діапазон зміни параметрів схеми заміщення мережі, зокрема, потужності навантаження, опору системи і потужності компенсуючих пристроїв, а також проаналізувати джерела вищих гармонік і природу їх виникнення.

Наступним етапом є побудова багатофакторної залежності коефіцієнта перевантаження КБ від обраних змінних. При наявності значень потужності КБ, при якій навантаження на конденсаторах знаходиться в допустимих межах, проводиться інтерполяція багатофакторної залежності. Далі з тривимірного масиву даних необхідно вибрати значення змінних, при яких забезпечуються дві умови: коефіцієнт потужності мережі максимальний, коефіцієнт перевантаження КБ не перевищує допустимого значення 1.3. Важливою особливістю інтерполяції є те що, крива побудованої функції повинна проходити точно через наявні точки даних. Задані n -точок коефіцієнта перевантаження КБ в точності співпадуть з побудованими за допомогою інтерполяції B -сплайнами, тобто при виборі чинників із заданого масиву n -точок за умовою $K_{пер} < \dots$ помилка можлива лише на стадії розрахунку схеми заміщення. За додаткової умови $K_{ном} \rightarrow \dots$ проводиться остаточний вибір потужності КБ, при якій забезпечується безпечний і ефективний режим компенсації реактивної потужності.

Кінцевим результатом розрахунку є таблиця, в якій визначені параметри навантаження, електричної мережі, потужності компенсуючих пристроїв, при яких забезпечується режим роботи КБ без перевантажень за умови максимального коефіцієнта потужності мережі.

Висновки до розділу 3

У розділі 3 проведені теоретичні дослідження впливу вищих гармонік на роботу конденсаторних установок. При цьому вирішувалося завдання вибору такої потужності компенсуючих пристроїв в залежності від параметрів

електричної мережі, потужності навантаження і спектрального складу струму і напруги на конденсаторах, при якій буде забезпечуватися робота КБ без перевантажень і максимальний коефіцієнт потужності мережі.

Встановлено, що при певних параметрах навантаження, опору системи і потужності компенсуючих пристроїв можливо забезпечити режим роботи КБ без перевантажень.

На основі отриманих залежностей коефіцієнта перевантаження конденсаторних батарей від факторів виникнення спотворень в мережі отримані наступні висновки:

- якщо джерелом вищих гармонік є живильна мережа, тоді для зменшення перевантажень КБ необхідно збільшувати опір системи;

- якщо джерелом вищих гармонік є навантаження підприємств, то для зменшення перевантажень КБ необхідно зменшувати опір системи.

При дослідженні опір системи змінювався в межах від 0,1 до 1,0 Ом. Межі потужності лінійної навантаження - від 2 до 9 МВ А.

Розроблено алгоритм вибору потужності КБ при наявності вищих гармонік, що забезпечує відсутність перевантажень на конденсаторах і максимально можливе значення коефіцієнта потужності, що визначається як:

$$K_{nom} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_i^2}{\sum_{i=1}^n U_i^2}}$$

Мінімальним значенням коефіцієнта потужності було прийнято $K_{nom} = 0,9$, чому відповідають параметри елементів електричної мережі, наведені в додатку 4.

Алгоритм вибору заснований на аналізі багатфакторного масиву даних за допомогою інтерполяції його В-сплайнами. Розроблено комп'ютерну програму для формування рівнянь вибору потужності конденсаторних батарей з поданням її реалізації.

РОЗДІЛ 4. ВИБІР ДОДАТКОВИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ КОНДЕНСАТОРНИХ БАТАРЕЙ

4.1. Зниження впливу вищих гармонік на КБ шляхом розміщення в мережі додаткових реакторів

Зменшення впливу вищих гармонік на роботу КБ можна досягти за допомогою засобів підвищення якості електричної енергії, до яких належать, насамперед, фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКУ) [32] і активні фільтри [65]. Для кожного порядку гармонік потрібен окремий силовий фільтр в складі ФКУ, налаштований на цю гармоніку. Як правило, встановлюються кілька фільтрів, що призводить до збільшення вартості обладнання. Активні фільтри базуються на застосуванні силових напівпровідникових систем, що також призводить до значної вартості обладнання.

Тому, з огляду на критерій економічної ефективності, що має важливу роль в розвитку і функціонуванні підприємств промисловості, пропонується спосіб зниження впливу вищих гармонік на роботу електрообладнання шляхом варіювання параметрів додатково розміщених в електричній мережі реакторів, які є істотно економічнішими з точки зору витрат, ніж застосування ФКУ і активних фільтрів. Обґрунтування такого підходу полягає в зміні амплітудно-частотних характеристики (АЧХ) мережі (спільно з навантаженням) щодо КБ шляхом включення в мережу додаткових реакторів і зміщення значень резонансних частот.

Розрахунок перевантаження КБ струмами вищих гармонік із застосуванням додаткових реакторів виробляється на основі схеми заміщення на рис. 2.16 з виключенням низьковольтової нелінійного навантаження (рис. 4.1).

При дослідженні кратність струмів вищих гармонік в частках від струму основної гармоніки для 5, 7, 11, 13 і 17 гармонік прийнята відповідно рівною: 0,2; 0,14; 0,1; 0,07; 0,06 [30]. Розрахунок діючих значень струмів через КБ проводиться за відомим висловом:

$$I_n = \sqrt{\sum I_n^2}, \quad (4.1)$$

де I_n - відповідні струми n гармоніки.

Очевидно, що якщо джерелом вищих гармонік є навантаження підприємства, тоді для зменшення впливу вищих гармонік на роботу електрообладнання (включаючи пов'язані підприємства, що живляться від спільної мережі), оптимально зменшити опір системи в мережі живлення [79].

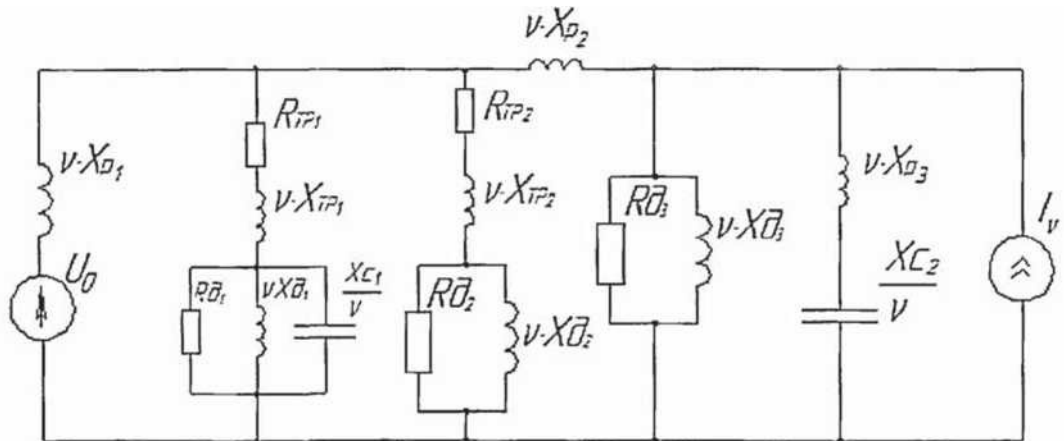


Рис. 4.1. Схема заміщення мережі з додатковими реакторами

Тут підкреслимо, що при цьому зменшуються складові вищих гармонік в напрузі мережі живлення.

Однак рішення такого завдання є важким, тому що вимагає створення установки поздовжньо-ємнісної компенсації. Питання застосування таких пристроїв розглянуті в [36, 37]. Виходячи з того, що в представленій схемі заміщення присутні різного роду реактивні опори, тоді реально підібрати такі параметри додаткових реакторів, при яких полюси АЧХ мережі щодо КБ зміщуються, і перевантаження на конденсаторах знижується.

Місця включення реакторів показані на рис. 4.1:

- паралельні гілки схеми заміщення за винятком гілок з опором асинхронних двигунів, оскільки вплив вищих гармонік на ці елементи незначні внаслідок наявності індуктивного опору; гілка з опором системи;
- між точками приєднання паралельних навантажень до шин підстанції.

В результаті розрахунків, заснованих на методах накладення і еквівалентування схеми заміщення, були отримані залежності струмів через низьковольтний (I_{C1}) і високовольтний (I_{C2}) конденсатори від величин X_{P1} , X_{P2} і X_{P3} . Графіки діючих значень I_{C1} і I_{C2} наведені на рис. 4.2 - 4.5.

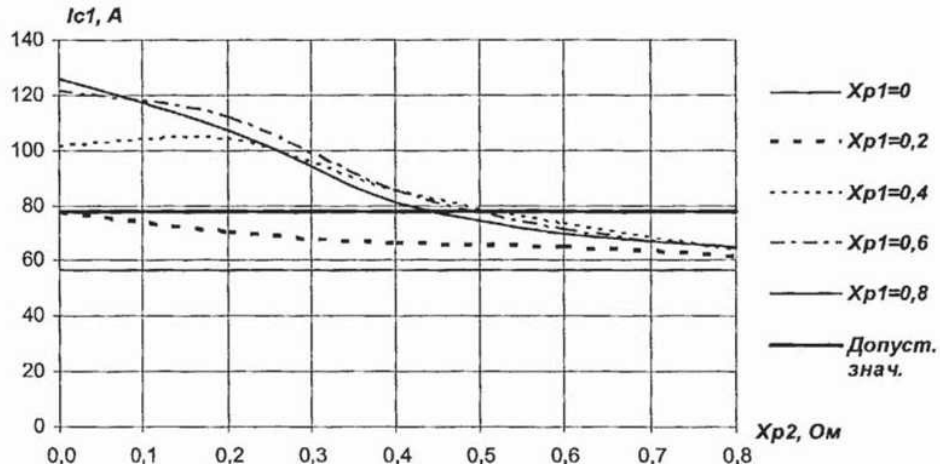


Рис. 4.2. Залежність I_{C1} від X_{P2} при незмінному X_{P1}

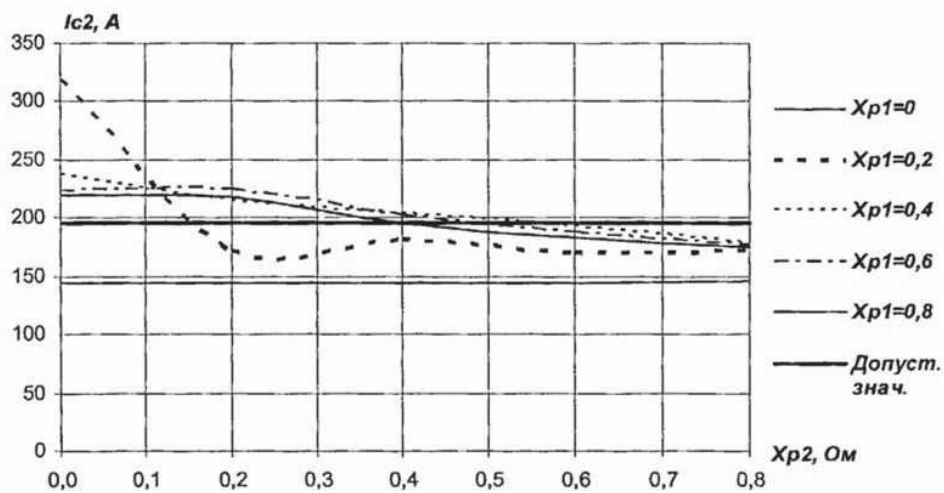


Рис. 4.3. Залежність I_{C2} від X_{P2} при незмінному X_{P1}

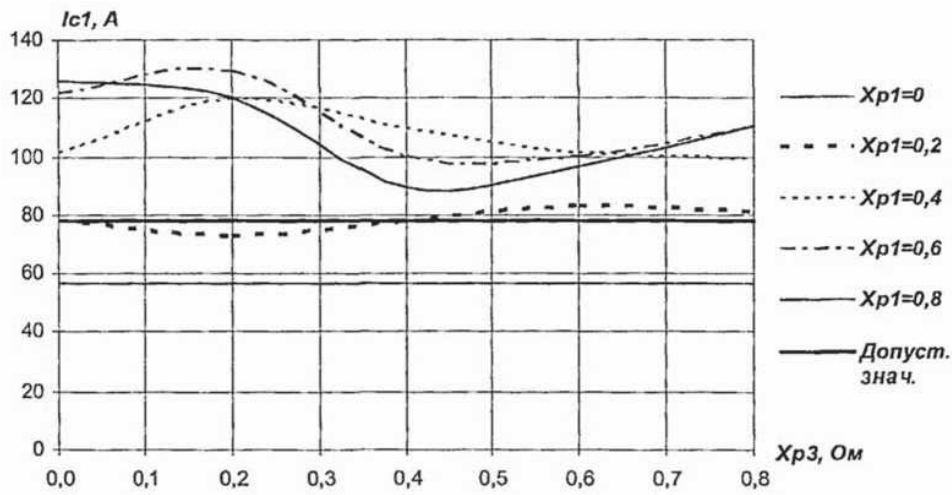


Рис. 4.4. Залежність I_{C1} від X_{P3} при незмінному X_{P1} і відсутності X_{P2}

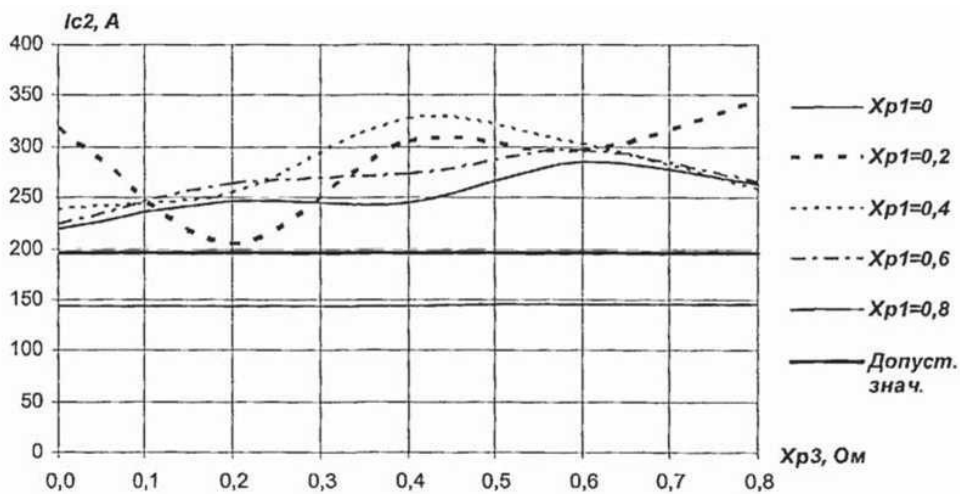


Рис. 4.5. Залежність I_{C1} від X_{P3} при незмінному X_{P1} і відсутності X_{P2}

На графіках позначені межі допустимих значень I_{C1} і I_{C2} , що становлять відповідно 78 А і 195 А. З отриманих результатів розрахунку відомо, що при певному поєднанні реактивних опорів системи і додаткових реакторів (X_{P2} і X_{P3}) можна досягти зменшення струмів конденсаторних батарей до їх допустимого значення.

При різному поєднанні електричного навантаження, що містить джерела вищих гармонік, можна підібрати таке поєднання додаткових реакторів, яке дозволить зменшити до безпечних значень струми на конденсаторних батареях.

Очевидно, що при заданому навантаженні, шляхом вирішення варіаційної задачі можна вибрати параметри додаткових реакторів, при яких істотно

зменшується вплив вищих гармонік на роботу КБ. Таке рішення проблеми суттєво економічніше в порівнянні зі стандартним, а саме застосуванням установок поздовжньо - ємнісної компенсації, ФКУ і активних фільтрів.

4.2. Перевантаження на КБ в залежності від співвідношення лінійного і нелінійного навантаження

На підставі досліджень, представлених в розділі 4.1, встановлено, що шляхом включення певним чином додаткових реакторів в електричну мережу підприємства знижується перевантаження КБ струмами вищих гармонік.

