

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра електрифікації, автоматизації  
виробництва та інженерної екології  
Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

Савченко Костянтина Леонідовича

УДК 620.93

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Підвищення ефективності передачі електроенергії в мережах 0,4 кВТ  
за рахунок компенсації реактивної складової потужності

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр  
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання  
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне  
джерело

\_\_\_\_\_ Савченко К.Л.  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи  
Цивенкова Наталія Михайлівна  
(прізвище, ім'я, по батькові)  
К. Т. Н., доц.  
(науковий ступінь, вчене звання)

## АНОТАЦІЯ

Савченко К.Л. Підвищення ефективності передачі електроенергії в мережах 0,4 кВ за рахунок компенсації реактивної складової потужності. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

Розглянуто питання ефективності передачі електроенергії в системах електропостачання із забезпеченням технічних засобів компенсації реактивної потужності. Проведено аналітичне дослідження та моделювання пристрою компенсації реактивної потужності на базі силового фільтра при різко змінних навантаженнях. Визначено аналітичний взаємозв'язок джерел реактивної потужності і енергії та встановлено рекомендації щодо їх раціонального розташування.

**Ключові слова:** реактивна потужність, перетворювальні пристрої, джерела несинусоїдальної напруги.

## SUMMARY

Savtchenko K. L. «Improving the efficiency of electricity transmission in 0.4 kV networks by compensating the reactive power component» - Manuscript.

Master's work for the Master "Master" specialty 141 "Electric power, electrical engineering and electro mechanics" Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

The issue of reactive power compensation in power supply systems of industrial enterprises with converters is considered. The research of methods and devices of reactive power compensation at power supply of nonlinear and sharply changing loadings is carried out. The analytical interrelation of reactive power and energy sources is determined and recommendations for their rational arrangement are established.

Key words: reactive power, converters, non-sinusoidal voltage sources.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ .....	7
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	13
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНЖЕНЕРНОГО РІШЕННЯ.....	21
3.1. Технічні засоби компенсації реактивної потужності в системах електропостачання.....	21
3.2. Імітаційне моделювання інженерних рішень.....	24
ВИСНОВКИ.....	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	30

## ВСТУП

**Актуальність досліджень.** Протяжні електричні мережі і великі навантаження підприємства сприяють появі втрат електричної енергії (близько 40%) при її транспортуванні, від яких напряму залежить ефективність використання виробленої на електростанції електрики. Знизити втрати можливо при зменшенні реактивної складової в лініях, при цьому компенсуючи її в місці споживання.

Питання управління компенсацією реактивної потужності в системах електропостачання є одним з найважливіших напрямків досліджень фахівців-енергетиків. Наразі питанню забезпечення належної якості електроенергії приділяють велику увагу, оскільки від її показників залежить робота практично всіх споживачів. Якість електроенергії можна поліпшити конструкційним виконанням мережі живлення або застосуванням відповідного додаткового обладнання на основі набутого досвіду в процесі виробництва і експлуатації [4, 5, 7, 9]. Збільшення середніх втрат в розподільних мережах, зменшення їх пропускної здатності, і, в підсумку – збільшення витрат на передачу електроенергії – всі ці негативні впливи на мережу виникають в результаті відсутності установок компенсації реактивної потужності [21, 22, 27, 28].

Одним з основних питань, пов'язаних з підвищенням якості електроенергії в мережах, є питання компенсації реактивної енергії, що включає раціональний вибір та розміщення джерел, розрахунок і регулювання їх потужності та технічних показників. Наразі ці норми можуть бути досягнуті вже на стадії проектування систем шляхом застосування відповідних розрахунків і використання технічних засобів.

**Об'єкт досліджень:** системи електропостачання та електроприймачі промислових підприємств.

**Предмет досліджень:** джерела реактивної потужності та їх взаємозв'язок з мережею електропостачання.

**Методи досліджень:** методи диференціального числення, табличний редактор Excel, програмне забезпечення MATLABSIMULINK.

**Завдання досліджень:**

- провести аналітичне дослідження методів і пристроїв компенсації реактивної потужності в системах електропостачання перетворювальних установок;
- синтезувати пристрій компенсації реактивної потужності для систем електропостачання перетворювальних установок;
- забезпечити швидкодіючу компенсацію реактивної потужності;
- забезпечити здійснення фільтрації вищих гармонік струмів і напруг, що генеруються приймачем електроенергії, компенсацію змін напруги.

**Практичне значення отриманих результатів:** проведені дослідження існуючих і перспективних джерел реактивної потужності для промислових підприємств зі специфічними електроприймачами, з розглядом питомих втрат потужності, порівняльних питомих вартісних характеристик і області їх переважного застосування, дозволяють вибирати на першій стадії проектування оптимальні варіанти компенсації реактивної потужності.

**Публікації за темою досліджень:**

1. Савченко К. Л. Карпушенко О. Г. Аналіз методів та технічного забезпечення компенсації реактивної потужності. – II Международная научно-практическая конференция «Priority directions of science and technology development», 22–24 ноября 2020 года, Киев, Украина.
2. Савченко К. Л. Карпушенко О. Г. Передові технологічні рішення проблеми компенсації реактивної потужності / Дев'ята Міжнародна науково-практична конференція «Science and practice of today», 16-19 листопада 2020 р., Анкара, Туреччина.
3. Результати кваліфікаційної роботи надруковано в збірнику праць «Студентські читання – 2020: Матеріали науково-практичної конференції. Житомир: Поліський національний університет, 2020, яка проходила 26 жовтня 2020 року.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Споживачі які мають в своєму складі індуктивний опір, називають джерелами реактивної потужності. Відомо, що джерелами реактивної потужності в системах електропостачання в реальних умовах є індуктивні та ємнісні навантаження, основну частину з яких складають: асинхронні двигуни – 40 %, трансформатори всіх ступенів трансформації – 35 %, вентильні перетворювачі – 10 %, електропечі – 8 %; лінії електропередачі (втрати в них) – 7 % [22].

Наявність реактивної потужності є фактором, який впливає на погіршення показників: якості електроенергії; втрат в провідниках; навантаження на трансформатори, комутаційну апаратуру, дроти і кабелі, що призводить до зниження терміна їх служби; відхилення напруги мережі від номінального значення; рівня вищих гармонік [15, 16, 19].

Одним з ключових показників якості електроенергії, передбачених нормативними документами, є коефіцієнт потужності. Зниження його обумовлюється інтенсивним розвитком силової напівпровідникової перетворювальної техніки, її використанням в системах електроприводів, вентильних перетворювачах для електротермічних і електротехнологічних установок різного призначення [16]. Проблема може бути вирішена шляхом створення швидкодіючих багатофункціональних засобів компенсації реактивної потужності, що дозволяє забезпечити задану якість електроенергії відразу за кількома параметрами [21, 22, 27, 28].

Досвід експлуатації систем показує, що забезпечити зниження перетоків реактивної енергії по лініях і трансформаторних пристроях можливо при розташуванні її джерел поблизу місць її споживання. Разом з цим розвантажуються по реактивній потужності передавальні елементи мережі [14, 27].

Заходи, щодо компенсації реактивної потужності електроустановок споживачів, можуть бути розділені на наступні три групи [4, 8, 16]:

- 1) які не потребують застосування компенсуючих пристроїв;
- 2) які пов'язані із застосуванням компенсуючих пристроїв;
- 3) допускаються як виняток.

В основному перевага надається заходам першої групи, які не потребують значних капітальних витрат на впровадження. До них відносяться [4, 8, 16, 20, 24]:

- 1) заміна або відключення трансформаторів, що завантажені менш ніж на 30 % від їх номінальної потужності;
- 2) усунення холостого ходу асинхронних двигунів шляхом установки обмежувачів холостого ходу, у випадку тривалості міжопераційного періоду понад 10 хв.;
- 3) заміна асинхронних двигунів синхронними такої ж потужності, якщо це раціонально з техніко-економічних міркувань;
- 4) узгодження технологічних процесів споживачів задля забезпечення раціонального енергоспоживання;
- 5) застосування перетворювачів з великим числом фаз випрямлення;
- 6) перемикання статорних обмоток асинхронних двигунів напругою до 1000 В з трикутника на зірку, якщо їх завантаження становить менше 40% від номінального;
- 7) застосування почергового і несиметричного керування роботою перетворювачів;
- 8) застосування спеціальних перетворювальних систем з штучною комутацією вентилів та фільтрів вищих гармонік в мережі живлення;
- 9) регулювання напруги, що підводиться до електродвигуна при тиристорному управлінні.