Однак, з урахуванням різних факторів виникнення вищих гармонік в електричній мережі підприємства, описаних в розділі 2.3.2, необхідно провести додаткові дослідження з вибору додаткових пристроїв, що забезпечують безпечну роботу КБ. З цією метою на підставі розробленої узагальненої схеми заміщення мережі були проведені розрахунки коефіцієнтів перевантаження високовольтних і низьковольтних КБ залежно від факторів виникнення вищих гармонік. При цьому як на низькій стороні, так і на високій стороні напруги проводилося збільшення потужності джерела вищих гармонік і відповідне зменшення потужності лінійного навантаження і визначалося співвідношення лінійного і нелінійного навантажень, при якому виникає перевантаження на конденсаторах.

Розглядаються два види джерел вищих гармонік з позиції їх природи виникнення: зовнішнє джерело гармонік щодо вводу підприємства (схема заміщення з джерелами напруги частотами від 1 до n (U_0, U_3, \dots)) і нелінійне навантаження самого підприємства (схема заміщення з джерелами струму (I_0, I_3, \dots)). Параметри навантаження представлені в додатку 1.

На рис. 4.6 - 4.8 представлені залежності коефіцієнта перевантаження ($K_{пер}$) КБ1 і КБ2 від відносної потужності компенсуючих пристроїв ($Q_{КБ}^*$) при виникненні вищих гармонік в результаті роботи нелінійного навантаження самого підприємства (ІГНН). $Q_{КБ}^*$ визначається наступним чином:

$$\frac{Q_{KB1}}{S_1} = \frac{Q_{KB2}}{S_2} = \lambda_{KB}^* \quad (4.2)$$

де Q_{KB1} , Q_{KB2} - потужність низьковольтних і високовольтних КБ відповідно; S_1, S_2 - повна потужність низьковольтного та високовольтного навантаження відповідно.

Графіки побудовані при різних значеннях опору системи X_s і при різних співвідношеннях лінійних і нелінійних навантажень.

На графіках: - співвідношення лінійного і нелінійного низьковольтного навантаження змінюється; $VB=var$ - співвідношення лінійного і нелінійного високовольтного навантаження змінюється; $VB=const$ - високовольтне навантаження лінійна і не змінюється; $HB = const$ - низьковольтна навантаження лінійна і не змінюється.

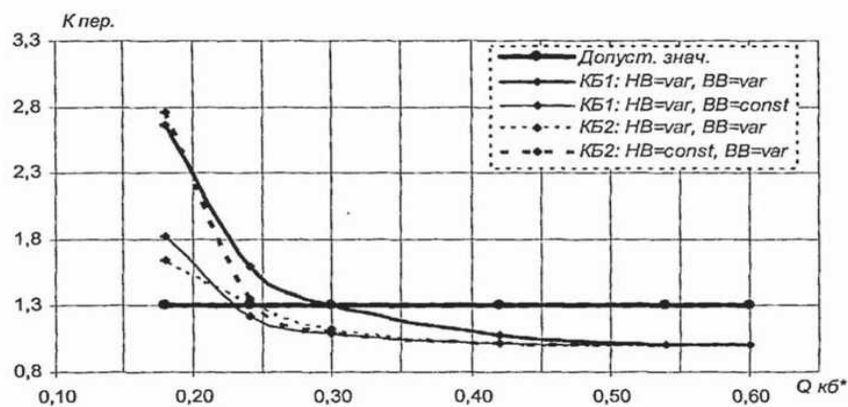


Рис. 4.6. Залежність $K_{пер}$ КБ1 і КБ2 від Q_{KB}^* при $X_s = 0.1$

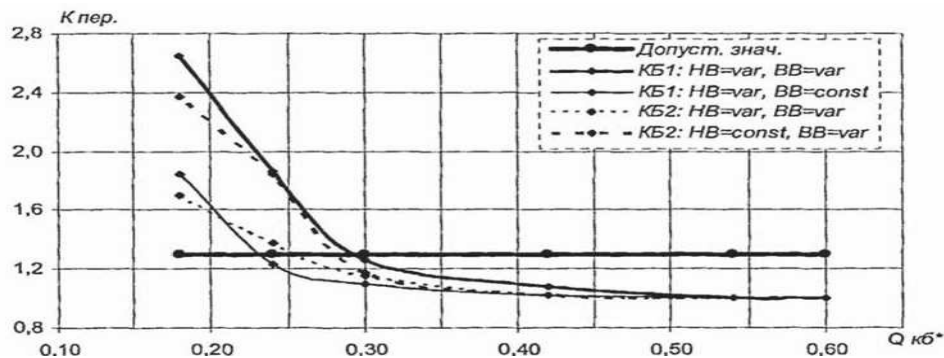


Рис. 4.7. Залежність $K_{пер}$ КБ1 і КБ2 від Q_{KB}^* при $X_s = 0.2$

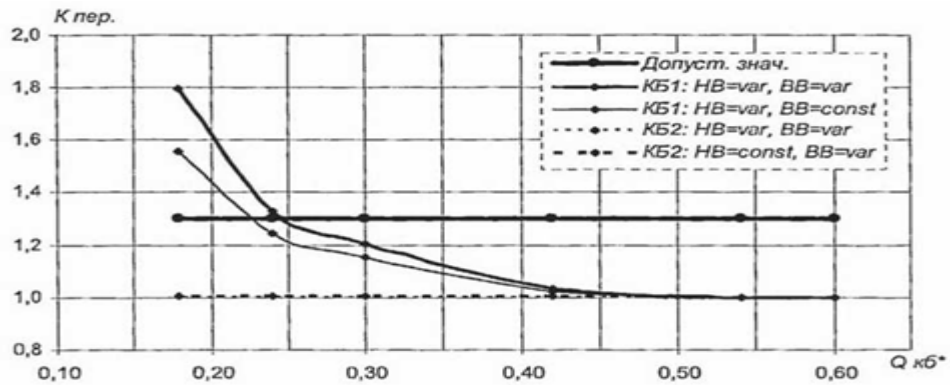


Рис. 4.8. Залежність $K_{пер}$ КБ1 і КБ2 від $Q_{кБ}^*$ при $X_s =$

З графіків видно, що при зниженні потужності КБ і, відповідно, при збільшенні потужності ДГ збільшується навантаження КБ вищими гармоніками. Також, при зниженні опору системи X_s зменшується перевантаження струмами вищих гармонік як низьковольтних, так і високовольтних конденсаторних установок. Однак перевантаження низьковольтних КБ знижується в меншій мірі. Це пояснюється тим, що на опорі понижувального трансформатора відбувається падіння напруги від несинусоїдального струму, що генерується джерелом гармонік на низькій стороні. В результаті спотворюється напруга, що живить низьковольтне навантаження.

При зниженні опору системи спостерігається тенденція зниження коефіцієнта перевантаження КБ. Однак рішення такого завдання є трудомістким, тому що необхідно встановлювати УПК. В таких умовах для зниження рівня вищих гармонік можливе застосування антигармонічних реакторів. Вибір параметрів таких реакторів визначається виходячи з трьох умов:

- коефіцієнт перевантаження КБ по напрузі не повинен перевищувати допустимого $K_{перU} \leq$;

- опір КБ на гармоніці не повинен перевищувати опір індуктивності на тій же гармоніці для виключення резонансних режимів на гармоніках вище 50 Гц:

$$X_{Cv} \leq X_{Pv};$$

- коефіцієнт перевантаження КБ за струмом не повинен перевищувати допустимого $K_{перI} \leq$;

Залежність коефіцієнта перевантаження КБ від відносної потужності компенсуючих пристроїв із застосуванням антигармонічного реактора представлена на рис. 4.9, де $K_{перI}$ КБ струмами вищих гармонік не перевищує нормативних значень.

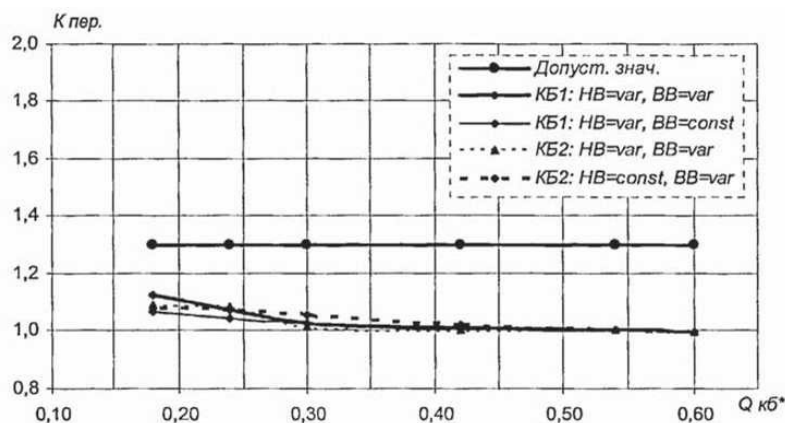


Рис. 4.9. Залежність $K_{перI}$ КБ1 і КБ2 від $Q_{КБ}^*$ із застосуванням антигармонічного реактора

Розглянемо інший варіант виникнення вищих гармонік - при наявності зовнішнього ДГ щодо вводу підприємства (ДГПС). При цьому в електричній мережі підприємства відсутні нелінійні приймачі. Залежно $K_{пер}$ КБ від відносної потужності конденсаторних батарей при різному значенні опору системи представлені на рис. 4.10 - 4.12.

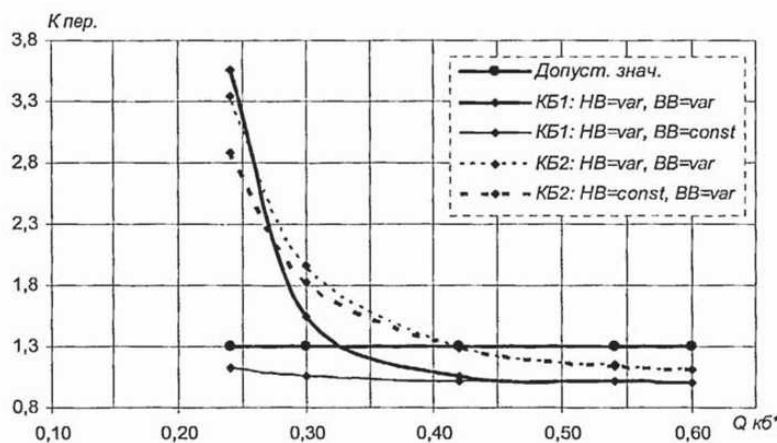


Рис. 4.10. Залежність $K_{пер}$ КБ1 і КБ2 від $Q_{КБ}^*$ при $X_s =$

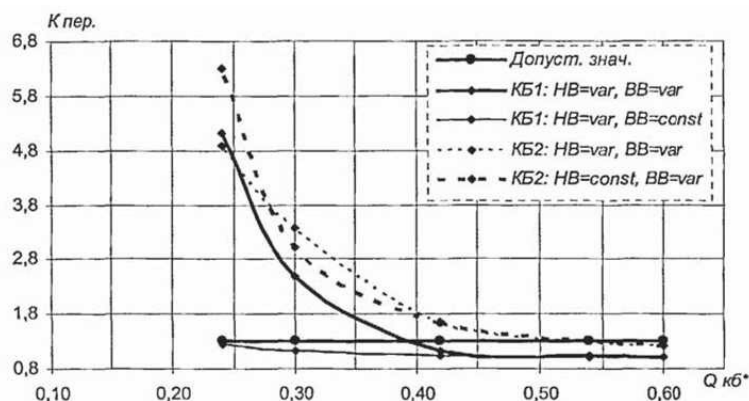


Рис. 4.11. Залежність $K_{пер}$ КБ1 і КБ2 від $Q_{КБ}^*$ при $X_s =$

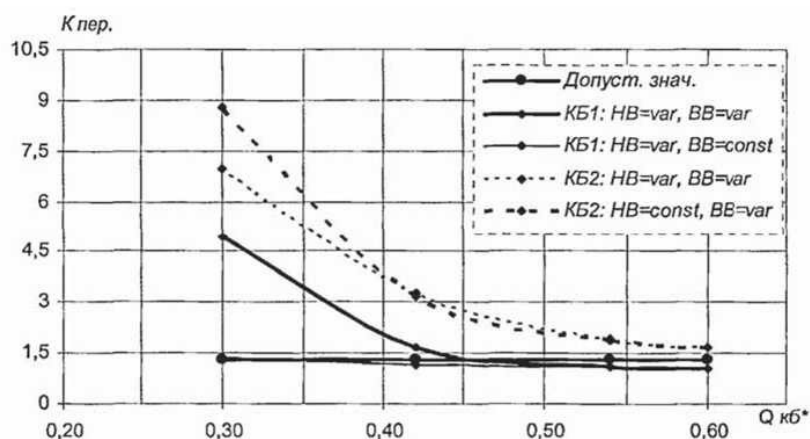


Рис. 4.12. Залежність $K_{пер}$ КБ1 і КБ2 від $Q_{КБ}^*$ при $X_s =$

З графіків видно, що при зниженні потужності КБ збільшується навантаження КБ вищими гармоніками. Також, при збільшенні опору системи зменшується коефіцієнт перевантаження КБ1 і КБ2. Це пояснюється тим, що індуктивний опір прямо пропорційний частоті струму, що протікає, тим самим утворюється свого роду загороджувальний фільтр для струмів вищих гармонік. При збільшенні опору мережі живлення створюється більший опір для «проникнення» вищих гармонік, що виникають від зовнішнього ДГ щодо вводу підприємства.

В таких умовах збільшення опору мережі живлення призводить до зниження перевантажень на КБ.

Вибір параметрів таких пристроїв проводиться виходячи з таких умов:

1. втрати напруги в мережі підприємства не повинні перевищувати 5% від номінальної напруги мережі;

2. коефіцієнт перевантаження КБ по току не повинен перевищувати допустимого $K_{перI} \leq \dots$.

У разі недостатнього зниження перевантаження на КБ слід застосовувати антигармонічні реактори.

Розглянемо ще один варіант - при виникненні вищих гармонік в результаті роботи нелінійного навантаження підприємства і при наявності зовнішнього джерела вищих гармонік щодо вводу підприємства (ННПС). В результаті розрахунку коефіцієнта перевантаження конденсаторних установок отримані залежності, представлені на рис. 4.13-4.15.

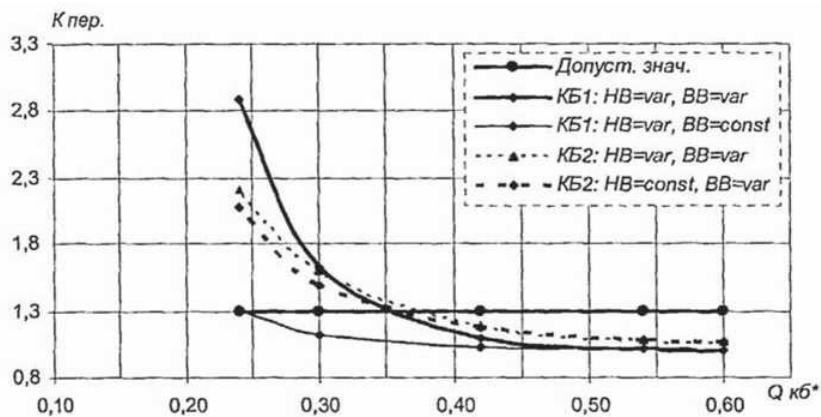


Рис. 4.13. Залежність $K_{пер}$ КБ1 і КБ2 від Q_{KB}^* при $X_s =$

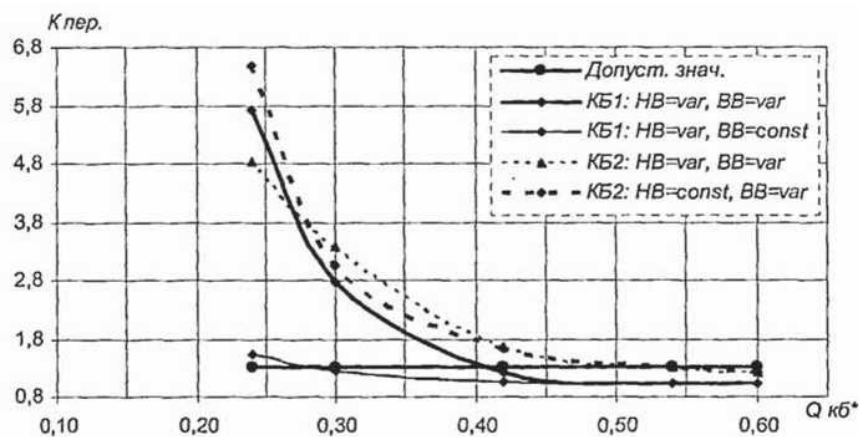


Рис. 4.14. Залежність $K_{пер}$ КБ1 і КБ2 від Q_{KB}^* при $X_s =$

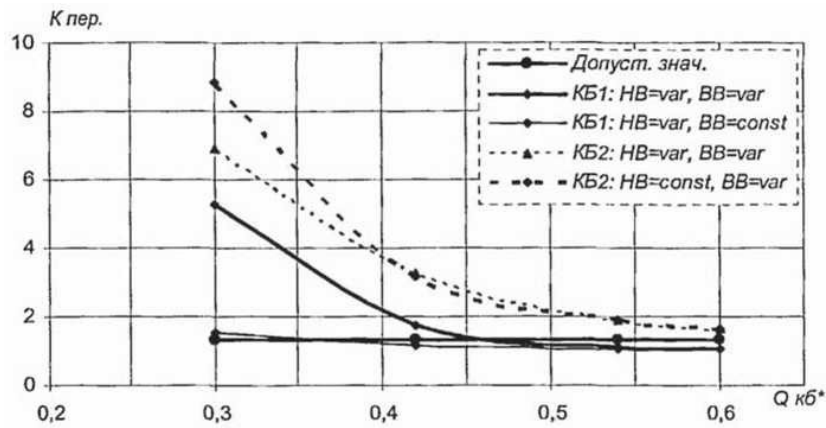


Рис. 4.15. Залежність $K_{пер}$ КБ1 і КБ2 від $Q_{КБ}^*$ при $X_s =$

В цьому випадку необхідно вирішувати варіаційну задачу по зміні опору системи з урахуванням ступеня впливу джерел гармонік на $K_{пер}$ КБ. Так, з урахуванням обраних параметрів мережі, навантаження і спектрального складу напруги мережі і струму нелінійного навантаження, збільшення опору системи призводить до зниження перевантаження КБ. Також для зниження перевантажень на КБ слід застосовувати антигармонійні реактори, а при недостатній ефективності одного способу застосовувати їх спільно (рис. 4.16).

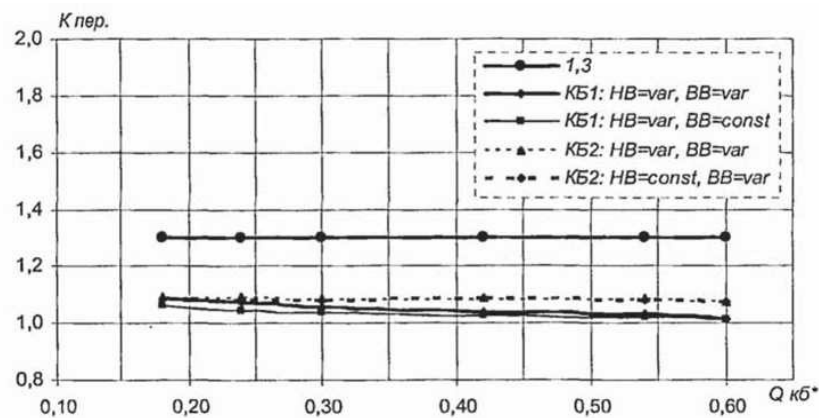


Рис. 4.16. Залежність $K_{пер}$ КБ1 і КБ2 від $Q_{КБ}^*$ із застосуванням додаткових реакторів

Вибір параметрів цих пристроїв ґрунтується виходячи з розглянутих вище умов. Важливою особливістю всіх побудованих характеристик є найбільше значення коефіцієнта перевантаження КБ при найменшій відносній потужності компенсуючих пристроїв, тобто чим менше потужність КБ і, відповідно,

споживана і компенсуючи реактивна потужність в мережі, тим більше перевантаження конденсаторів струмами вищих гармонік. Звідси впливає важлива умова: вибір параметрів додатково розміщених в мережі реакторів, що дозволяють знизити рівень вищих гармонік на конденсаторах, слід проводити при мінімально можливій потужності КБ в електричній мережі підприємства і відповідної їй потужності навантаження.

4.3. Вплив опору енергетичної системи на перевантаження КБ

Спосіб зниження впливу вищих гармонік на КБ, при якому в електричній мережі розміщуються додаткові реактори, базується на зміні АЧХ вузла мережі, що впливає з наведених вище досліджень. Тому доцільно досліджувати АЧХ щодо затискачів КБ1 і КБ2 в залежності від опору системи, параметрів навантаження і потужності компенсуючих пристроїв. Аналіз отриманих залежностей дозволить визначити значення резонансних частот, при яких виникає найбільше перевантаження КБ струмами вищих гармонік, і можливе зміщення цих частот при розміщенні в мережі реакторів.

Для обраних параметрів мережі і навантаження побудовані АЧХ щодо затискачів високовольтної конденсаторної установки КБ2, представлені на рис. 4.17 - 4.19. Параметри схеми заміщення відповідають додатком 1.

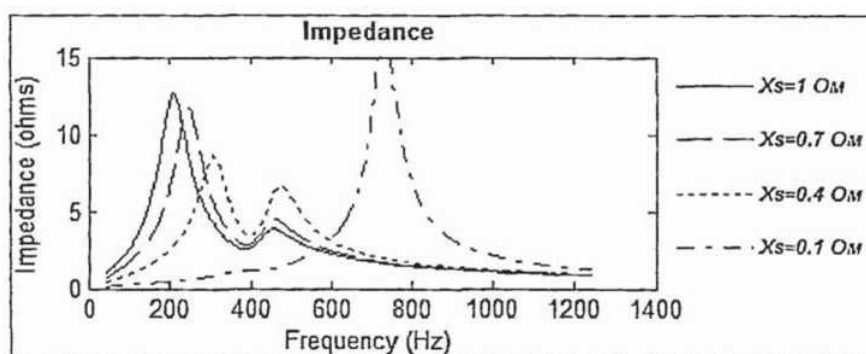


Рис. 4.17. АЧХ мережі щодо затискачів КБ2 при $HV = var$, $BV = const$

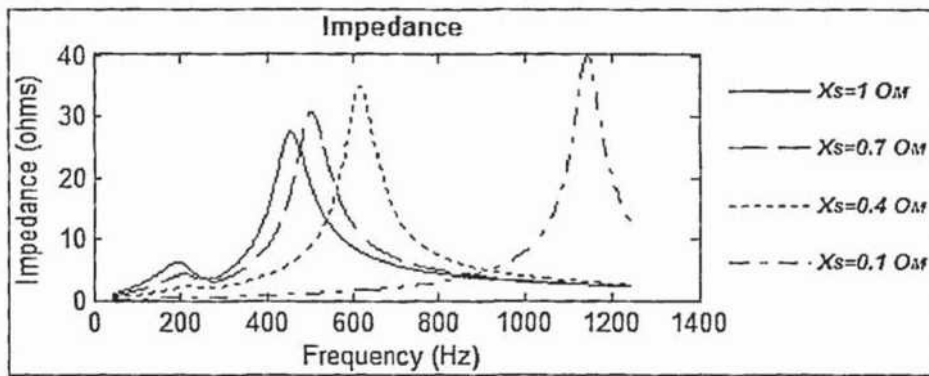


Рис. 4.18. АЧХ мережі щодо затискачів КБ2 при $HB = const, BB = var$

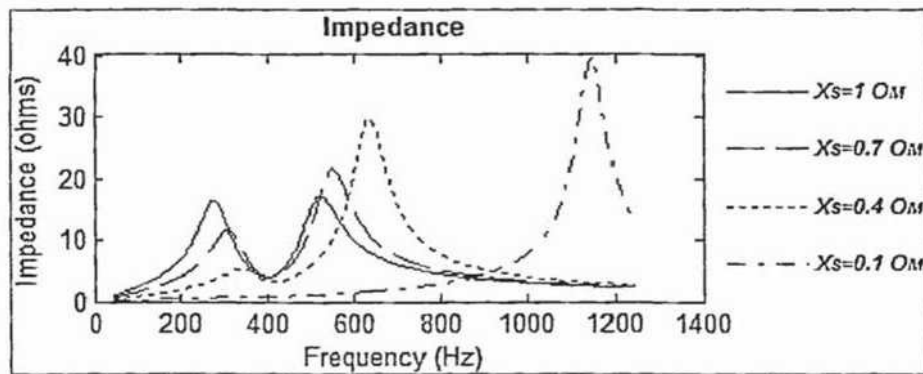


Рис. 4.19. АЧХ мережі щодо затискачів КБ2 при $HB = var, BB = var$

З графіків випливає, що при зменшенні опору системи резонансна частота зсувається в область більш високих частот. Так, наприклад, при наявності амплітуд тільки 5 і 7 гармонік в спектрі генерованому нелінійним навантаженням для прийнятих вище параметрів, зниження опору системи призведе до зсуву резонансної частоти в область більш високих частот і генерується навантаженням гармонік в напрузі мережі. АЧХ щодо затискачів КБ1 показують аналогічні результати.

У разі, якщо у всьому діапазоні потужності навантаження і компенсуючих пристроїв за допомогою зміни опору системи (зміщення резонансної частоти) не вдається знизити перевантаження КБ струмами вищих гармонік, тоді необхідно встановити антигармонічний реактор для забезпечення індуктивного режиму на найменшій з вищих гармонік, що генеруються. Ступінь перевантаження КБ із застосуванням антигармонічного реактора при ДГНН і ДГПС для різних гармонік ($v = \dots$) та представлені на рис. 4.20 - 4.21.

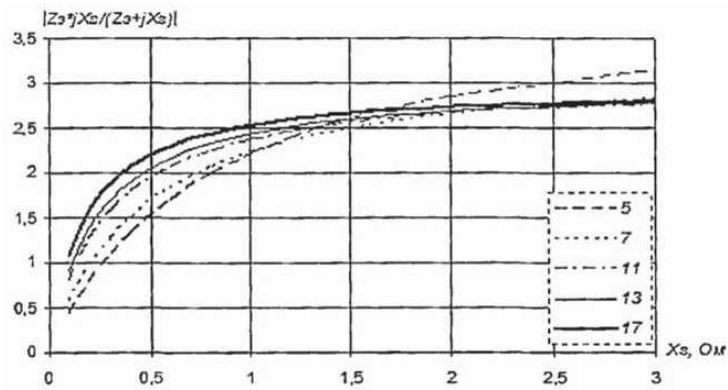


Рис. 4.20. Перевантаження КБ2 в залежності від X_s із застосуванням антигармонічного реактора при ДГНН

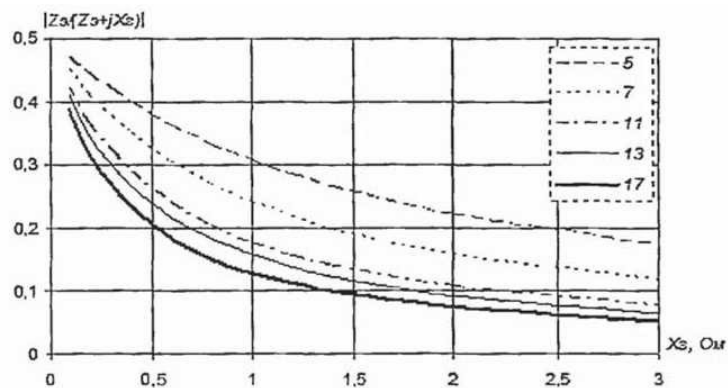


Рис. 4.21. Перевантаження КБ2 в залежності від X_s із застосуванням антигармонічного реактора при ДГПС

На рис. 4.20 АЧХ представлені відношенням на різних гармоніках напруги на КБ до струму нелінійного навантаження при наявності тільки ДГНН. Очевидно, що це співвідношення буде характеризувати ступінь перевантаження КБ. Аналогічно, ступінь перевантаження КБ при наявності ДГПС буде характеризуватися відношенням напруги на КБ до вхідної напруги мережі на різних гармоніках (рис. 4.21).

З графіків випливає, що зменшення X_s при наявності гармонік з боку нелінійного навантаження підприємства призводить до зниження перевантаження на КБ, як і збільшення X_s при наявності гармонік з боку мережі живлення. При цьому відсутні резонансні явища, що генеруються на гармоніках нелінійним навантаженням. Це підтверджує висновок, наведений раніше, про те, що при наявності вищих гармонік з боку живильної мережі слід

збільшувати опір системи, а при виникненні гармонік з боку нелінійного навантаження на підприємстві - зменшувати.

4.4. Структура додаткових пристроїв системи компенсації реактивної потужності

На підставі результатів досліджень, представлених в розділі 4, розроблена структура розміщення додаткових пристроїв (рис. 4.22), що дозволяють забезпечити відповідність $K_{пер}$ КБ нормативному значенню за умови забезпечення електромагнітної сумісності роботи електрообладнання. В якості додаткових пристроїв можуть бути використані реактори, установки поздовжньої компенсації (УПК), фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКУ) і активні фільтри (АФ).

На першому етапі необхідно задати узагальнену принципову однолінійну схему мережі і відповідну їй узагальнену схему заміщення для розрахунку і прогнозування перевантаження, що компенсують. Аналіз факторів виникнення вищих гармонік дозволяє визначити джерело гармонік і природу їх виникнення.

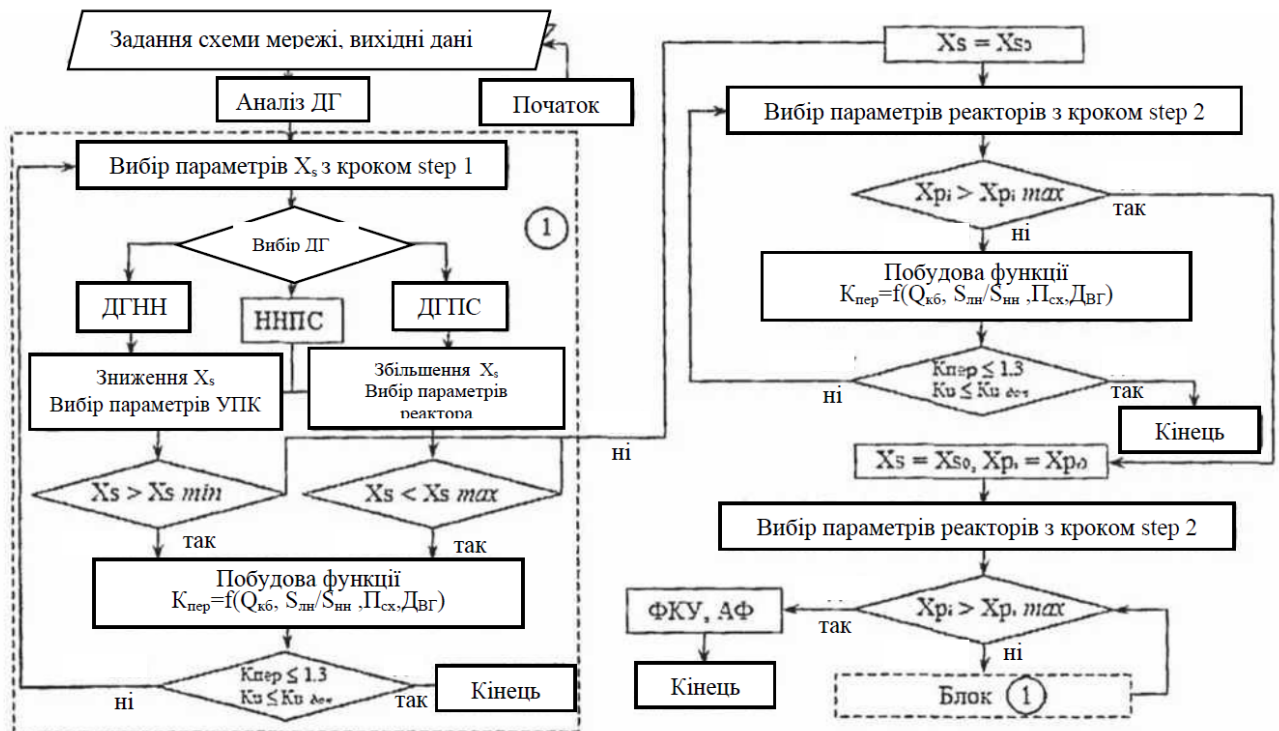


Рис. 4.22. Структура додаткових пристроїв системи КРП, step - фіксований крок зміни параметрів

Залежно від ДВГ в мережі розміщують додаткові пристрої, що дозволяють знизити перевантаження КБ струмами вищих гармонік.