Разом з тим, практичний досвід та науковий аналіз показали, що найвищі значення за економічними показниками ефективності забезпечується шляхом впровадження заходів другої групи:

- 1) установка статичних конденсаторів;
- 2) застосування статичних джерел реактивної потужності;
- 3) використання синхронних двигунів в якості компенсаторів;
- 4) застосування систем компенсації, що складаються з декількох перерахованих пристроїв, що працюють паралельно.

Як уже було сказано, наука та практика показали, що невелика відстань між споживачами реактивної енергії та пристроями компенсації, дозволяє забезпечити необхідні показники економічної та енергетичної ефективності в розподільній мережі. Дані завдання можливо вирішити шляхом впровадження системи автоматичного регулювання конденсаторних батарей в комплекті з фільтрами струмів вищих гармонік, якщо в розподільних лініях присутня несинусоїдальність напруги.

Пристрої компенсації в залежності від місця їх розташування в розгалуженій системі поділяються на види: індивідуальні, групові, централізовані (рис. 1.1) [27].

Індивідуальна система компенсації не забезпечує використання пристроїв компенсації при вимиканні споживача, що є головним недоліком цієї системи. Такий вид компенсації найкраще застосовувати для компенсації потужності приймачів з нелінійними характеристиками.

Групова і централізована компенсації дають можливість використання пристроїв незалежно від роботи окремих споживачів і це є головною їхньою перевагою. Проте для реалізації таких видів компенсації потрібна додаткова апаратура (комутаційна і захисна), а пристрої компенсації повинні забезпечувати достатній діапазон регулювання спожитої енергії. Як правило, для таких груп споживачів характерна часта зміна навантаження, що вимагає застосування пристроїв з автоматичним регулюванням потужності.



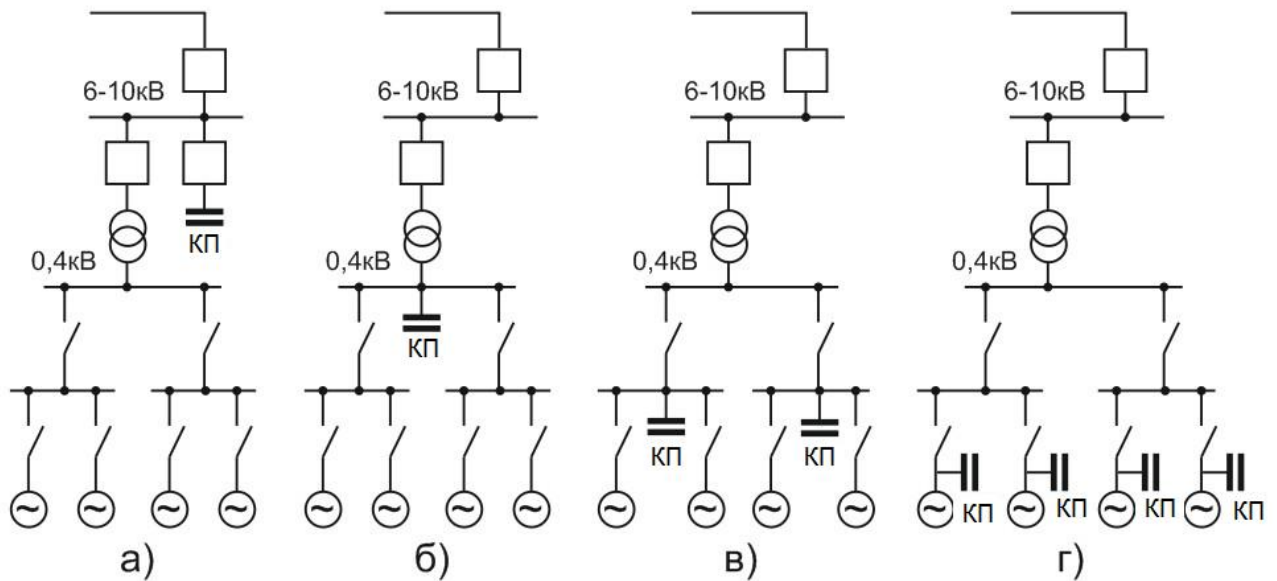


Рисунок 1.1 – Схеми під'єднання компенсуючих пристроїв:

а – централізована компенсація на високій стороні; б – централізована компенсація на низькій стороні; в – групова компенсація; г - індивідуальна компенсація [27]

Разом з тим, з безперервним розвитком електроенергетичних систем, коли мають місце тенденції до створення крупних і потужних енергосистем, важливість централізованої компенсації знижується. При централізованій компенсації в великих енергосистемах по причині віддаленого розміщення об'єктів не забезпечується компенсація в усіх точках системи – більша відстань призводить до збільшення втрат в мережі. Наразі більш доцільним вважається застосування групових компенсаторів, а для нелінійного навантаження великої потужності – індивідуальних.

Відомо, що раціональне розміщення компенсаторів є важливим у питанні щодо забезпечення можливості стабілізації реактивної потужності в точці підключення перетворювача. Таким чином в енергосистемі досягається обмеження коливання напруги при зміні режимів роботи споживачів [27].

Ефективний спосіб компенсації реактивної потужності перетворювальних установок – створення компенсаційного перетворювального агрегату зі штучною комутацією, який генерує реактивну потужність (рис. 1.2).

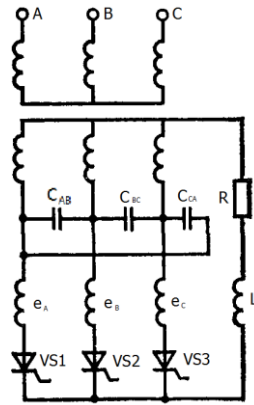


Рисунок 1.2 – Принципова схема компенсуючого перетворювального агрегату

Наприклад, на фазі В комутація струму при меншому значенні напруги у фазі В забезпечується регулюванням ємності конденсатора, коли змінюється в необхідних межах значення напруги між фазами А і В. Струм фази В буде випереджати напругу, і перетворювач буде генерувати реактивну енергію в мережу [13].

В даний час основними заходами щодо зменшення впливу вищих гармонік напруги на елементи електроустановок є:

- застосування багатофазних схем випрямлення, спеціальних законів управління перетворювачами;
- раціональна побудова схеми електропостачання;
- використання резонансних фільтрів.

Достатньо ефективним заходом щодо зниження рівнів вищих гармонік є збільшення числа фаз випрямлення, проте анодні трансформатори для великого числа фаз випрямлення виходять складними, дорогими і ненадійними. Тому для потужних перетворювачів застосовують, як правило, не більше ніж 12-фазний режим випрямлення.

Одним з найбільш перспективних способів зменшення струмів і напруг вищих гармонік в мережах, де є потужні споживачі з реактивною складовою є встановлення силових фільтрів вищих гармонік, що представляють собою послідовне з'єднання індуктивного і ємнісного опорів, налаштованих в резонанс на фільтровану гармоніку. На рис. 1.3 показано схему поперечного фільтра вищих гармонік.

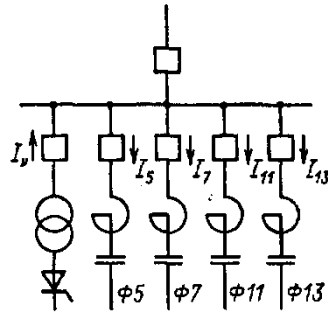


Рисунок 1.3 – Схема ввімкнення фільтрів 5, 7, 11 і 13-й гармонік [3].

### Висновок по розділу:

При нелінійних і швидкозмінних навантаженнях застосування статичних компенсаторів реактивної потужності стає необхідністю, що позитивно впливає на показники роботи, що дає можливість регулювати її реактивну потужність і покращувати динамічну стійкість. З такими умовами можна відстежити підвищення техніко-економічних показників в роботі мережі, все це відбувається завдяки підвищенню статичної стійкості в енергосистемі.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Для повної компенсації потужність компенсуючого пристрою повинна дорівнювати і ,бути протилежною за знаком реактивній потужності навантаження:

$$Q_K = -Q_H = -UI \sin \varphi, \quad (2.1)$$

де  $U$  – діюче значення напруги навантаження;  $I$  – діюче значення струму навантаження;  $\varphi$ – кут зсуву фаз між напругою і струмом навантаження.

Відомо, що при несинусоїдальних режимах інтегральне значення реактивної потужності  $Q$  не дозволяє в повній мірі формалізувати процеси обміну електромагнітною енергією. Для аналітичних досліджень електромагнітних процесів в нелінійних колах несинусоїдального струму застосовується поняття миттєвої реактивної потужності, наприклад, як використовуються миттєві струми і напруги (або їх спектри), а не їх діючі значення при розрахунках таких електричних кіл [25].

При компенсації реактивної потужності і «гасіння» вищих гармонік струму навантаження, струм джерела  $i_{дж}(t)$  повинен відповідати підключенню лінійного активного навантаження, яке не змінюється в часі. Нелінійне навантаження разом з компенсуючим пристроєм замінюється еквівалентним активним опором  $R$  (рис. 2.1).

Миттєве значення реактивної потужності, яка може бути повністю компенсованою, визначається [25]:

$$q(t) = p(t) - p_r(t) = u(t)i(t) - \frac{u^2(t)}{R}. \quad (2.2)$$

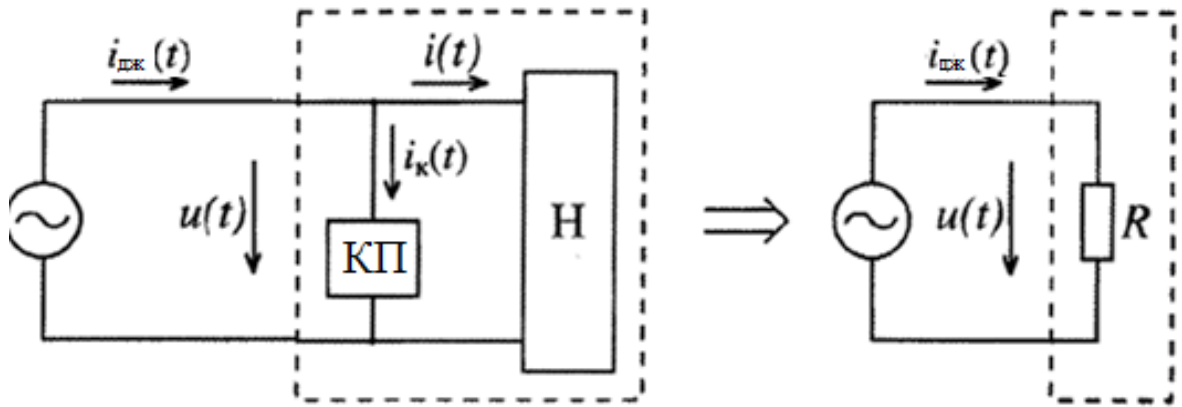


Рисунок 2.1 – Принцип компенсації реактивної потужності нелінійного навантаження [25]

Величину активного опору можна знайти із умови рівності активно потужності навантаження і активної потужності, що споживається цим опором [25]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u^2(t)}{R} dt, \quad (2.3)$$

звідки:

$$R = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \frac{P}{U^2}. \quad (2.4)$$

Таким чином, миттєва реактивна потужність навантаження:

$$q(t) = u(t) i(t) - \frac{P}{U^2} u^2(t). \quad (2.5)$$

Для повної компенсації реактивної потужності необхідно, щоб виконувалося рівняння:

$$q_K(t) = -q(t) = \frac{P}{U^2} u^2(t) - u(t) i(t). \quad (2.6)$$

де:  $q_K(t)$  – миттєва реактивна потужність компенсуючого пристрою;  $q(t)$  – миттєва потужність навантаження.

Доведемо, що в цьому випадку втрати енергії в мережі живлення будуть мінімальні. Для цього знайдемо функцію  $i(t)$ , при якій функціонал

$$S(i(t)) = \int_0^T i^2(t) dt \rightarrow \min, \quad (2.7)$$

якщо

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt, \quad (2.8)$$

де  $u(t)$  – задана періодична функція, для якої існує інтеграл:

$$\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt < \infty. \quad (2.9)$$

Дана задача вирішується при введенні функції:

$$z(\tau) = \int_0^\tau u(\tau) i(\tau) d\tau \quad (\text{при умові } z(0) = 0, z(T) = PT).$$

При диференціюванні отримаємо:

$$z'(t) = \int_0^t u(\tau) i(\tau) d\tau. \quad (2.10)$$

Розв'язок рівняння можливий при введенні допоміжного функціонала:

$$S^* = \int_0^T (i^2(t) + \lambda(t)[u(t)i(t) - z'(t)]) dt = \int_0^T F^* dt, \quad (2.11)$$

$$F_i^* = \frac{\partial F^*}{\partial i} = 2i(t) + \lambda(t)u(t); \quad (2.12)$$

$$F_{i'}^* = \frac{\partial F^*}{\partial i'} = 0; \quad (2.13)$$

$$F_z^* = \frac{\partial F^*}{\partial z} = 0; \quad (2.14)$$

$$F_{z'}^* = \frac{\partial F^*}{\partial z'} = -\lambda(t). \quad (2.15)$$

Сумісний розв'язок рівнянь (2.11-2.15) дає рівняння:

$$\begin{aligned} 2i(t) + \lambda(t)u(t) &= 0 \\ \frac{d\lambda(t)}{dt} &= 0. \end{aligned} \quad (2.16)$$

З урахуванням цього, стає можливим отримання розв'язку рівняння (2.7):

$$i(t) = \frac{Pu(t)}{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \frac{P}{U^2} u^2(t) = \frac{1}{R} u(t). \quad (2.17)$$

Функція (2.17) забезпечує мінімум функціонала (2.7) при умовах (2.8) та (2.9).

Таким чином, дійсно втрати в мережі живлення будуть мінімальними при узгодженні нелінійного навантаження і компенсуючого пристрою активним незмінним в часі опором.

Розглянемо тепер компенсацію реактивної потужності нелінійного навантаження з урахуванням опору джерела живлення (рис. 2.2). Наявність опору мережі живлення призведе до зміни напруги на навантаженні, а, отже, її струму і активної потужності після підключення компенсуючого пристрою.

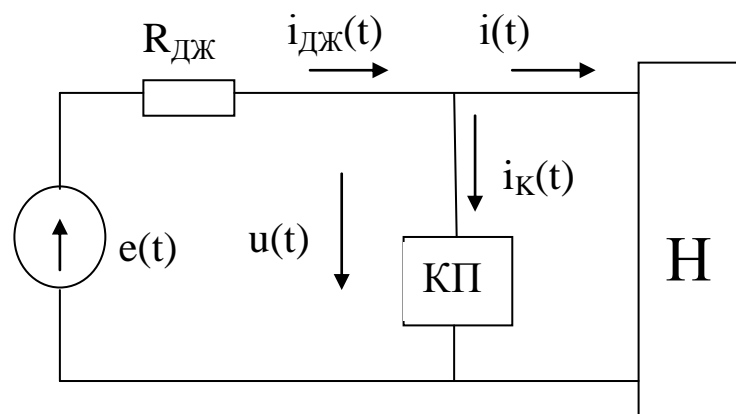


Рисунок 2.2 – Компенсація реактивної потужності з урахуванням опору джерела живлення

Будемо вважати, що струми навантаження  $i(t)$  і компенсуючого пристрою  $i_K(t)$  є функцією напруги  $u(t)$ :

$$i(t) = i[u(t)]; \quad (2.18)$$

$$i_K(t) = i_K[u(t)], \quad (2.19)$$

тоді напруга навантаження:

$$u(t) = e(t) - R_{ДЖ}(i[u(t)] - i_K[u(t)]), \quad (2.20)$$

а з урахуванням виразу (2.6) миттєва реактивна потужність  $q_K(t)$  і струм компенсуючого пристрою:

$$q_K(t) = u(t)i_K[u(t)]; \quad (2.21)$$

$$i_K[u(t)] = \frac{P}{U^2}u(t) - i[u(t)]. \quad (2.22)$$

Активна потужність навантаження  $P$  і діюче значення напруги  $U$  будуть залежати від режиму роботи компенсуючого пристрою

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (e(t) - R_{ДЖ}i[u(t)] - R_{L..}i_K[u(t)])[u(t)] dt; \quad (2.23)$$

$$U = \frac{1}{T} \int_0^T (e(t) - R_{ДЖ}i[u(t)] - R_{L..}i_K[u(t)])^2 dt. \quad (2.24)$$

Спільне рішення рівнянь (2.20) – (2.24) дає можливість визначити миттєву реактивну потужність компенсуючого пристрою, що обумовлює повну компенсацію реактивної потужності нелінійного навантаження.

У випадках, якщо нелінійне навантаження являє собою комутовані лінійні елементи (наприклад, вентиляльні перетворювачі), тобто коли струм навантаження пропорційний напрузі.