Вибір параметрів цих пристроїв проводиться на основі висновків, представлених в розділі 4.2. У разі недостатньої компенсації вищих гармонік на КБ за допомогою додаткових реакторів і УПК слід застосовувати ФКУ і АФ.

Висновки до розділу 4

У розділі 4 наведені результати досліджень щодо зниження рівня вищих гармонік на конденсаторах до допустимих меж шляхом розміщення в мережі додаткових пристроїв. Встановлено, що при різному поєднанні електричного навантаження, що містить джерела вищих гармонік, можна підібрати місце підключення і параметри додаткових пристроїв таким чином, що струми на КБ зменшаться до нормативних значень.

Визначено, що структура розміщення додаткових пристроїв залежить від умов виникнення вищих гармонік. Так, в разі переважання вищих гармонік з боку зовнішнього джерела щодо вводу підприємства, вибирається реактор на вході мережі. У разі переважання вищих гармонік з боку нелінійного навантаження самого підприємства вибираються пристрої, що зменшують опір мережі. У разі сумірного впливу вищих гармонік з боку ДГПС і ДГНН необхідно вирішувати варіаційну задачу із зміні опору системи з урахуванням ступеня впливу ІГ.

Встановлено, що вибір параметрів додатково розміщених в мережі пристроїв слід проводити при мінімально можливій потужності КБ і відповідної їй потужності навантаження.

Розроблено структуру розміщення в мережі додаткових пристроїв, що дозволяють знизити рівень гармонійних спотворень на конденсаторах до нормативних значень.

РОЗДІЛ 5. СТРУКТУРА СИСТЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗА НАЯВНОСТІ ВИЩИХ ГАРМОНІК

5.1. Розробка структури системи компенсації реактивної потужності при наявності спотворень струму і напруги

У розділах 3 і 4 розглянуті способи зниження впливу вищих гармонік на роботу КБ, розроблені алгоритми вибору потужності КБ в умовах наявності спотворень і структура розміщення в мережі додаткових пристроїв, що дозволяють забезпечити відсутність перевантажень в мережі від вищих гармонік.

Як критерій вибору додаткових пристроїв були обрані капітальні витрати на електрообладнання за умови забезпечення нормативних показників функціонування КБ і електромагнітної сумісності роботи електрообладнання. Капітальні витрати є об'єктивним показником ефективності при порівнянні різних варіантів обладнання.

При виборі способу варіювання потужності компенсуючих пристроїв в залежності від параметрів мережі і навантаження, витрати виникають тільки в тому випадку, якщо необхідно збільшувати потужність конденсаторної установки. Однак, в цьому випадку відбувається перекомпенсація реактивної потужності, що призводить до збільшення сумарних втрат потужності і енергії в електричній мережі. Тому в разі вибору такої потужності КБ, при якій не виникає перевантаження на конденсаторах, витрати відсутні.

Капітальні витрати при зміні опору системи визначаються вартістю додатково встановленого обладнання. Так, у разі збільшення опору системи, необхідно встановити реактор на вході мережі підприємства. Вартість такого реактора значно нижче, ніж пристроїв поздовжньої компенсації, ФКУ і АФ. При установці ФКУ для кожного порядку гармонік потрібен окремий фільтр, що налаштований на цю гармоніку. Як правило, встановлюються декілька фільтрів, що призводить до збільшення вартості обладнання. Активні фільтри - дороге устаткування, до їх складу входить значна кількість електронних і напівпровідникових компонентів, конденсаторів і інших елементів. Також в

даний час відсутні конструкції активних фільтрів, що задовольняють умови їх роботи в мережах 6-10 кВ.

Додатково розміщуються в електричній мережі підприємства реактори, що забезпечують зниження рівня вищих гармонік на конденсаторах, також не перевищують рівень витрат при установці ФКУ і АФ. Так, наприклад, вартість антирезонансних реакторів не перевищує кілька тисяч гривень, в свою чергу, вартість ФКУ на порядок вище, і досягає сотень тисяч гривень в разі встановлення окремого фільтра, а при установці декількох фільтрів їх вартість відповідно збільшується. Активні фільтри - найбільш сучасний пристрій, їх вартість досягає сотень тисяч гривень.

Таким чином, встановлено, що найпростішою конфігурацією засобів зниження рівня вищих гармонік на конденсаторах є підбір потужності КБ. У цьому випадку витрати мінімальні. Виходячи з вищесказаного, послідовність підбору додаткових пристроїв визначена як: вибір потужності КБ; варіювання опору системи; спільна зміна потужності КБ і опору системи; розміщення додаткових реакторів; установка додаткових реакторів з варіюванням потужності КБ і опору системи; застосування ФКУ і активних фільтрів.

Грунтуючись на результатах досліджень, представлених в 3 і 4 розділах і з огляду на запропоновану послідовність відбору додаткових пристроїв, була створена структура системи КРП при різних умовах виникнення гармонійних спотворень в напрузі і струмі, представлена на рис. 5.1.

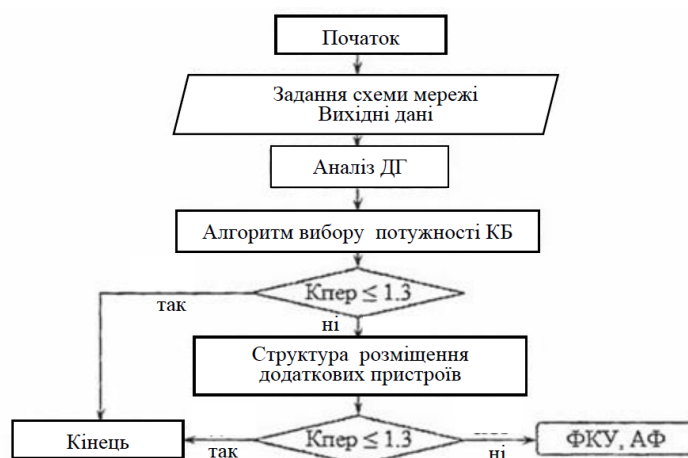


Рис. 5.1. Структура системи КРП при наявності вищих гармонік

1. Визначається джерело вищих гармонік. При наявності вищих гармонік з боку енергосистеми і з боку приймача визначається ступінь їх впливу на КБ (розділ 2.3.2);

2. Проводиться вибір потужності компенсуючих пристроїв з максимально можливим обмеженням впливу вищих гармонік до допустимих меж при забезпеченні максимального коефіцієнта потужності і допустимих рівнів напруги (глава 3);

3. Якщо вибір потужності компенсуючих пристроїв не дозволяє досягти бажаного результату, тоді:

3.1. У разі переважання вищих гармонік з боку джерела вибирається реактор на вході з мережі (розділ 4.1, 4.2);

3.2. У разі переважання вищих гармонік з боку приймача вибираються параметри пристрою, що зменшують опір мережі, а при недостатній його ефективності додатково вибираються реактори, розміщеня в мережі і параметри яких визначаються рішенням варіаційної задачі, за умови допустимих рівнів напруги (розділ 4.1, 4.2).

4. У разі сумірного впливу вищих гармонік з боку джерела і приймача, вирішується варіаційна задача за пунктами 3.1 і 3.2 з урахуванням ступеня впливу джерела гармонік;

5. У разі отримання незадовільних результатів після реалізації пунктів 2-4, повинні бути застосовані ФКУ або активні фільтри.

Розроблена структура КРП була підтверджена результатами розрахункових досліджень, представлених нижче.

5.2 Моделювання електричної мережі при різних джерелах гармонійних спотворень

Характеристика електротехнічного комплексу підприємства

Розрахункові дослідження впливу вищих гармонік на роботу конденсаторних батарей, призначених для компенсації реактивної потужності, проводилися для підприємства, характеристики якого представлені нижче.

Електропостачання підприємства від енергосистеми здійснюється за допомогою двох понижуючих трансформаторних підстанцій 110/10 кВ. На території підприємства встановлено чотири понижувальних трансформатора потужністю 1000 кВА і номінальною напругою 10/0,4 кВ. Однолінійна узагальнена принципова схема електропостачання заводу представлена на рис. 5.2., де H - еквівалентна лінійне навантаження i -ої секції шин; KB_i - конденсаторні батареї компенсації реактивної потужності i -ої секції шин; II_i - еквівалентна нелінійна навантаження i -ої секції шин.

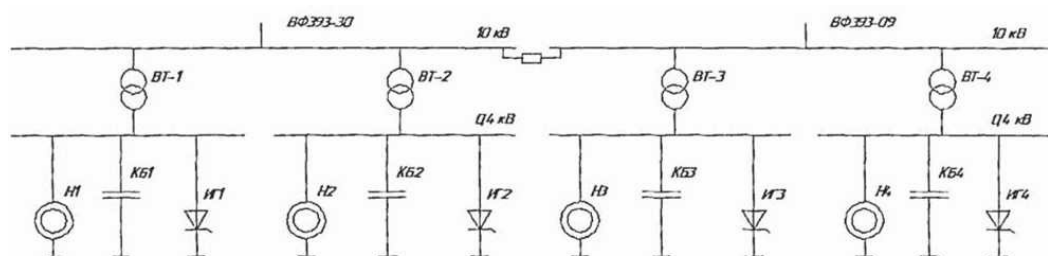


Рис. 5.3. Узагальнена однолінійна принципова схема електропостачання заводу

На кожній секції шин трансформаторної підстанції встановлені автоматичні установки компенсації реактивної потужності, призначені для автоматичного ступінчатого регулювання значення коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$): КБ-1, КБ-2, КБ-3, КБ-4. Управління компенсацією реактивної потужності здійснюється за допомогою регулятора Novar. Повне навантаження на секції шин змінюється протягом робочого дня, що супроводжується відповідною зміною реактивної потужності. Регулювання здійснюється за струмом навантаження [38].

Обчислення основної гармоніки активного і реактивного струму здійснюється алгоритмом FFT. Подібним способом обчислюється і величина основної гармоніки верхнього значення напруги, чим забезпечується висока точність вимірювання і регулювання і в умовах спотворення мережі вищими гармоніками.

До секції шин BT-3 підключено обладнання апаратного цеху. Окремі установки включають в свій склад частотні перетворювачі, частка яких

становить близько 30% від повної потужності на секції шин. Основне електричне навантаження на підприємстві - це асинхронні двигуни.

Навантаження на підприємстві має змінний характер. Струм в межах однієї секції шин змінюється від 400 до 1300 А. Конденсаторна батарея КБ-3 максимальною потужністю 600 квар має 12 ступенів регулювання.

Моделювання системи електропостачання при наявності вищих гармонік

Для підтвердження представлених раніше тези про вплив джерел вищих гармонік була створена імітаційна модель в системі Matlab Simulink [9, 41] (рис.5.3). Модель дозволяє провести моделювання двох різних ситуацій, які можуть виникати в електричній мережі по відношенню до джерела вищих гармонік.

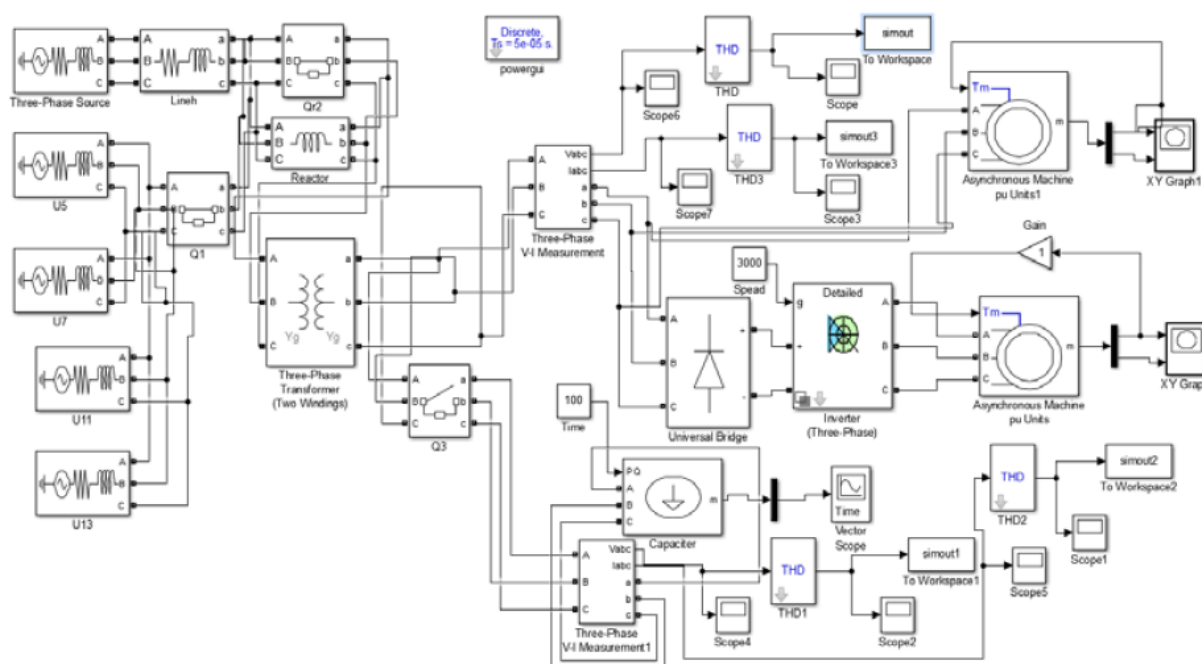


Рис. 5.3. - Імітаційна модель моделювання режимів в системі електропостачання підприємства при наявності джерел вищих гармонік в пакеті MATLAB / SIMULINK

У першому випадку аналізується ситуація, при якій джерелом вищих гармонік є перетворювач частоти з ШІМ. У моделі представлений трифазний

трансформатор, параметри якого визначалися за алгоритмом, наведеним у попередньому розділі.

У другому випадку моделюється ситуація, коли джерелом вищих гармонік є енергосистема (наприклад тягова підстанція, приєднана до трансформатора районної підстанції). Нелінійні спотворення з боку живильної мережі представлялися у вигляді паралельно з'єднаних джерел напруги з різними частотами. Схема дозволяє оцінювати рівень вищих гармонік в БК, яка моделюється у вигляді динамічного навантаження (Capacity), а також дослідити вплив реактора на стороні 10 кВ для зниження рівня вищих гармонік в мережі. Включення реактора проводиться за допомогою вимикача Q2.