Підставимо (2.22) в (2.20), отримаємо:

$$u(t) = e(t) - \frac{R_{ДЖ}P}{U^2}u(t), \quad (2.25)$$

звідки:

$$u(t) = \frac{1}{1 + \frac{R_{ДЖ}P}{U^2}} e(t) \quad (2.26)$$



$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \frac{E}{\left(1 + \frac{R_{ДЖ} P}{U^2}\right)} \quad (2.27)$$

$$EU = U^2 + R_{ДЖ} P, \quad (2.28)$$

де  $E$  – діюче значення е.р.с.

Активна потужність:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i[u(t)] dt = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_{ДЖ} P}{U^2}\right)^2} \frac{1}{T} \int_0^T e(t) i[e(t)] dt = \frac{P_{(R_{ДЖ}=0)}}{\left(1 + \frac{R_{ДЖ} P}{U^2}\right)^2}, \quad (2.29)$$

де:  $P_{(R_{ДЖ}=0)}$  – активна потужність, що споживається навантаженням при ідеальному джерелі;  $i[e(t)]$  – струм навантаження при підключенні до ідеального джерела.

Розв'язок рівняння (2.29) дає :

$$P = \frac{U^2}{E^2} P_{(R_{ДЖ}=0)}. \quad (2.30)$$

З урахуванням цього, (2.25) прийме вигляд:

$$u(t) = \frac{1}{1 + \frac{R_{ДЖ} P_{(R_{ДЖ}=0)}}{E^2}} e(t). \quad (2.31)$$

$$i(t) = \frac{1}{1 + \frac{R_{ДЖ} P_{(R_{ДЖ}=0)}}{E^2}} i[e(t)]. \quad (2.32)$$

Сумісний розв'язок рівнянь (2.21), (2.22), (2.31), (2.32) дає:

$$i_K(t) = \frac{P_{(R_{ДЖ}=0)}}{E^2} \frac{1}{1 + \frac{R_{ДЖ} P_{(R_{ДЖ}=0)}}{E^2}} e(t) - \frac{1}{1 + \frac{R_{ДЖ} P_{(R_{ДЖ}=0)}}{E^2}} i[e(t)] = \frac{P_{(R_{ДЖ}=0)} e(t) - E^2 i[e(t)]}{E^2 + R_{ДЖ} P_{(R_{ДЖ}=0)}}, \quad (2.33)$$

$$q_K(t) = \frac{E^2 e(t) (P_{(R_{ДЖ}=0)} e(t) - E^2 i[e(t)])}{\left(E^2 + R_{ДЖ} P_{(R_{ДЖ}=0)}\right)^2} \quad (2.34)$$

Перевірку адекватності отриманої моделі зміни миттєвої реактивної потужності компенсуючого пристрою було проведено на прикладі однонапівперіодного випрямляча з активним навантаженням  $R_H$  (рис. 2.3).

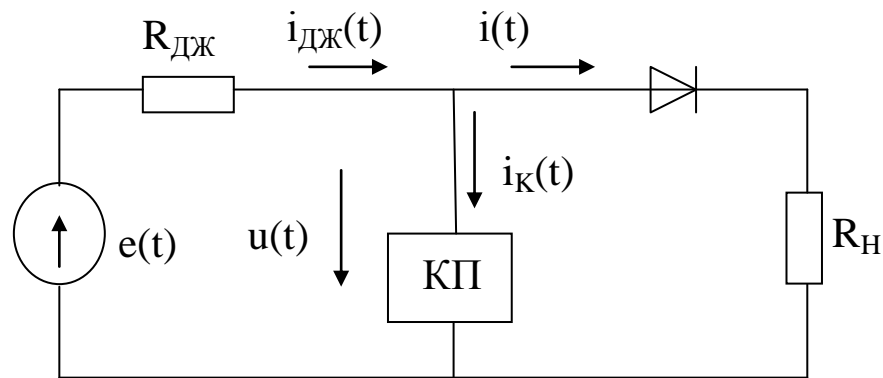


Рисунок 2.3 – Структурна схема компенсації реактивної потужності однонапівперіодного випрямляча з активним навантаженням

Активна потужність навантаження при живленні від ідеального джерела:

$$P_{(R_{ДЖ}=0)} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} E_m \sin \omega t \frac{E_m}{R_{ДЖ}} \sin \omega t dt = \frac{E^2}{2R_{ДЖ}}. \quad (2.35)$$

Визначимо вирази, що описують режим роботи даної схеми для інтервалів –  $[0; \pi]$  і  $[\pi; 2\pi]$ , тобто для інтервалів відкритого і закритого станів вентиля.

Інтервал  $[0; \pi]$ :

$$e(t) = E_m \sin \omega t \quad (2.36)$$

$$i[e(t)] = \frac{E_m}{R_H} \sin \omega t \quad (2.37)$$

$$i_K(t) = \frac{\frac{E^2}{2R_H} E_m \sin \omega t - E^2 \frac{E_m}{R_H} \sin \omega t}{E^2 + E^2 \frac{R_{ДЖ}}{2R_H}} = -\frac{E_m}{2R_H + R_{ДЖ}} \sin \omega t \quad (2.38)$$

$$q_K(t) = -\frac{2R_H E_m^2}{(2R_H + R_{ДЖ})^2} \sin \omega t. \quad (2.39)$$

Інтервал  $[\pi; 2\pi]$ . ЕРС цього джерела для даного інтервалу залишиться без зміни, а струм навантаження:

$$i[e(t)] = 0, \quad (2.40)$$

тому

$$i_K(t) = \frac{\frac{E^2}{2R_H} E_m \sin \omega t - 0}{E^2 + E^2 \frac{R_{ДЖ}}{2R_H}} = \frac{E_m}{2R_H + R_{ДЖ}} \sin \omega t. \quad (2.41)$$

$$q_K(t) = -\frac{2R_H E_m^2}{(2R_H + R_{ДЖ})^2} \sin^2 \omega t. \quad (2.42)$$

Криві зміни напруги  $u(t)$ , струму навантаження  $i(t)$ , миттєвої реактивної потужності  $q_K(t)$  і струму  $i_K(t)$  компенсуючого пристрою наведені на рис. 2.4.

Знайдемо аналітичний вираз для визначення струму джерела  $i_{ДЖ}(t)$  при умові що миттєва компенсуючи потужність визначається за(2.39), (2.41). На інтервалі  $[0; \pi]$ :

$$i_{ДЖ}(t) = i_H(t) + i_K(t) = \frac{2E_m}{2R_H + R_{ДЖ}} \sin \omega t - \frac{E_m}{2R_H + R_{ДЖ}} \sin \omega t = \frac{E_m}{2R_H + R_{ДЖ}} \sin \omega t. \quad (2.43)$$

На інтервалі  $[\pi; 2\pi]$ :

$$i_{ДЖ}(t) = i_K(t) = \frac{E_m}{2R_H + R_{ДЖ}} \sin \omega t. \quad (2.44)$$

Таким чином, компенсація реактивної потужності забезпечує синусоїдальну форму струму джерела (рис. 2.4).