Аналіз кривої напруги на наявність вищих гармонік проводиться за допомогою блоків Tree Phase V-I Measurement і THD з використанням швидкого розкладання Фур'є (FFT).

5.3. Аналіз роботи електричної мережі підприємства і вибір засобів зменшення перевантажень КБ

Аналіз даних про коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги за тривалий час показав, що найбільшого значення коефіцієнт досягає в разі, коли проводиться відключення більшої частини навантаження цеху (наприклад, для проведення технічного обслуговування і планового ремонту електроустаткування).

За результатами моделювання було встановлено, що при зменшенні струму, споживаного навантаженням підприємства, зростає рівень вищих гармонік на КБ. Для цього випадку отримані осцилограми струму на КБ і напруги на секції шин ТП, а також їх спектральний склад (рис. 5.7-5.10).

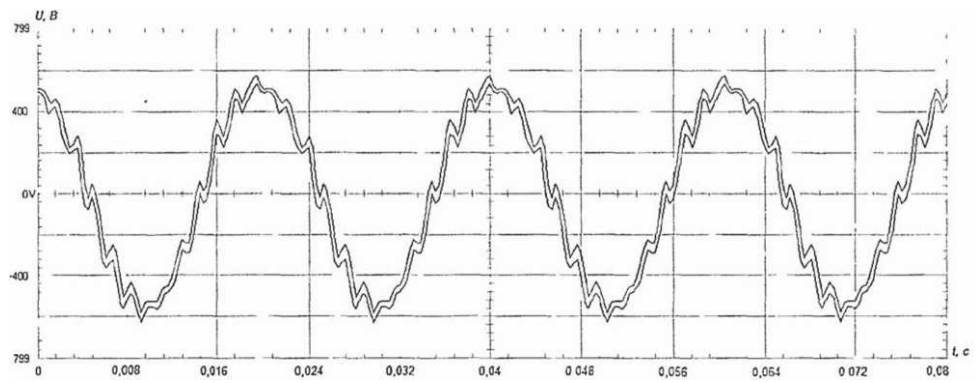


Рис. 5.7. Осцилограма напруги на секції шин ТП

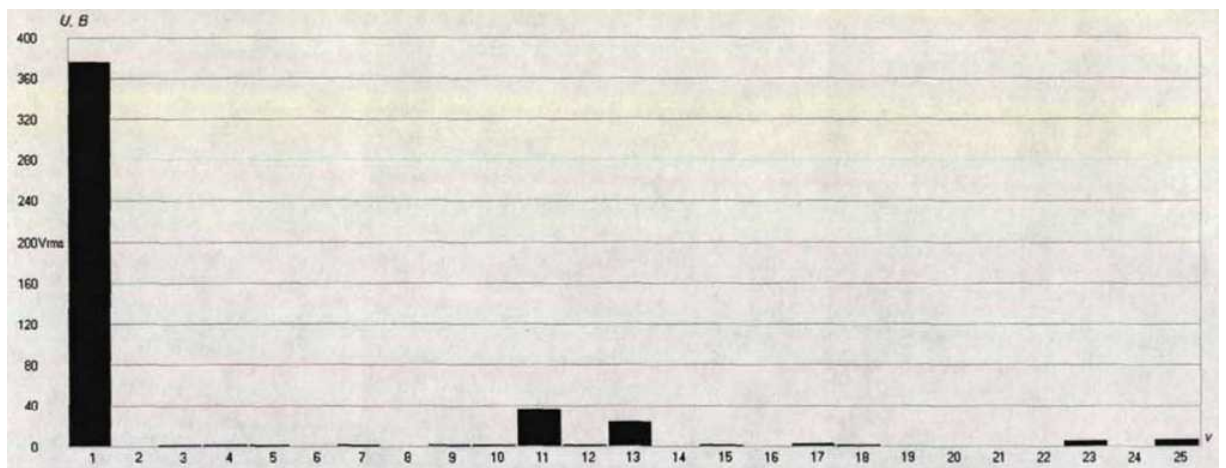


Рис. 5.8. Спектральний склад напруги на секції шин ТП

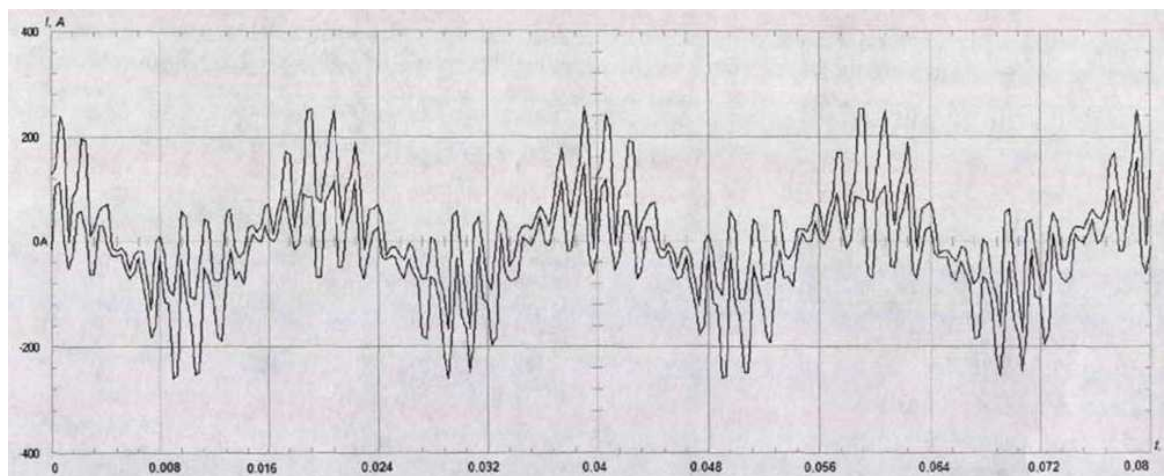


Рис. 5.9. Осцилограма струму на КБ

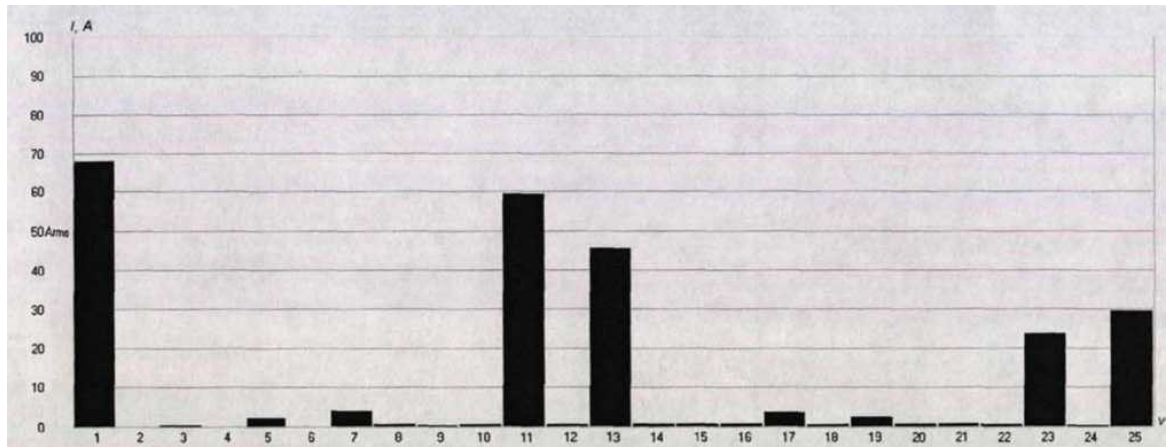


Рис. 5.10. Спектральний склад струму на КБ

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги становить близько 13%, що перевищує допустиме значення для мереж 0,4 кВ (8%). Перевантаження конденсаторних батарей досягає 70%. Також було визначено коефіцієнт потужності мережі з урахуванням спектрального складу напруги, отриманого експериментальним шляхом. Значення коефіцієнта потужності мережі становить 0,94.

Для побудови схеми заміщення електричної мережі підприємства необхідно визначити джерело вищих гармонік і фактори їх виникнення.

Розглянуто випадок, коли до однієї з секції шин 10 кВ підстанції 110/10 кВ також підключена навантаження тягової підстанції залізниці, потужність якої значно перевищує сумарну потужність навантаження підприємства.

Проводилось моделювання режиму електричної мережі підприємства при підключеній навантаженні тягової підстанції до секції шин 10 кВ районної ТП і її відсутності, зокрема моделювалося напруги і коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги на секції шин ТП (рис. 5.11, 5.12).

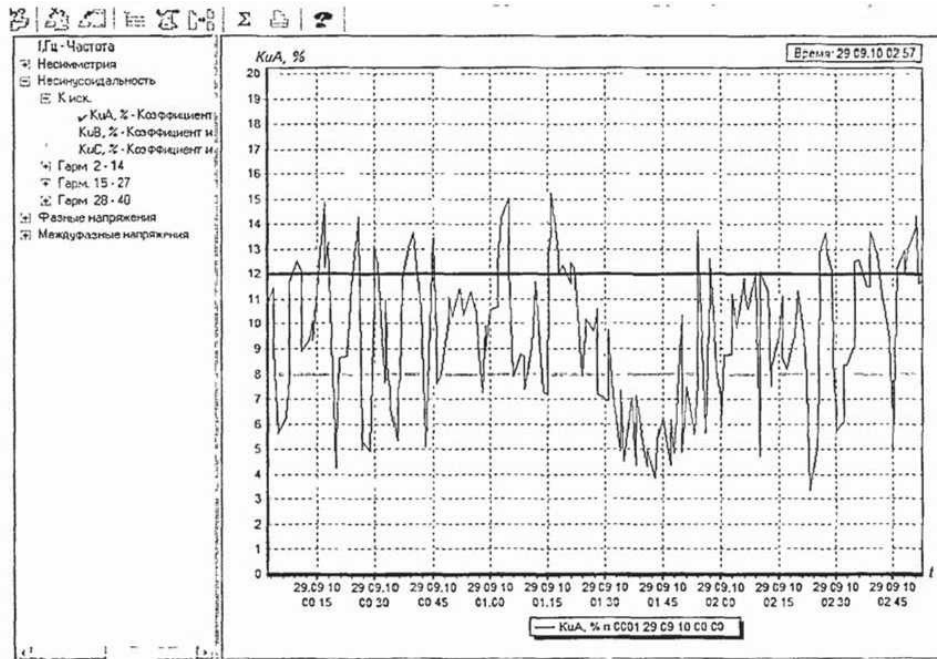


Рис. 5.11. Коэффициент спотворення синусоїдальності кривої напруги секції шин ТП при підключенні до секції шин 10 кВ навантаження тягової підстанції

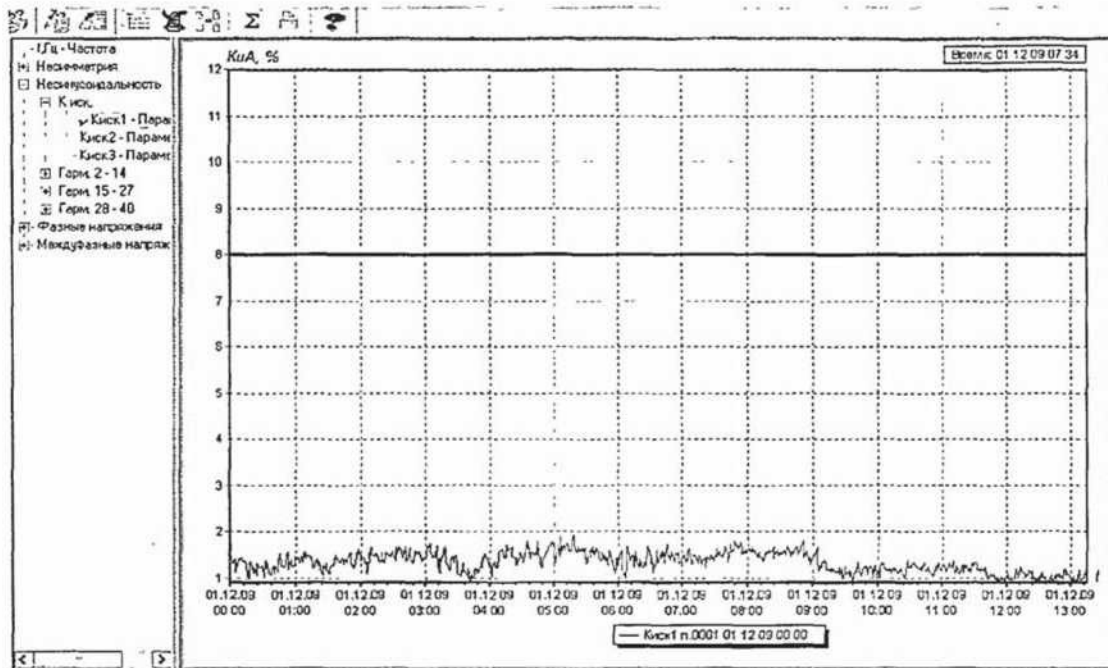


Рис. 5.12. Коэффициент спотворення синусоїдальності кривої напруги секції шин ТП при відсутності навантаження тягової підстанції

В результаті проведеного моделювання встановлено, що джерелом значної частини вищих гармонік є навантаження тягової підстанції. Наявність вищих

гармонік призводить до великих перевантажень по току конденсаторних батарей, що значно скорочує термін їх служби. При цьому, частотно-регульовані електроприводи, які підключені до секції шин ТП, вносять лише незначні спотворення до форми кривої напруги (коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги не перевищує 2% - рис. 5.12).

На підставі узагальненої принципової однолінійної схеми електропостачання підприємства і даних про джерело вищих гармонік була складена узагальнена схема заміщення, представлена на рис. 5.13.

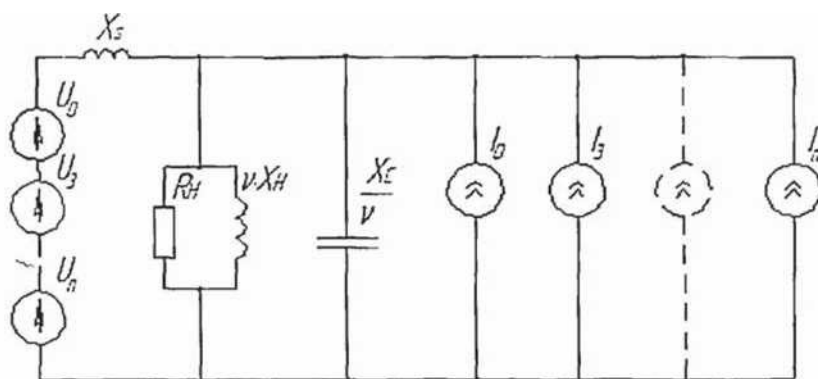


Рис. 5.13. Узагальнена схема заміщення навантаження на секції шин ТП

Електропостачання споживачів цеху, підключених до секції шин ТП здійснюється через двообмотковий трансформатор 10/0,4 кВ потужністю $S_{TH} = \dots$ А. Опір трансформатора і фідера $X_s = \dots$ м. Параметри навантаження: $R_n = \dots$ м, $X_n = \dots$ м.

З огляду на частотно-регульований електропривод, що приєднаний до секції шин, ВТ-3 вносить незначні спотворення в напругу живлення. Для розрахунку приймаємо, що КБ генерується реактивна потужність яка відповідає реактивній потужності, що споживається лінійним навантаженням $X_c = \dots$ м.

Для розрахунку даної схеми заміщення використовується метод накладення, при цьому для ν -ої гармоніки індуктивні опору збільшуються в ν -раз, а ємнісні - зменшуються в ν -раз. В результаті розрахунків визначаються струми через КБ для кожної гармоніки.