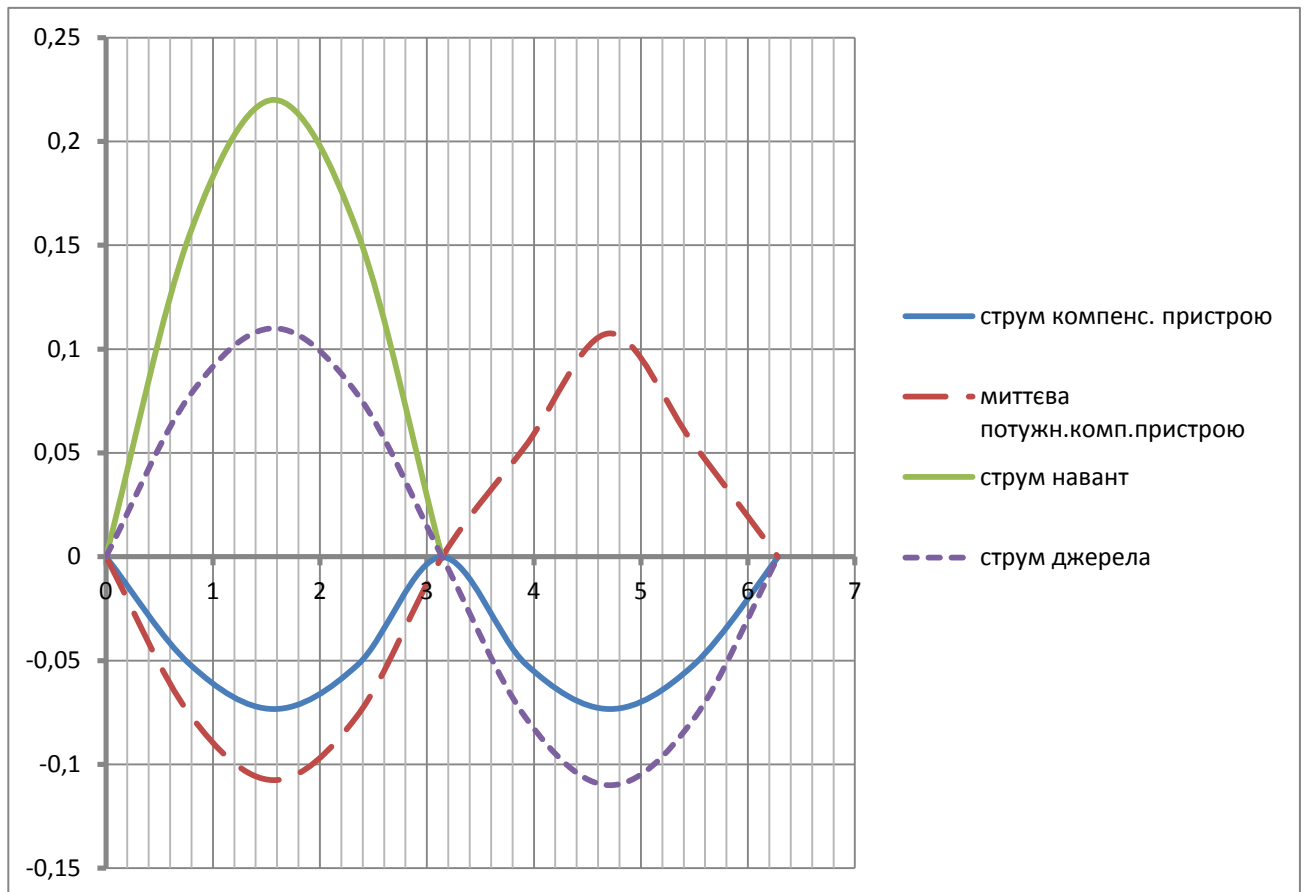


Рисунок 2.4 – Зміна параметрів мережі в умовах компенсації реактивної потужності

## РОЗДІЛ 3

### ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНЖЕНЕРНОГО РІШЕННЯ

#### 3.1. Технічні засоби компенсації реактивної потужності в системах електропостачання

Аналіз якості електроенергії на підстанціях споживачів показав необхідність не тільки компенсації реактивної потужності, а й корекції нелінійних спотворень, які вносяться в мережу силовими випрямними агрегатами. Найбільш перспективними заходами підвищення якості електроенергії є застосування активного або гібридного силового фільтра. Крім основних функцій корекції високочастотних спотворень і компенсації реактивної потужності, незаперечними перевагами даних пристроїв є вирівнювання навантаження фаз, стабілізація напруги в мережі, зменшення піків струму навантаження та ін.

Тенденція до впровадження активних силових фільтрів з метою підвищення якості електроенергії спостерігається в Японії, США, а також в деяких країнах Європи. Стрімкий розвиток напівпровідникової техніки дозволяє нарощувати потужність та частоту роботи АСФ, за рахунок чого підвищується точність регулювання і зменшується вартість фільтра.

З метою експериментального підтвердження, представлених технічних гіпотез, а також дослідження режимів роботи і апробації нових технічних рішень в Коростенських РЕМ з АТ «Імпульс-проект» була розроблена експериментальна установка активного силового фільтра.

АСФ можна представити у вигляді функціональних вузлів, схема яких представлена на рис. 3.1.

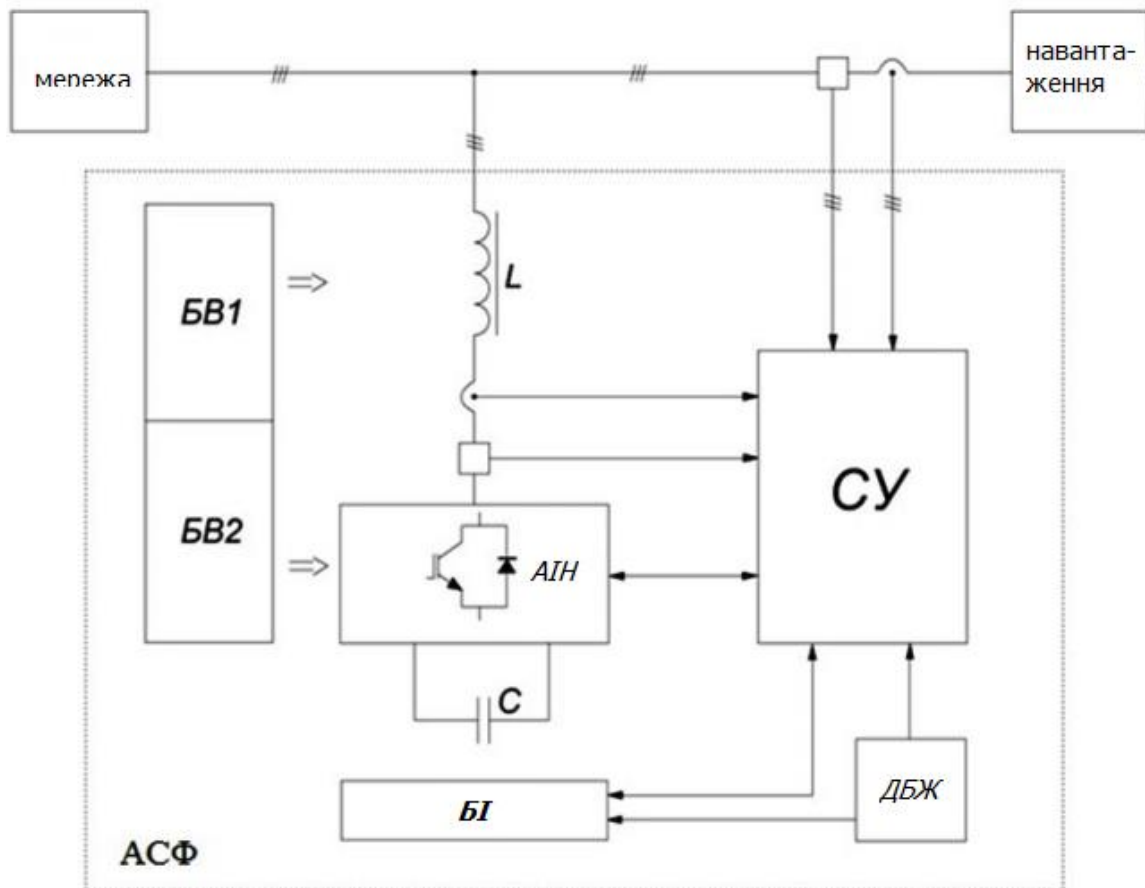


Рисунок 3.1 – Функціональна схема АСФ:

С – блок конденсаторів; L – трифазний дросель; АІН – автономний інвертор напруги; СУ – система управління АСФ; БВ1, БВ2 – блоки вентиляції; БІ– блок індикації.

На основі інформації, отриманої з датчиків струму і напруги, система управління АСФ формує сигнали завдання компенсаційного впливу для АІН, який через згладжувальний дросель направляє в мережу струм корекції.

Блок конденсаторів (С) є одним з основних компонентів в АСФ, так як є накопичувальним пристроєм, що дозволяє організувати більшість режимів роботи.

Ємність ланки постійного струму вибирається виходячи з [10]:

$$C_{dc} = \frac{P_c}{\omega \Delta u_{dc}^{max} U_{dc}}, \quad (3.1)$$

де  $P_c$  – потужність на виході АСФ;

$\Delta U_{dc}^{max}$  – величина максимального відхилення поточної напруги в ланці постійного струму.

Величина напруги на конденсаторі, яку регулює ПІ-регулятор, має бути не менше [10]:

$$U_{dc} = 2\sqrt{2}U_s, \quad (3.2)$$

де  $U_s$  - середньоквадратичне значення лінійної напруги на вході АСФ.

Трифазний дросель ( $L$ ) – величина індуктивності згладжую чого дроселя розраховується з умов згладжування ШІМ пульсацій і можливості забезпечення високої динаміки струму навантаження.

Мінімальне значення індуктивності визначається за формулою [10]:

$$L = \frac{U_{dc}}{1,2\omega \cdot i_{km}}, \quad (3.3)$$

де  $U_{dc}$  – задане значення напруги ланки постійного струму;

$i_{km}$  - амплітудне значення компенсаційного струму на виході АСФ;

$\omega$  – циклічна частота мережі.

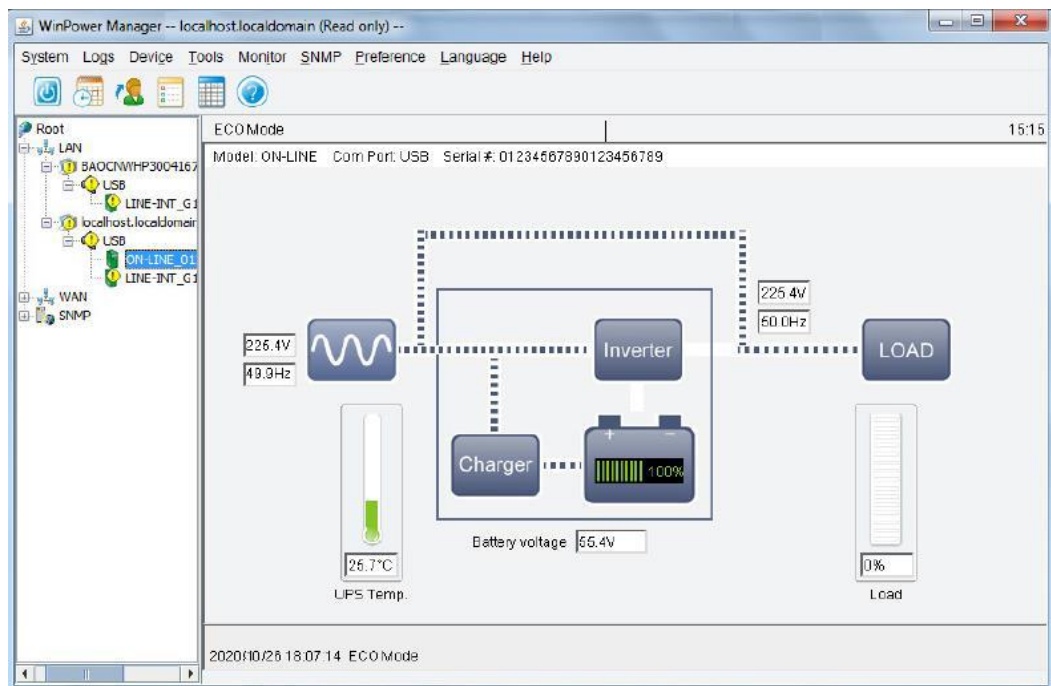


Рисунок 3.2 – Контроль і управління живленням кіл керування

Вимірювальна апаратура і ланцюги управління - контроль і управління роботою живлення ланцюгів управління АСФ здійснюється програмним забезпеченням *IPPONsmartwinner 1000*.

### 3.2. Імітаційне моделювання інженерних рішень

Представлена на рис. 3.3 імітаційна модель створена на базі програмного забезпечення Matlab Simulink і складається з трьох взаємопов'язаних систем: модель підстанції, модель навантаження, модель АСФ. При цьому використовується два різних варіанти навантаження:

- активно-індуктивне, що моделює фазовий зсув струму щодо напруги, що дозволяє оцінити роботу АСФ в системі з низьким значенням  $\cos(\phi)$ ;
- комбінована, яка складається з випрямного агрегату з навантаженням в колі постійного струму і асинхронних двигунів.

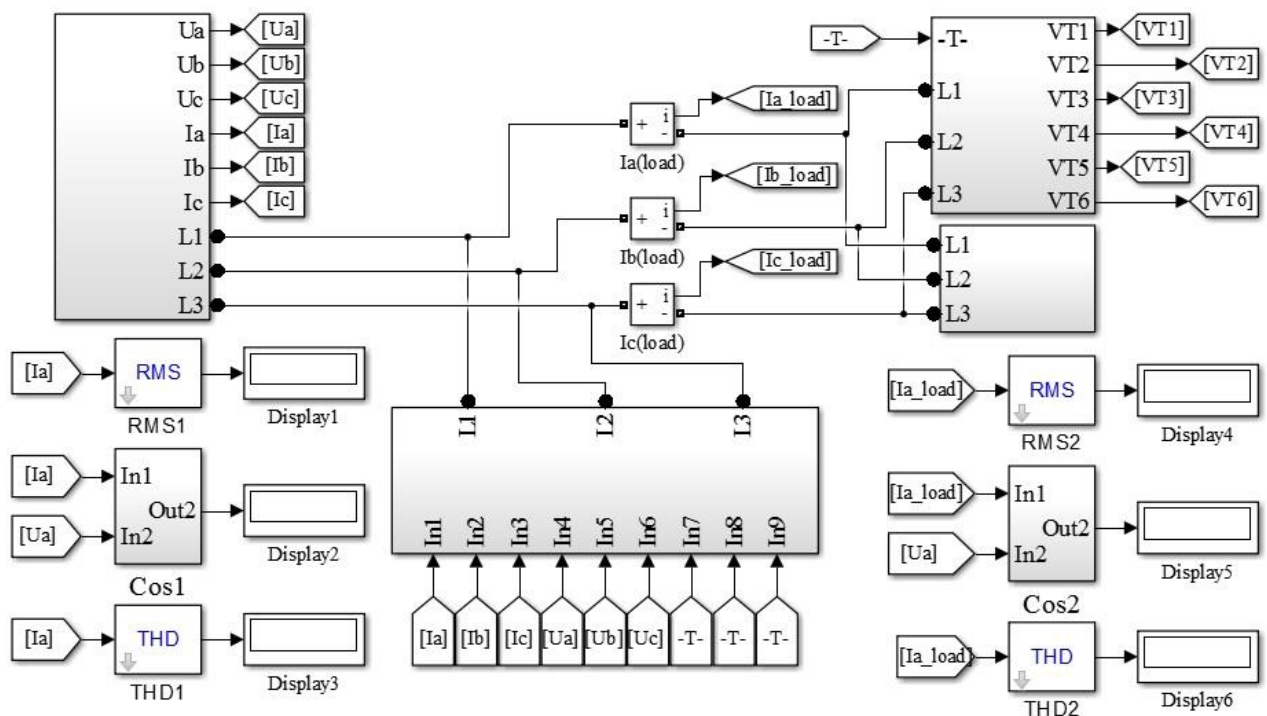


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд моделі підключення АСФ до мережі в *Matlab Simulink*



В якості стратегії управління обрана стабілізація струму мережі, а саме приведення характеристики струму до синусоїдальної форми з повною компенсацією реактивної потужності. Модель АСФ зображена на рис. 3.4.

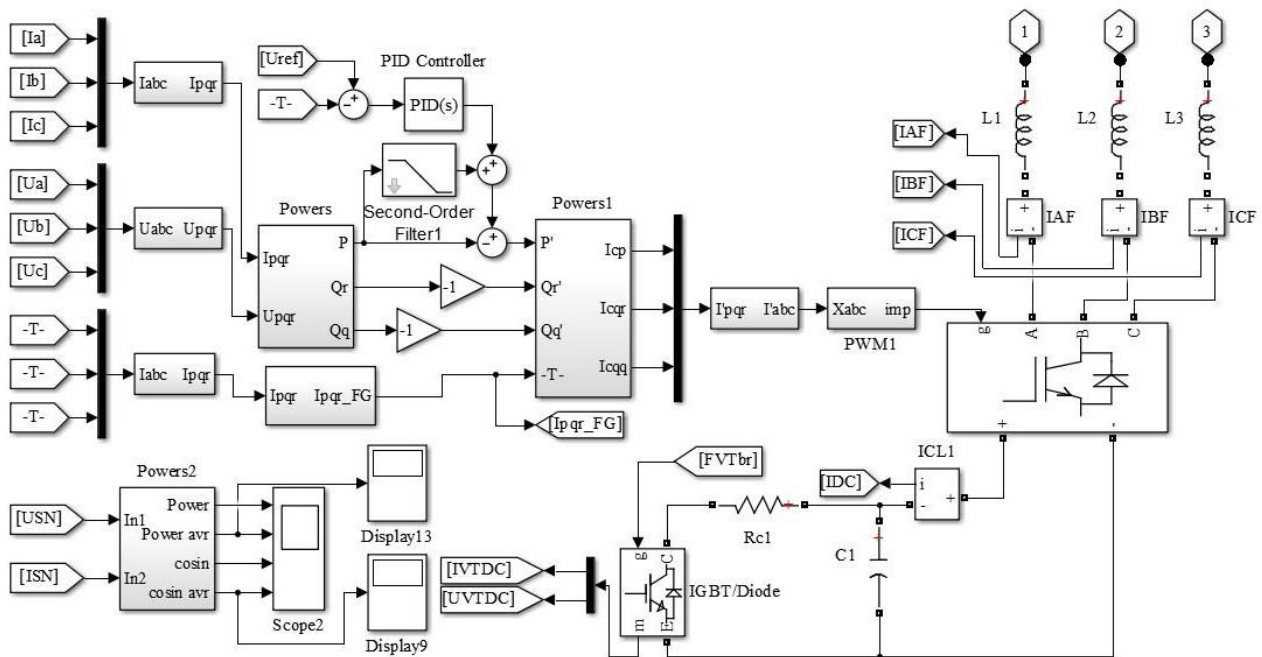


Рисунок 3.4 – Блок АСФ в *Matlab Simulink*

З метою спрощення розрахунків і зменшення часу моделювання в даній імітаційній моделі: не враховується вплив сторонніх споживачів, тому напруга мережі приймається синусоїдальним і збалансованим; не враховуються втрати в самому АСФ, так як за оцінкою, даною в [21] вони складають 1-2% від повної потужності пристрою; приймається, що на лінії знаходиться один ПС в режимі тяги, а також постійно працюють вентилятори і ескалатори.