Розрахунки показали, що на конденсаторах виникає перевантаження за струмом від вищих гармонік, яке значно перевищує допустиму величину 30%. У такому випадку, за розробленою методикою вибору параметрів КРП спочатку необхідно підібрати таку потужність КБ залежно від опору системи, потужності навантаження і спектрального складу напруги на конденсаторах, при якій не виникає їх перевантаження струмами вищих гармонік і забезпечується максимальний коефіцієнт потужності мережі.

На основі схеми заміщення системи електропостачання підприємства з використанням представленої методики і параметрів навантаження побудована залежність коефіцієнта перевантаження КБ від потужності навантаження, опору системи і потужності компенсуючих (рис. 5.14).

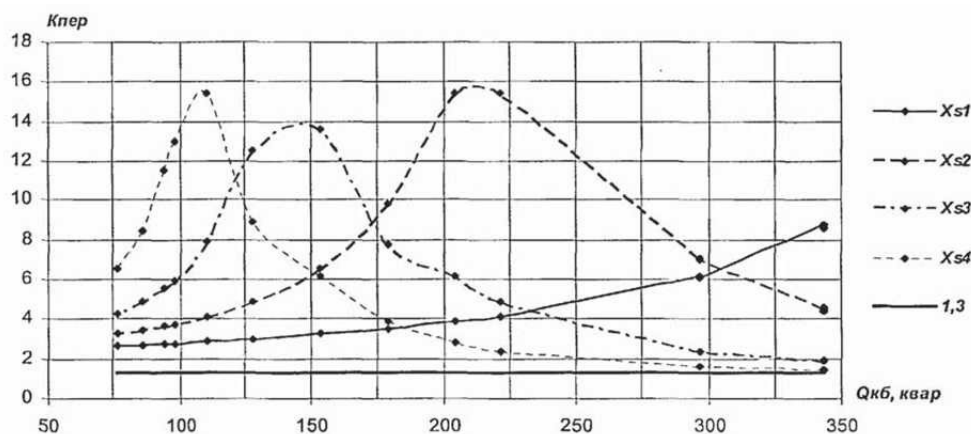


Рис. 5.14. Залежність коефіцієнта перевантаження КБ від величини компенсованої реактивної потужності пристроїв

З графіка випливає, що при заданому діапазоні зміни потужності навантаження і потужності КБ на секції шин ТП варіювання параметрів електричної мережі підприємства не призводить до зниження перевантаження конденсаторів до допустимих меж.

Таким чином встановлено, що при виборі потужності компенсуючих пристроїв не вдається досягти ефективної компенсації реактивної потужності без перевантажень в мережі від вищих гармонік.

Відповідно до розробленої структури системи компенсації реактивної потужності при наявності вищих гармонік на стороні ВН ТП необхідно розмістити реактор. На основі представленої методики розрахунку з використанням схеми заміщення була побудована залежність коефіцієнта перевантаження КБ від потужності компенсуючих пристроїв і опору системи (рис. 5.15), (X_{p1} - опір додатково розміщеного реактора на вході мережі підприємства) (розділ 4.1).

Шляхом варіювання опору реактора X_{p1} , були визначені параметри, які забезпечують відсутність перевантаження КБ струмами вищих гармонік ($X_p = m$).

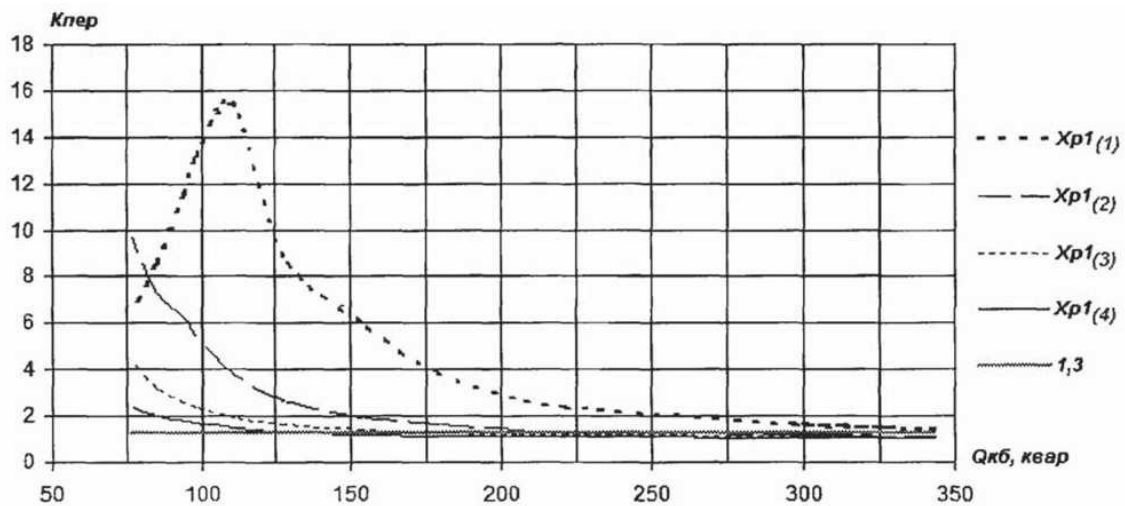


Рис. 5.15. Залежність коефіцієнта перевантаження КБ від величини реактивної потужності конденсаторної батареї при різних опорах реактора

Аналіз представлених графіків показав, що установка додаткового реактора в електричній мережі промислового підприємства дозволяє забезпечити відсутність перевантажень в мережі від вищих гармонік при підтримці рівнів напруги в електричній мережі підприємства в допустимих межах.

5.4. Моделювання режимів електричної мережі підприємства і порівняння їх з теоретичними результатами

За результатами теоретичних досліджень впливу вищих гармонік на КБ для досліджуваного підприємства і з використанням розробленої структури системи КРП при наявності гармонійних спотворень визначено спосіб, що дозволяє ефективно знизити перевантаження на конденсаторах від вищих гармонік. Для цього необхідно на виході трансформатора ТП встановити додатковий реактор, що дозволяє збільшити вхідний індуктивний опір.

Параметри реактора вибираються виходячи з таких умов:

1. Втрати напруги в мережі підприємства не повинні перевищувати 5% номінальної напруги мережі;
2. Коефіцієнт перевантаження КБ по току не повинен перевищувати допустимого $K_{пер1} < \dots$.

Так, за результатами теоретичних досліджень для зниження рівня вищих гармонік на конденсаторах до допустимих меж обраний реактор з індуктивним опором $X_p = \dots$ м. Втрати напруги в мережі і коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги в такому випадку не перевищують допустимих меж.

При рівних величинах коефіцієнта спотворення (мережа 10 кВ), прийнятого для розрахунку коефіцієнта перевантаження КБ-3 по схемі заміщення мережі підприємства і коефіцієнта спотворення, виміряного при моделюванні за допомогою моделі для порівняння теоретичних і експериментальних результатів після установки реактора на підстанції, а також рівність навантаження до і після установки реактора, отримані осцилограми струму на КБ і напруги на секції шин ТП (рис. 5.17 - 5.20).

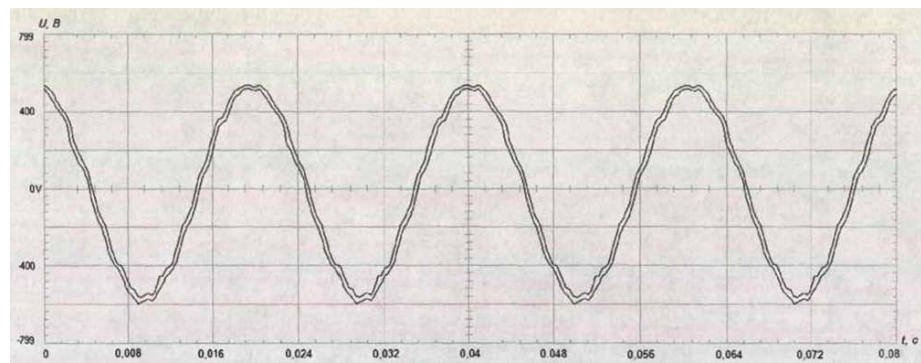


Рис. 5.17. Осцилограма напруги на секції шин 0,4 кВ після установки реактора

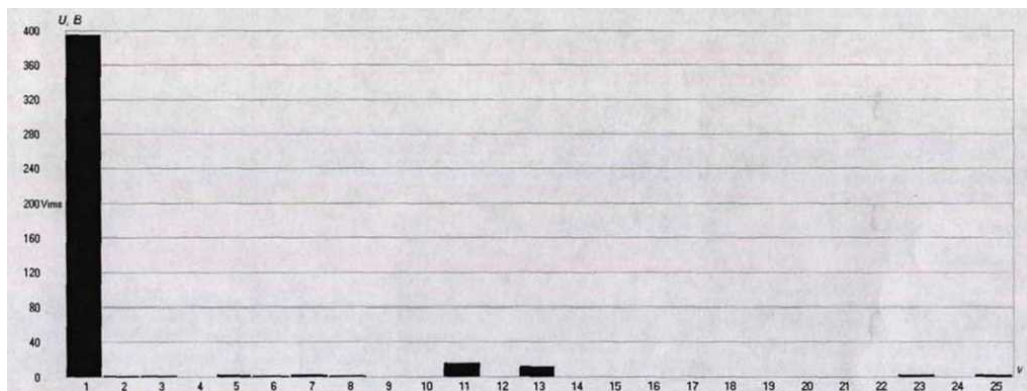


Рис. 5.18. Спектральний склад напруги на секції шин 0,4 кВ ТП після установки реактора

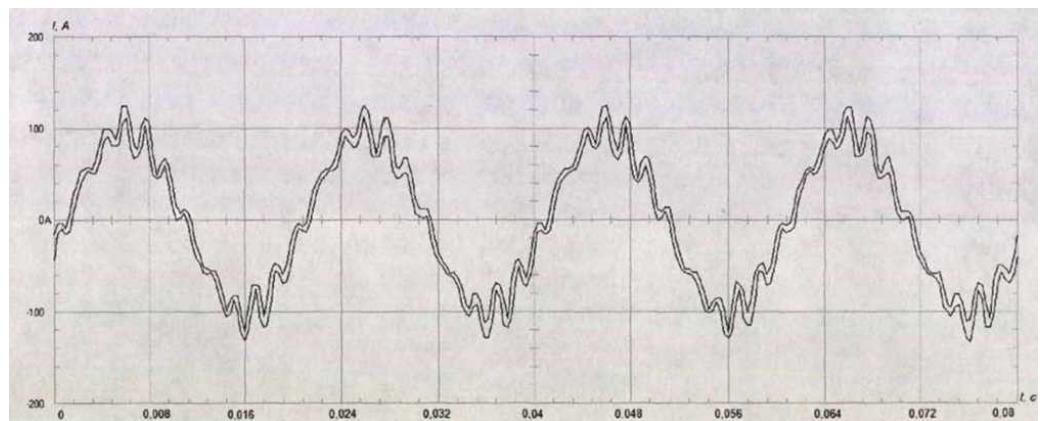


Рис. 5.19. Осцилограма струму на КБ після установки реактора

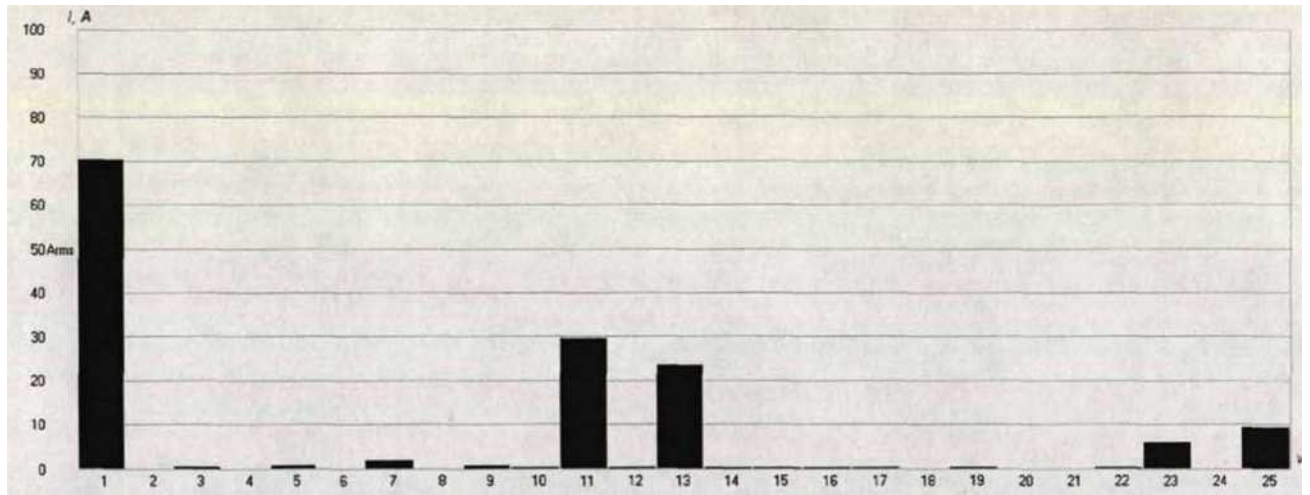


Рис. 5.20. Спектральний склад струму на КБ після установки реактора

В результаті моделювання встановлено, що установка реактора на стороні 10 кВ перед трансформатором ТП забезпечує коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги близько 5%, що входить в рамки допустимих ГОСТ значень. При цьому перевантаження КБ струмами вищих гармонік помітно знижується (близько 20%), а коефіцієнт потужності мережі становить - 0,97.

Таким чином, установка в електричній мережі досліджуваного підприємства додаткового реактора для зниження рівня гармонік в мережі і на конденсаторах дозволяє забезпечити необхідне підвищення коефіцієнта потужності мережі при режимі роботи КБ без перевантажень вищими гармоніками.

5.5. Оцінка зниження терміну служби КБ

Відповідно до методики розрахунку показників надійності пристроїв, що компенсують була визначена кратність зниження терміну служби конденсаторів для досліджуваного підприємства.

В результаті впливу вищих гармонік знижується термін служби електрообладнання підприємства: трансформаторів, асинхронних і синхронних електродвигунів, ліній електропередач. Однак основна увага при проведенні наукових досліджень приділяється саме зниженню впливу вищих гармонік на

конденсаторні установки компенсації реактивної потужності, тому розрахунок кратності зниження терміну служби наведено тільки для КБ.

Кратність зниження терміну служби конденсаторів:

$$\gamma = \exp\left(b \sum_{v=1}^{\infty} v U_v^2\right)$$

Для конденсаторів з паперовою ізоляцією $\theta \sim$ і $b =$, тоді $b \cdot$ = . Тому

$$\gamma = \exp\left(1,6 \sum_{v=1}^{\infty} v U_v^2\right)$$

У таблиці 5.1 представлені значення вимірних вищих гармонік напруги до і після установки додаткового індуктивного опору в мережі підприємства, а також розрахована за цими даними кратність зниження терміну служби КБ, де 1 - склад вищих гармонік до установки реактора, 2 - після установки реактора.

Таблиця 5.1 Склад вищих гармонік напруги до і після установки реактора і кратність зниження терміну служби КБ-3

№ п/п	U ₅	U ₇	U ₁₁	U ₁₃	U ₂₃	U ₂₅	γ
1	0,011	0,013	0,139	0,108	0,024	0,026	3,0
2	0,011	0,011	0,032	0,026	0,003	0,005	1,1

Таким чином, розрахунок кратності зниження терміну служби конденсаторних установок показав, що при проведенні заходів по зменшенню впливу вищих гармонік на КБ, термін служби конденсаторів наближається до паспортного. При відсутності таких заходів термін служби конденсаторів відносного паспортного знижується в 3 рази.

Висновки до розділу 5

На основі результатів досліджень, представлених в попередніх розділах, обґрунтована структура системи КРП при різних умовах виникнення гармонійних спотворень.

Представлена структура відображає послідовність дій, спрямована, в кінцевому рахунку, на вибір найбільш ефективного засобу придушення гармонік для забезпечення нормальних умов роботи КБ.

За допомогою моделювання режимів електричної мережі досліджуваного підприємства встановлено, що навіть при наявності власних джерел спотворень, найбільший вплив на перевантаження КБ має мережа живлення, коефіцієнт спотворення якої за напругою становить 13%. Це викликає перевантаження конденсаторів по току на 70%.

В результаті розрахунку обраний реактор, який підключається на вході живильної мережі в ТП. Індуктивний опір реактора 0,015 Ом, а опір мережі - 0,008 Ом.

В результаті моделювання встановлено, що при підключенні реактора коефіцієнт несинусоїдальності за напругою зменшується до величини 5%, а перевантаження КБ за струмом зменшується до 20%, що є допустимим за умовами ГОСТу.

Проведені розрахунки показали, що після установки реактора термін служби КБ підвищується і наближається до нормативного, що пояснюється зниженням рівня струмів вищих гармонік.

ВИСНОВКИ

У роботі дано рішення науково-технічної задачі, що полягає в обґрунтуванні структури системи КРП при різних умовах виникнення гармонійних спотворень напруги і струму, яка дозволить забезпечити підвищення коефіцієнта потужності в мережі при підтримці нормативної величини коефіцієнта перевантаження КБ струмами вищих гармонік і забезпечення електромагнітної сумісності роботи електротехнічного комплексу підприємства.

Основні результати магістерської роботи полягають в наступному:

1. Розроблено алгоритм формування схеми заміщення мережі для визначення режимів роботи і параметрів конденсаторних установок для різних джерел вищих гармонік.

2. Досліджено залежність коефіцієнта перевантаження конденсаторних батарей за струмом від потужності компенсуючих пристроїв, потужності лінійного і нелінійного навантаження, спектрального складу струму і напруги, параметрів електричної мережі, опору додаткових реакторів для різної природи виникнення вищих гармонік в електричній мережі підприємства при зміні потужності навантаження в межах від 5 до 50 МВА та опору електричної мережі від 0,1 до 1 Ом.

3. Розроблено способи зниження рівня вищих гармонік на установках КРП, що передбачають розміщенні в електричній мережі підприємства додаткових реакторів, а також зміна потужності КБ залежно від параметрів навантаження, мережі і спектрального складу струму і напруги на конденсаторах.

4. Розроблено структуру системи КРП при наявності джерел вищих гармонік як в енергосистемі, що живить підприємство, так і в електричній мережі самого підприємства. Формування структури передбачає: дослідження схеми електричної мережі підприємства для діапазону можливого варіювання навантаження підприємства; дослідження умов виникнення спотворень в напрузі і струмі і їх спектральний аналіз; порядок вибору засобів компенсації

вищих гармонік для системи компенсації реактивної потужності при використанні реактора.

5. Ефективність вибору структури системи КРП при наявності вищих гармонік в напрузі і струмі підтверджена моделюванням за допомогою пакета MATLAB/SIMULINK для промислового підприємства з нелінійним навантаженням і конденсаторними установками КРП. Відповідно до запропонованої структурою обраний додатковий реактор з опором 0,015 Ом, який підключається на стороні 10 кВ ТП підприємства. Застосування реактора забезпечило зниження коефіцієнта перевантаження КБ за струмом з 70% до допустимого значення 20%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамович Б.Н., Тарасов Д.М., Устинов Д.А., Сычев Ю.А. Проблемы контроля и компенсации гармонических искажений в сетях предприятий цветной металлургии II Цветные металлы. - 2008. - № 9. - С.90-94.
2. Абрамович Б.Н., Полищук В.В. Надежность систем электроснабжения: Учебное пособие / СПГГИ. - СПб, 1997. - 37 с.
3. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А. Электропривод и электроснабжение горных предприятий: Учебное пособие / СПГГИ. - СПб, 2004. - 84 с.
4. Агунов А.В. Статический компенсатор неактивных составляющих мощности с полной компенсацией гармонических составляющих тока нагрузки // Электротехника. - 2003. - № 2. - С.47-50.
5. Александров Г.Н. Статический тиристорный компенсатор на основе управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа // Электричество. - 2003. - № 2. - С.38-46.
6. Александров Г.Н. Управляемые реакторы: принцип действия, основные характеристики и перспективы использования в электрических сетях // Электротехника. - 2007. - № 4. - С. 14-22.
7. Арриллага Дж., Бредли Б., Боджер П. Гармоники в электрических системах. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 320 с.
8. Асафов Вагиф Назир оглы Разработка секционированной конденсаторной установки для сети горного предприятия с вентильной нагрузкой: дис. на соискание ученой степ. канд. техн. наук: 05.09.03. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1994.
9. Ахлюстин В.К. Электрификация обогатительных фабрик. — М.: Недра, 1973.-424 с.
10. Бабаев С.С. Способ коррекции электрических сигналов при искажениях напряжения сети // Электричество. - 2009. - № 3. - С.20-23.
11. Багаутинов Г.А., Марков Ю.А. Электропривод и электрификация приисков. — М.: Недра, 1989. - 303 с.

12. Баркан Я.Д. Автоматическое управление режимом батарей конденсаторов. - М.: Энергия, 1978. - 112 с.
13. Бартенев О.В. Фортран для профессионалов. Математическая библиотека 1М8Б. - М.: Диалог-МИФИ, 2000. - 372 с.
14. Блантер С.Г., Суд И.И. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности. -М.: Недра, 1980. -478 с.
15. Боровиков В.П. 81абзйса. Искусство анализа данных на компьютере. 2-е изд. - Спб: Питер, 2003. - 688 с.
16. Буреева Н.Н. Многомерный статистический анализ с использованием ППП «БТАЛБТГСА». — Нижний Новгород, 2007. — 112 с.
17. Бурман А.П., Виссарионов П.А. Основы современной энергетики. - М.: Изд-во МЭИ, 2003. - 454 с.
18. Волков А.В., Волков В.А. Компенсация мощности искажений и реактивной мощности посредством активного фильтра с прогнозируемым релейным управлением // Электротехника. - 2008. - № 3. - С.2-10.
19. Гриб О. Г., Сокол Е. И., Жаркин А. Ф. и др. Качество электрической энергии. В 2-х т. Т. 2. Контроль качества электрической энергии : монография; под ред. О. Г. Гриба. — Харьков : ПП «Граф-Ікс», 2014 г. — 244 с.
20. Глушков В.М., Грибин В.П. Компенсация реактивной мощности. - М.: Энергия, 1975. - 104 с.
21. Гриб О. Науково-технічні аспекти визначення відповідальності за порушення якості електричної енергії / О. Гриб, Г. Сендерович, П. Щербакова // Стандартизація. Сертифікація. Якість. - 2013. - № 6. - С. 48-55. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ssia_2013_6_14.
22. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
23. ГОСТ 1282-79 Конденсаторы для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока частоты 50 и 60 Гц.

24. Готман В.И., Маркман Г.З. Задачи обследования системы компенсации реактивной мощности // Промышленная энергетика. - 2006. - № 8. - С.50-55.
25. Грейсух М.В., Лазарев С.С. Расчеты по электроснабжению промышленных предприятий. - М.: Энергия 1977. - 312 с.
26. Дементьев Ю.А., Кочкин В.И., Мельников А.Г. Применение управляемых статических компенсирующих устройств в электрических сетях // Электричество. - 2003. — № 9. — С.2-10.
27. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы и основы эконометрики. - М.: МЭСИ, 2002. - 79 с.
28. Жак Куро Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении // Новости электротехники. - 2005. - № 1.
29. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 2000. - 252 с.
30. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 168 с.
31. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. - К.: Техника, 1981. - 160 с.
32. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 224 с.
33. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. - М.: Энергоатомиздат, 1981. - 200 с.
34. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. - М.: Энергоатомиздат, 1989. — 176 с.
35. Зевеке Г.В. Основы теории цепей. - 4-е изд., перераб. - М.: Энергия, 1975. - 752 с.

36. Ивакин В.Н., Магницкий А.А. Устройства продольной компенсации на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах // Электротехника. - 2008. - № 10. — С.47-56.
37. Ивакин В.Н., Магницкий А.А., Шульга Р.Н. Применение установок тиристорно-управляемой продольной компенсации на линиях электропередачи переменного тока // Электротехника. - 2006. - № 9. - С.42-49.
38. Ильяшов В.П. Конденсаторные установки промышленных предприятий. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 152 с.
39. Иньков Ю.М., Климат В.С., Светлаков Д.П. Компенсаторы неактивной энергии со стабилизацией напряжения трансформаторных подстанций // Электротехника. - 2007. - № 7. - С.34-37.
40. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. -488 с.
41. Калинина В.Н., Соловьев В.И. Введение в многомерный статистический анализ: Учебное пособие / ГУУ. - М., 2003. - 66 с.
42. Каминский Е.А. Звезда, треугольник, зигзаг. - М.: Энергоатомиздат, 1984. -104 с.
43. Карпов Ф.Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях промпредприятий. - М.: Энергия, 1975. - 184 с.
44. Кириенко В.П., Слсчченков М.Н. Комплексное устройство компенсации реактивной мощности и мощности искажения в системах питания с управляемыми выпрямителями // Электричество. - 2006. - № 11. - С.33-40.
45. Кирилловский В.С. Энергосбережение и компенсация реактивной мощности на шахтах // Горное оборудование и электромеханика. - 2006. - № 12. - С.37-39.
46. Князевский Б.А. Электроснабжение промышленных предприятий. - М.: Высш. шк., 1986. - 400 с.
47. Компенсация реактивной мощности - ключ к снижению энергопотребления // Технологии энергосбережения Сибири. - 2009. - С.2-13.

48. Константинов Б.А., Зайцев Г.З. Компенсация реактивной мощности. - Л.: Энергия, 1976. - 104 с.
49. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. - М.: Академия, 2004. - 320 с.
50. Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р. Современные способы компенсации реактивной мощности крупных металлургических приводов // Электромеханика. - 2009. - № 1. - С.28-31.
51. Кумаков Ю.В. Инверторы напряжения со ступенчатой модуляцией и активная фильтрация высших гармоник // Новости электротехники. - 2005. - № 6.
52. Кучинский Г.С., Назаров Н.И., Назарова Г.Т., Переселенцев И. Ф. Силовые электрические конденсаторы. - М.: Энергия, 1975. - 248 с.
53. Кучумов Л.А., Спиридонова Л.В. Потери мощности в электрических сетях и их взаимосвязь с качеством электроэнергии. - Л.: Изд-во ЛИИ, 1985. - 92 с.
54. Лурье М.С., Лурье О.М. Применение программы МАТЪАВ при изучении курса электротехники. - Красноярск: СибГТУ, 2006. - 208 с.
55. Максимов А.В., Паули В.К. Компенсация реактивной мощности актуальная задача энергосбережения // Электро. - 2009. - № 3. - С.7-10.
56. Минин Г.П. Несинусоидальные токи и их измерения. - М.: Энергия, 1979. - 112с.
57. Михайлов В.В. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. - М: Энергоатомиздат, 1992. - 150 с.
58. Михалков А.В. Что нужно знать о регулировании напряжения. - М.: Энергия, 1971. - 56 с.
59. Никифоров И.А. Статистический анализ геологических данных. - Оренбург: ОГУ, 2010. - 170 с.
60. Озерной М.И. Электрооборудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт. - М.: Недра, 1975. - 448 с.

61. Патент - 2237334 РФ. Способ защиты потребителей электроэнергии от воздействия высших гармонических составляющих/ Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Бош В.И., Довженко С.В., Липецкий государственный технический ун-т. - Заяв. 24.08.2005; Оpubл. 20.02.2007, Бюл. № 12.

62. Патент - 2354025 РФ. Способ компенсации высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети / Абрамович Б.Н., Полищук В.В., Сычев Ю.А.; Санкт-Петербургский государственный, горный ин-т. - Заяв. 04.05.2008; Оpubл. 27.04.2009, Бюл. № 12.

63. Плющ Б.М., Ройтман М.В., Саркисян В.О. Электрооборудование нефтяных и газовых промыслов. - М.: Недра, 1965. - 312 с.

64. Пронин М.В. Активные фильтры высших гармоник. Направления развития // Новости электротехники. - 2006. - № 2.

65. Розанов Ю.К., Гринберг Р.П. Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения // Электротехника. - 2006. - № 10. - С. 55-60.

66. Самохин Ф.И., Маврицын А.М., Бухтояров В.Ф. Электрооборудование и электроснабжение открытых горных работ. — М.: Недра, 1988.-367 с.

67. Сапунов М.В. Вопросы качества электрической энергии // Новости электротехники. - 2001. - № 4.

68. Скамьин А.Н. Повышение эффективности функционирования конденсаторных батарей в электрической сети горного предприятия // Сб. Записки Горного института. - 2011. - том 189. - С. 107-110.

69. Тамазов А.И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками. - М.: Изд-во «Транспорт», 1965. - 234 с.

70. Халафян А.А. Статистический анализ данных. 3-е изд. - М.: ООО «Бином- пресс», 2007. - 512 с.

71. Хачатурян В.А. Управление электроснабжением нефтеперерабатывающих предприятий в условиях массового применения регулируемого электропривода. - Спб, 2002. - 64 с.

72. Чаплыгин Е.Е., Ковырзина О.С. Компенсация неактивных составляющих полной мощности дуговых сталеплавильных печей // Электричество. - 2009. - № 11.-С.30-37.

73. Черепанов В.В. Методика анализа несинусоидальных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий // Электротехника. - 1989. - № 17.

74. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в МАТЬАВ, 81шРошег8уз1ет8, БтшНпк. - СПб.: Изд-во ДМК Пресс, 2008. - 290 с.

75. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. - М.: Недра, 1980.-575 с.

76. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. - Киев: Наук, думка, 1985. - 268 с.

77. Шидловський А.К., Жежеленко І.В., Півняк Г.Г. та ін. Електромагнітна сумісність споживачів. — М .: Машинобудування, 2012. — 351 с.

78. Шклярский Я.Э. Управление потоками реактивной мощности на горных предприятиях. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. - 94 с.

79. Шклярский Я.Э., Ситников Д.А., Скамьин А.Н. Уменьшение влияния высших гармоник на работу электротехнического комплекса горного предприятия // Сб. Записки Горного института. - 2008. - том 178. - С. 162-165.

80. Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н. Способы уменьшения влияния высших гармоник на работу электрооборудования // Сб. Записки Горного института. — 2011.-том 189. -С.121-124.

81. IEEE Std 519-1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.

82. David Chapman Harmonics: Causes and effects // Power quality application guide, March 2001. 13p.

83. Mark Stephens Power quality in continuous manufacturing // EPRI Solutions, winter 2006. 2p.

84. Skamyin A.N. Automatic neutralization of high harmonics in electric circuits of metallurgical enterprises / Y.E. Shklyarsky, A.N. Skamyin, V.N. Lebedik, A.I. Mikheyev // «CIS Iron and Steel Review». Издательский дом «Руда и металлы». - 2008. - p.38-40.