У першому випадку, як споживач виступає активно-індуктивне навантаження зі значенням  $\cos\varphi=0.4$ . Основним завданням експерименту є перевірка працездатності моделі АСФ, а також оцінка показників якості електроенергії після компенсації реактивної потужності. Вихідні значення напруги і струму фази «А» мережі представлені на рис. 3.5а, де фаза струму випереджає фазу напруги.

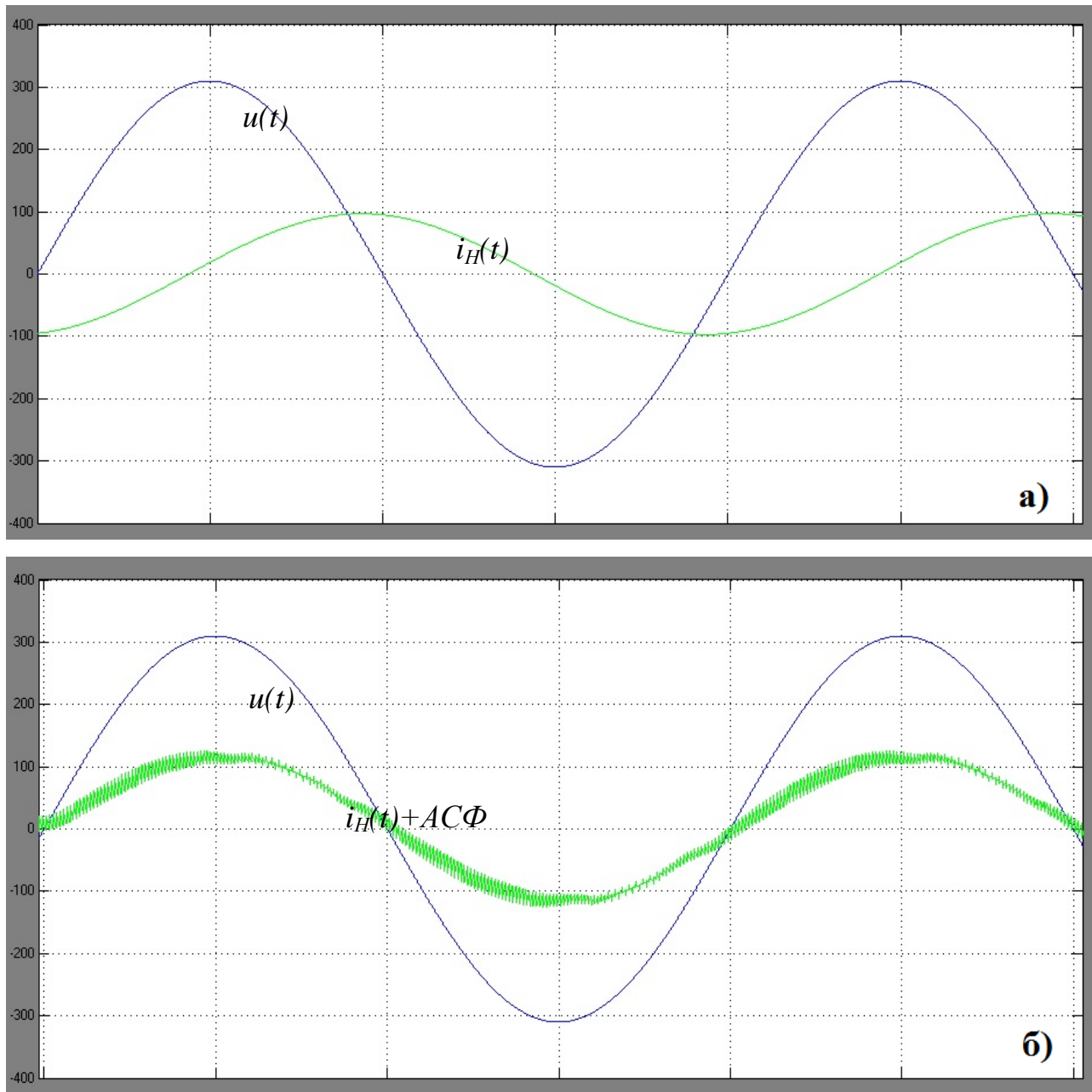


Рисунок 3.5 – Результати моделювання АСФ в *Matlab Simulink*

На рис. 3.5б представлений результуючий струм мережі при працюючому АСФ з показником  $\cos\varphi=0.987$ . Дані показники і графіки дозволяють зробити висновок про виконання завдання компенсації реактивної потужності із заданою якістю.

У другому експерименті, навантаження має не тільки різко нелінійний характер, а й фазовий зсув струму щодо напруги. Графіки струму і напруги фази «А» наведено нарис. 3.6.

Показники якості електроенергії:  $\cos \varphi = 0.906$  при коефіцієнті гармонійних спотворень 0.47 (що відповідає чинним вимогам  $\cos \varphi = 0.91$ , а THD = 0.43).

Результати моделювання зображені на рис. 3.6 і вказують на повну компенсацію гармонійних спотворень, крім невеликих пульсацій на частоті роботи ШІМ, а також практично повну компенсацію реактивної складової струму навантаження.