85. Stefan Fassbinder, Deutsches Kupferinstitut Harmonics: Passive filters // Power quality application guide, June 2003. 9p.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Параметри схеми заміщення

№	Обозначение	Мін значення, Ом	Мах значення, Ом
1	X_S	1	0,1
2	$R_{л1}$	1	0,1
3	$X_{л1}$	0,35	0,035
4	R_{m1}	0,37	0,037
5	X_{m1}	1,97	0,2
6	$R_{н1}$	45	4,5
7	$X_{н1}$	60	6
8	$X_{с1}$	60	6
9	$R_{л2}$	1	0,1
10	$X_{л2}$	0,35	0,035
11	R_{m2}	0,37	0,037
12	X_{m2}	1,97	0,2
13	$R_{н2}$	45	4,5
14	$X_{н2}$	60	6
15	$R_{л3}$	1	0,1
16	$X_{л3}$	0,35	0,035
17	$R_{н3}$	22,5	2,25
18	$X_{н3}$	30	3
19	$X_{с2}$	20	2

ДОДАТОК Б

Вибірка спостережень для проведення регресійного аналізу

Xs	Rл1	Xл1	Rм1	Xм1	Rл2	Xл2	Rм2	Xм2	Rл3	Xл3	Rн1	Xн1	Xс1	Rн2	Xн2	Rн3	Xн3	Xс2	Iv
1	1,00	0,35	0,37	1,97	1,00	0,35	0,37	1,97	0,71	0,25	45,0	0,191	0,0000531	64,3	0,273	32,1	0,136	0,0001115	86,6
1	1,00	0,35	0,37	1,97	1,59	0,56	0,66	3,07	1,00	0,35	45,0	0,191	0,0000531	90,0	0,382	45,0	0,191	0,0000796	144,3
1	1,00	0,35	0,37	1,97	2,50	0,88	1,21	4,80	1,25	0,44	45,0	0,191	0,0000531	112,5	0,478	56,3	0,239	0,0000637	173,2
1	1,00	0,35	0,37	1,97	3,33	1,17	1,21	4,80	1,67	0,58	45,0	0,191	0,0000531	150,0	0,637	75,0	0,318	0,0000478	202,1
1	1,00	0,35	0,37	1,97	1,00	0,35	0,37	1,97	0,71	0,25	64,3	0,273	0,0000372	64,3	0,273	32,1	0,136	0,0001115	115,5
1	1,00	0,35	0,37	1,97	1,59	0,56	0,66	3,07	1,00	0,35	90,0	0,382	0,0000265	90,0	0,382	45,0	0,191	0,0000796	192,5
1	1,00	0,35	0,37	1,97	2,50	0,88	1,21	4,80	1,25	0,44	112,5	0,478	0,0000212	112,5	0,478	56,3	0,239	0,0000637	230,9
1	1,00	0,35	0,37	1,97	3,33	1,17	1,21	4,80	1,67	0,58	150,0	0,637	0,0000159	150,0	0,637	75,0	0,318	0,0000478	269,4
1	1,00	0,35	0,37	1,97	2,50	0,88	1,21	4,80	1,25	0,44	45,0	0,191	0,0000531	112,5	0,478	56,3	0,239	0,0000637	173,2
1	1,00	0,35	0,37	1,97	3,33	1,17	1,21	4,80	1,67	0,58	45,0	0,191	0,0000531	150,0	0,637	75,0	0,318	0,0000478	202,1
1	1,00	0,35	0,37	1,97	2,50	0,88	1,21	4,80	1,25	0,44	112,5	0,478	0,0000212	112,5	0,478	56,3	0,239	0,0000637	230,9
1	1,00	0,35	0,37	1,97	3,33	1,17	1,21	4,80	1,67	0,58	150,0	0,637	0,0000159	150,0	0,637	75,0	0,318	0,0000478	269,4
0,8	1,00	0,35	0,37	1,97	1,00	0,35	0,37	1,97	0,71	0,25	45,0	0,191	0,0000531	64,3	0,273	32,1	0,136	0,0001115	86,6
0,8	1,00	0,35	0,37	1,97	1,59	0,56	0,66	3,07	1,00	0,35	45,0	0,191	0,0000531	90,0	0,382	45,0	0,191	0,0000796	144,3
0,8	1,00	0,35	0,37	1,97	2,50	0,88	1,21	4,80	1,25	0,44	45,0	0,191	0,0000531	112,5	0,478	56,3	0,239	0,0000637	173,2
0,8	1,00	0,35	0,37	1,97	3,33	1,17	1,21	4,80	1,67	0,58	45,0	0,191	0,0000531	150,0	0,637	75,0	0,318	0,0000478	202,1
0,8	1,00	0,35	0,37	1,97	1,00	0,35	0,37	1,97	0,71	0,25	64,3	0,273	0,0000372	64,3	0,273	32,1	0,136	0,0001115	115,5
0,8	1,00	0,35	0,37	1,97	1,59	0,56	0,66	3,07	1,00	0,35	90,0	0,382	0,0000265	90,0	0,382	45,0	0,191	0,0000796	192,5
0,8	1,00	0,35	0,37	1,97	2,50	0,88	1,21	4,80	1,25	0,44	112,5	0,478	0,0000212	112,5	0,478	56,3	0,239	0,0000637	230,9
0,8	1,00	0,35	0,37	1,97	3,33	1,17	1,21	4,80	1,67	0,58	150,0	0,637	0,0000159	150,0	0,637	75,0	0,318	0,0000478	269,4
0,8	1,00	0,35	0,37	1,97	2,50	0,88	1,21	4,80	1,25	0,44	45,0	0,191	0,0000531	112,5	0,478	56,3	0,239	0,0000637	173,2
0,8	1,00	0,35	0,37	1,97	3,33	1,17	1,21	4,80	1,67	0,58	45,0	0,191	0,0000531	150,0	0,637	75,0	0,318	0,0000478	202,1
0,8	1,00	0,35	0,37	1,97	2,50	0,88	1,21	4,80	1,25	0,44	112,5	0,478	0,0000212	112,5	0,478	56,3	0,239	0,0000637	230,9
0,8	1,00	0,35	0,37	1,97	3,33	1,17	1,21	4,80	1,67	0,58	150,0	0,637	0,0000159	150,0	0,637	75,0	0,318	0,0000478	269,4
0,2	0,10	0,04	0,04	0,20	0,10	0,04	0,04	0,20	0,07	0,03	4,5	0,019	0,0005308	6,4	0,027	3,2	0,014	0,0011146	866,0
0,2	0,10	0,04	0,04	0,20	0,16	0,06	0,07	0,31	0,10	0,04	4,5	0,019	0,0005308	9,0	0,038	4,5	0,019	0,0007962	1443,4
0,2	0,10	0,04	0,04	0,20	0,25	0,09	0,12	0,48	0,13	0,04	4,5	0,019	0,0005308	11,3	0,048	5,6	0,024	0,0006369	1732,1
0,2	0,10	0,04	0,04	0,20	0,33	0,12	0,12	0,48	0,17	0,06	4,5	0,019	0,0005308	15,0	0,064	7,5	0,032	0,0004777	2020,7
0,2	0,10	0,04	0,04	0,20	0,10	0,04	0,04	0,20	0,07	0,03	6,4	0,027	0,0003715	6,4	0,027	3,2	0,014	0,0011146	1154,7
0,2	0,10	0,04	0,04	0,20	0,16	0,06	0,07	0,31	0,10	0,04	9,0	0,038	0,0002654	9,0	0,038	4,5	0,019	0,0007962	1924,5
0,2	0,10	0,04	0,04	0,20	0,25	0,09	0,12	0,48	0,13	0,04	11,3	0,048	0,0002123	11,3	0,048	5,6	0,024	0,0006369	2309,4
0,2	0,10	0,04	0,04	0,20	0,33	0,12	0,12	0,48	0,17	0,06	15,0	0,064	0,0001592	15,0	0,064	7,5	0,032	0,0004777	2694,3
0,2	0,10	0,04	0,04	0,20	0,25	0,09	0,12	0,48	0,13	0,04	4,5	0,019	0,0005308	11,3	0,048	5,6	0,024	0,0006369	1732,1
0,2	0,10	0,04	0,04	0,20	0,33	0,12	0,12	0,48	0,17	0,06	4,5	0,019	0,0005308	15,0	0,064	7,5	0,032	0,0004777	2020,7
0,2	0,10	0,04	0,04	0,20	0,25	0,09	0,12	0,48	0,13	0,04	11,3	0,048	0,0002123	11,3	0,048	5,6	0,024	0,0006369	2309,4
0,2	0,10	0,04	0,04	0,20	0,33	0,12	0,12	0,48	0,17	0,06	15,0	0,064	0,0001592	15,0	0,064	7,5	0,032	0,0004777	2694,3

ДОДАТОК В

Програма вибору потужності КБ

```
ZV(K)=Z(1)+(K-1)*HZ
END DO
CALL
BS3GD(0,0,0,NXV,XV,NYV,YV,NZV,ZV,XORD,YORD,ZORD,XKN,YKN,ZKN,NX,NY,NZ,C,V,NXV,NYV)
PRINT *,C
OPEN(3,FILE='C:\MSDEV\FPS[3]\TEXT\3vivod.dat',STATUS='REPLACE')
WRITE(3,'(13X,A,14X,A,10X,A,16X,A)' 'X','Y','Z','PER')
DO I=1,NXV
  DO J=1,NYV
    DO K=1,NZV
      IF (V(I,J,K)<1.3) THEN
        WRITE(3,'(4F15.3)' XV(I),YV(J),ZV(K),V(I,J,K))
      END IF
    END DO
  END DO
END DO
OPEN(4,FILE='C:\MSDEV\FPS[3]\TEXT\3vivod1.dat',STATUS='REPLACE')

WRITE(4,'(10X,A)' 'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ')
WRITE(4,'(10X,A,5X50F10.1)' 'XY',(Y(J),J=1,NY)
DO I=1,NX
  WRITE(4,'(5X,F11.3,50F10.3)' X(I),(U(I,J,K),J=1,NY)
END DO

WRITE(4,'(10X,A)' 'РЕЗУЛЬТАТЫ СЧЕТА')
WRITE(4,'(10X,A,5X50F10.1)' 'XY',(YV(J),J=1,NYV)
DO I=1,NXV
  WRITE(4,'(5X,F11.3,50F10.3)' XV(I),(V(I,J,K),J=1,NYV)
END DO

CLOSE(2)
CLOSE(3)
CLOSE(4)
DEALLOCATE(X,Y,Z,XV,YV,ZV,XKN,YKN,ZKN,U,C)

CONTAINS
SUBROUTINE Noread(Unit,CH)
  INTEGER,INTENT(IN) :: Unit
  CHARACTER,INTENT(IN) :: CH
  CHARACTER :: C
  DO
10 READ(Unit,'(A)',ADVANCE='NO',EOR=10) C;
  IF (C==CH) EXIT
  END DO
END SUBROUTINE Noread
END PROGRAM SPL
```

ДОДАТОК Г

Таблиця обраних параметрів навантаження, мережі і КБ за коефіцієнтом перевантаження і коефіцієнтом потужності

Xs, Ом	Qкб, вар	Pн, Вт	Qн, вар	К пер	К мощн
0,2	300000	1750000	1225000	1,070	0,874
0,2	300000	2625000	1837500	1,069	0,853
0,2	300000	3500000	2450000	1,065	0,842
0,2	300000	4375000	3062500	1,065	0,836
0,2	300000	5250000	3675000	1,060	0,831
0,2	300000	6125000	4287500	1,058	0,828
0,2	300000	7000000	4900000	1,060	0,820
0,2	600000	1750000	1225000	1,090	0,932
0,2	600000	2625000	1837500	1,087	0,895
0,2	600000	3500000	2450000	1,084	0,874
0,2	600000	4375000	3062500	1,084	0,861
0,2	600000	5250000	3675000	1,076	0,853
0,2	600000	6125000	4287500	1,074	0,847
0,2	600000	7000000	4900000	1,077	0,839
0,2	900000	1750000	1225000	1,122	0,963
0,2	900000	2625000	1837500	1,119	0,932
0,2	900000	3500000	2450000	1,113	0,904
0,2	900000	4375000	3062500	1,115	0,886
0,2	900000	5250000	3675000	1,103	0,874
0,2	900000	6125000	4287500	1,099	0,865
0,2	900000	7000000	4900000	1,104	0,858
0,2	1200000	1750000	1225000	1,192	0,980
0,2	1200000	2625000	1837500	1,185	0,952
0,2	1200000	3500000	2450000	1,172	0,932
0,2	1200000	4375000	3062500	1,174	0,910
0,2	1200000	5250000	3675000	1,153	0,895
0,2	1200000	6125000	4287500	1,144	0,883
0,2	1500000	3500000	2450000	1,294	0,945
0,2	1500000	5250000	3675000	1,288	0,904
0,2	1500000	6125000	4287500	1,254	0,890
0,2	1500000	7000000	4900000	1,232	0,880
0,4	300000	3500000	2450000	1,285	0,827
0,4	300000	4375000	3062500	1,289	0,821
0,4	300000	5250000	3675000	1,253	0,817
0,4	300000	6125000	4287500	1,238	0,819
0,4	300000	7000000	4900000	1,251	0,816
0,4	3300000	7000000	4900000	1,278	0,955
0,4	3600000	5250000	3675000	1,260	0,980
0,4	3600000	6125000	4287500	1,256	0,974
0,4	3600000	7000000	4900000	1,212	0,963
0,4	3900000	6125000	4287500	1,198	0,978
0,4	3900000	7000000	4900000	1,172	0,970
0,4	4200000	6125000	4287500	1,164	0,979
0,4	4200000	7000000	4900000	1,147	0,975

0,4	4500000	7000000	4900000	1,132	0,978
0,4	4800000	7000000	4900000	1,124	0,980
0,6	300000	1750000	1225000	1,289	0,859
0,6	300000	2625000	1837500	1,275	0,839
0,6	300000	3500000	2450000	1,250	0,828
0,6	300000	4375000	3062500	1,245	0,823
0,6	300000	5250000	3675000	1,224	0,819
0,6	300000	6125000	4287500	1,208	0,824
0,6	300000	7000000	4900000	1,198	0,818
0,6	600000	1750000	1225000	1,259	0,928
0,6	600000	2625000	1837500	1,248	0,889
0,6	600000	3500000	2450000	1,236	0,869
0,6	600000	4375000	3062500	1,225	0,855
0,6	600000	5250000	3675000	1,213	0,849
0,6	600000	6125000	4287500	1,200	0,843
0,6	600000	7000000	4900000	1,186	0,835
0,6	900000	1750000	1225000	1,252	0,959
0,6	900000	2625000	1837500	1,243	0,927
0,6	900000	3500000	2450000	1,233	0,899
0,6	900000	4375000	3062500	1,220	0,882
0,6	900000	5250000	3675000	1,215	0,870
0,6	900000	6125000	4287500	1,204	0,860
0,6	900000	7000000	4900000	1,183	0,848
0,6	1200000	1750000	1225000	1,287	0,978
0,6	1200000	2625000	1837500	1,269	0,948
0,6	1200000	3500000	2450000	1,254	0,927
0,6	1200000	4375000	3062500	1,229	0,906
0,6	1200000	5250000	3675000	1,231	0,891
0,6	1200000	6125000	4287500	1,219	0,880
0,6	1200000	7000000	4900000	1,150	0,864
0,6	1500000	4375000	3062500	1,249	0,922
0,6	1500000	5250000	3675000	1,249	0,902
0,6	1500000	6125000	4287500	1,235	0,892
0,6	1500000	7000000	4900000	1,198	0,882
0,6	1800000	4375000	3062500	1,266	0,941
0,6	1800000	5250000	3675000	1,264	0,922
0,6	1800000	6125000	4287500	1,249	0,907
0,6	1800000	7000000	4900000	1,215	0,894
0,6	2100000	4375000	3062500	1,288	0,957
0,6	2100000	5250000	3675000	1,298	0,938
0,6	2100000	6125000	4287500	1,286	0,922
0,6	2100000	7000000	4900000	1,245	0,908
0,6	2400000	7000000	4900000	1,297	0,922
0,8	2700000	7000000	4900000	1,295	0,934
0,8	3000000	7000000	4900000	1,274	0,945
0,8	3300000	6125000	4287500	1,300	0,967
0,8	3300000	7000000	4900000	1,269	0,954
0,8	3600000	7000000	4900000	1,277	0,960
0,8	3900000	7000000	4900000	1,299	0,968