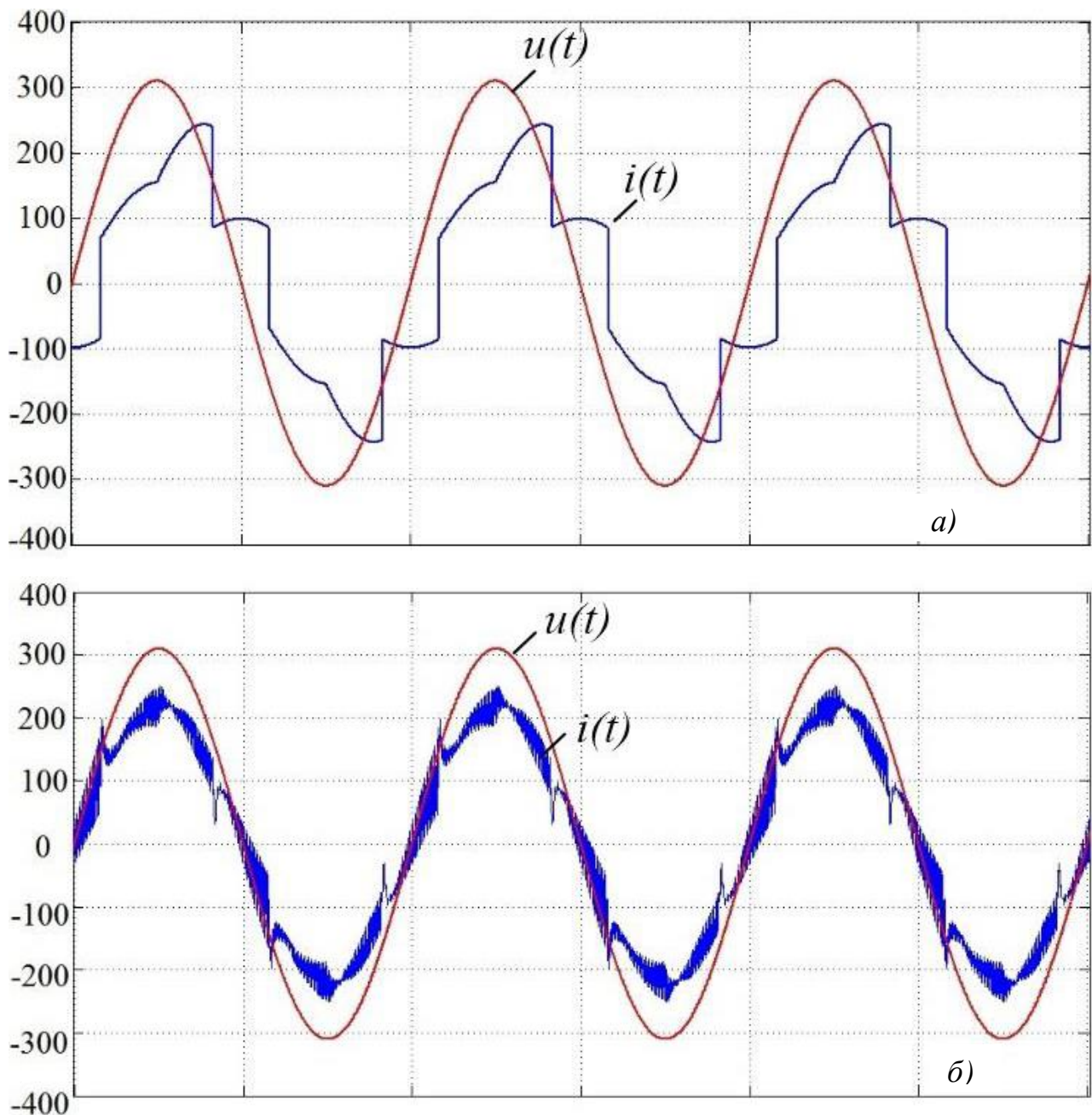


Рисунок 3.6 – Графік навантаження (а) та результати моделювання (б)

в *Matlab Simulink*

Виявлені пульсації можна мінімізувати збільшенням індуктивності вихідного дроселя, але в цьому випадку велике значення індуктивності веде до запізнювання системи при компенсації нелінійних спотворень, що збільшує коефіцієнт гармонік.

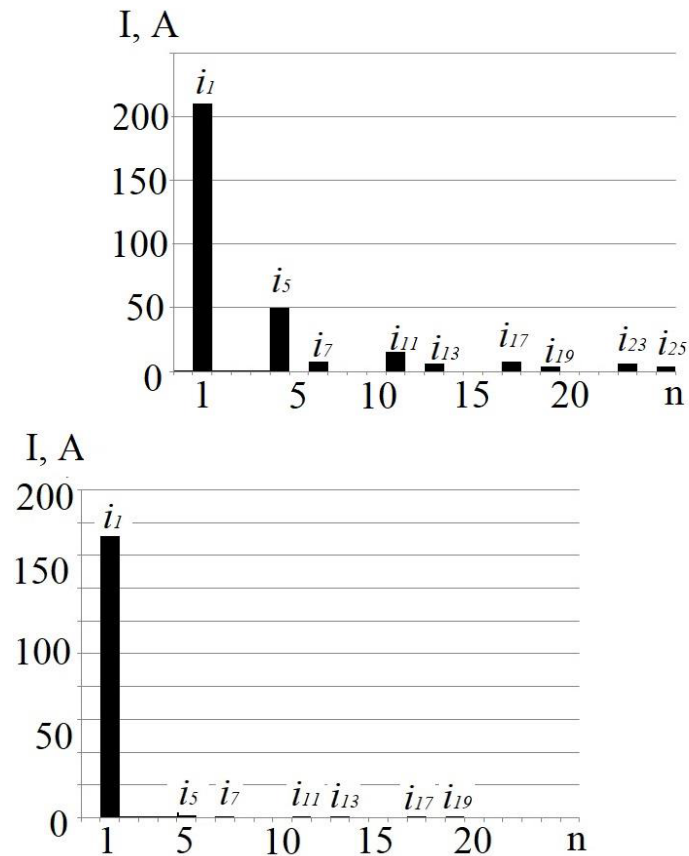


Рисунок 3.7 – Гармонійний склад струму мережі до і після компенсації

Гармонійний склад струму мережі до і після корекції показаний на рис. 3.7. Результати наочно демонструють зменшення потужності вищих гармонік, а також зменшення струму першої гармоніки на 22 %.

## ВИСНОВКИ

Компенсація реактивної потужності є фактором, який суттєво вплив на показники якості електроенергії, що передається, і загальні показники роботи система електропостачання.

В зв'язку з високою вартістю і достатньою складністю пристроїв компенсації, їхнє застосування повинно мати ретельне техніко-економічне та аналітичне обґрунтування.

У мережах з підвищеним вмістом вищих гармонік, що генеруються різкозмінним нелінійним навантаженням з підвищеним споживанням реактивної потужності, застосування звичайних засобів компенсації реактивної потужності, що розраховані на синусоїдальні струми і напруги, нашоувхується на серйозні технічні проблеми. Доцільним є застосування автоматичних силових фільтрів вищих гармонік, що налаштовані на фільтровану гармоніку в резонанс.

Перспективною є компенсація реактивної потужності в місцях споживання електроенергії і на проміжних підстанціях довгих ліній з метою підвищення стабільності напруги у споживачів, зниження втрат в лініях електропередач і мережах електропостачання споживачів, підвищення пропускної спроможності електропередач.

За допомогою використання результатів математичного імітаційного моделювання в *Matlab Simulink*, а також аналітичних розрахунків функціональних блоків АСФ створена експериментальна установка активної силової фільтрації.

Проведеними дослідженнями доведено спроможність и практичну цінність пропонованого методу для компенсації реактивної потужності и потужності спотворень в складних технічних системах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Богаенко И. Н., Борисенко В. Я., Розинский Д. И., Рюмшин Н. А. Регулируемые компенсирующие устройства реактивной мощности / Справочник. – К.: Техніка, 1992. – 152 с.
2. Бортник И.М., Буряк С.Ф., Ольшванг М.В., Таратута И.П. Статические теристорные компенсаторы для энергосистем и сетей электроснабжения //Электричество. – 1985. – №2 – С. 13-19.
3. Василега П. О. Електропостачання: Навчальний посібник. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с.
4. Вахнина В.В. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий: Учебное пособие. – Тольятти: ТГУ, 2006. - С.69.
5. Денисюк С.П. Аналіз та оптимізація енергетичних характеристик систем з перетворювачами електричної енергії / С.П. Денисюк // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Системи електроживлення електротехнічних установок і комплексів». – 1999. – С. 129-134.
6. Добрусин Л.А. Широкополосные фильтрокомпенсирующие устройства для тиристорных преобразователей // Электричество. – 1985. – №4. – С. 27-30.
7. Електропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
8. Електропостачання: навч. посіб. / Ф.П.Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.
9. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях.– К.: Техніка, 1981. – 160 с.
10. Жемеров, Г. Г. Расчет параметров емкостного накопителя энергии компенсатора пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина // Электричество. – 2008. – № 1. – С. 54–59.

11. Зайцев И. М. Про компенсацію реактивної потужності електрообладнання / №11 (81) 2010 Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит с. 66–69
12. Зимин Е.Н., Кацевич В.Л., Козырев С.К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. – М.: Энергоиздат, 1981. – 192 с.
13. Иванов В. С., Соколов В. И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
14. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
15. Исследование существующих систем распределения электроэнергии напряжением до 1кВ с целью их оптимизации // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2000. – №3.
16. Кабышев А. В. Компенсация реактивной мощности в электростанциях промышленных предприятий / А. В. Кабышев. – Томск: Томский политехнический университет, 2012. – 234 с.
17. Кашкалов В.И., Половинкин Б.И. Улучшение энергетических показателей управляемых выпрямителей. – К.: Техніка, 1988. – 159 с.
18. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / Под ред. В.М. Перельмутера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
19. Коновалова Л.А., Рожкова Л.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528с.
20. Красник В.В. Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
21. Лютаевич, А. Г. Оценка эффективности использования активного фильтра гармоник в системах электроснабжения / А. Г. Лютаевич, С. Ю. Долингер // Омский научный вестник. – 2010. – № 1. – С. 133–136.
22. Минин Г.П. Реактивная мощность. – М.: Энергия, 1978. – 88 с.

23. Мукосеев Ю.Л. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1973. – 584 с.
24. Проектирование электроприводов. Справочник / Под ред. А. М. Вейнгера. – Свердловск.: Средне-Уральское кн. изд-во, 1980. – 160 с.
25. Саенко Ю. Л. Реактивна потужність в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями/ Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: Спеціальність 05.09.05. – 2003. – 20 с.
26. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2т. Т.1. Электроснабжение / Под общ. ред. А.А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.
27. Статические компенсаторы реактивной мощности в электрических системах: Пер. тематического сб. рабочей группы Исследовательского Комитета №38 СИГРЭ / Под ред. И.И. Карташева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 174 с.
28. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок: Пер. с польск. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
29. Хохлов Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – 355 с.