

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра електрифікації, автоматизації
виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Карпушенка Олександра Геннадійовича

УДК 620.93

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз стану споживання реактивної потужності в сільських
енергетичних мережах та рекомендації щодо способів їх компенсації

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

_____ Карпушенко О.Г.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
Сукманюк Олена Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к. іст. н., доц.

(науковий ступінь, вчене звання)

АНОТАЦІЯ

Карпушенко О. Г. Аналіз стану споживання реактивної потужності в сільських енергетичних мережах та рекомендації щодо способів їх компенсації. – 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 компенсації реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств. Запропоновано регулювання коефіцієнта потужності та перевірено дану можливість на фізичній та імітаційній моделях. Встановлено можливість застосування на низькій стороні ПС 110/10 кВ.

Ключові слова: реактивна потужність, компенсація, модель, коефіцієнт потужності.

SUMMARY

Karpushenko O. G. «**Analysis of the state of reactive power consumption in rural energy networks and recommendations on ways to compensate for them.**» – Manuscript.

Master's work for Master «Master» specialty 141 «Electric power, electrical engineering and electromechanics». Polyssya National University, Zhytomyr, 2020.

The issue of reactive power compensation in power supply systems of industrial enterprises is considered. Power factor control is offered and this possibility is tested on physical and simulation models. The possibility of application on the low side of the 110/10 kV substation has been established.

Keywords: reactive power, compensation, model, power factor.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПЕРЕДОВИХ ЗАКОРДОННИХ І ВІТЧИЗНЯНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І РІШЕНЬ	5
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОРЕКТОРА КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ	14
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОРЕКТОРА КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ	20
ВИСНОВКИ.....	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	30

ВСТУП

Актуальність досліджень: Протяжні електричні мережі і великі навантаження підприємств сприяють втратам електричної енергії (близько 40%) при її транспортуванні. Ефективність використання виробленої на електростанції енергії на пряму залежить від втрат в лініях і обладнанні [1, 2 10]. Знизити втрати можливо при зменшенні реактивної складової в лініях, при умові її компенсації в місці споживання [3, 4].

Існує безліч місць в енергосистемах, в яких електрообладнання працює з низьким коефіцієнтом потужності, тому питання управління компенсацією реактивної потужності в системах електропостачання є одним з найважливіших напрямків досліджень [4, 9, 10].

Засоби компенсації реактивної потужності – це пристрої, що розміщуються в мережах високої напруги і призначені для управління режимами роботи електричної енергії в нормальних, аварійних і після аварійних режимах електроенергетичних систем і мереж. Основним їх призначенням є підвищення якості електропостачання. Останнім часом у зв'язку з появою високотехнологічних виробництв і безперервних технологічних процесів з високими вимогами до якості електропостачання в світі спостерігається тенденція до посилення вимог до якості виробленої і споживаної електроенергії [3, 4, 6].

Метою досліджень є аналіз застосування керованих електромагнітних пристроїв для оптимізації режимів роботи електричних мереж.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- здійснити порівняльну характеристику регульованих електромагнітних пристроїв, їх конструкції і області застосування;
- провести порівняльний аналіз компенсуючих пристроїв і способів компенсації і вибрати оптимальний для підприємства.

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

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

Методи досліджень: перевірка фізичної моделі проводилася з використанням пакета Simulink (додаток MatLab).

– перелік публікацій автора за темою дослідження/

Перелік публікацій за темою досліджень:

1. Савченко К. Л., Карпушенко О. Г. Аналіз методів та технічного забезпечення компенсації реактивної потужності : зб. праць Другої Міжнародної науково-практичної конференції «Priority directions of science and technology development», 22 – 24 листопада 2020 року, Київ, Україна.

2. Савченко К. Л., Карпушенко О. Г. Передові технологічні рішення проблеми компенсації реактивної потужності / Дев'ята Міжнародна науково-практична конференція «Science and practice», 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.

Практичне значення отриманих результатів: проведені дослідження існуючих і перспективних джерел реактивної потужності для промислових підприємств, дозволяють вибирати на першій стадії проектування оптимальні варіанти корекції коефіцієнта потужності.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПЕРЕДОВИХ ЗАКОРДОННИХ І ВІТЧИЗНЯНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І РІШЕНЬ

В даний час в системах електропостачання основна частина пристроїв на промислових підприємствах споживає реактивну потужність. Реактивна потужність характеризує електричну енергію, не спожиту у зовнішньому колі, а таку, що коливається між зовнішнім колом і джерелом, тобто ємнісну і індуктивну енергію, що накопичується тимчасово, а після накопичення віддається джерелу [2]. На виробництво реактивної енергії паливо практично не витрачається. Однак ця «обмінна» енергія завантажує електричні мережі, віднімаючи деяку частину пропускну здатності і приводячи до додаткових втрат активної енергії.

Одним із методів усунення даної проблеми є раціональне розміщення джерел реактивної енергії (асинхронних двигунів, трансформаторів, випрямлячів та ін.), що призводить до розвантаження мереж від реактивного струму і повністю усуває негативний вплив реактивної енергії і є метою компенсації індуктивної реактивної потужності. Реактивна енергія легко може вироблятися за допомогою конденсаторних установок безпосередньо на місцях, де вона потрібна. Практика такого виробництва реактивної енергії широко поширена в усьому світі і відома як компенсація реактивної потужності.

Правильна компенсація реактивної потужності дозволяє: знизити загальні витрати на електроенергію; зменшити навантаження елементів розподільної мережі (підвідних ліній, розподільчих пристроїв і трансформаторів), завдяки чому продовжується їх термін служби; знизити несиметрію фаз; знизити вплив вищих гармонік; знизити теплові втрати струму; придушити мережеві перешкоди, домогтися більшої надійності і економічності розподільчих мереж [4, 7, 14]. Крім того, в існуючих електричних мережах: виключити генерацію реактивної енергії в мережу в години мінімального навантаження; знизити витрати на ремонт і оновлення парку електрообладнання; збільшити пропускну здатність системи електропостачання споживача, що дозволить підключити

додаткові навантаження без збільшення вартості мереж; забезпечити отримання інформації про параметри і стан мережі, а у новостворених мережах – зменшити потужність підстанцій і перетину кабельних ліній, що знизить їх вартість[4, 7, 14, 15].

Компенсація реактивної потужності – одне з найбільш доступних, ефективних і простих способів зниження втрат електроенергії як для споживача, так і для електропостачальної компанії, а також зниження собівартості продукції, що випускається її виробниками. Знизити споживання реактивної потужності, а, отже, і втрати активної потужності, можна такими способами: без застосування компенсуючих пристроїв (КП); із застосуванням КП; такими, які допускаються як виняток [9, 14, 15, 16].

Для компенсації реактивної потужності в енергосистемах застосовуються:

- конденсаторні установки (КУ);
- синхронні двигуни (СД);
- синхронні компенсатори (СК);
- активні коректори потужності (АКП).

У зв'язку з тим, що споживання електроенергії носить динамічний характер і може за досить короткий проміжок часу змінюватися в істотному діапазоні, то, відповідно, буде змінюватися і співвідношення активної споживаної енергії до повної, тобто $\cos(\varphi)$. Причому, $\cos(\varphi)$ тим менше, чим менше активне навантаження будь-якого індуктивного споживача (асинхронного двигуна, трансформатора) [10, 11, 12]. З цього випливає, що для компенсації реактивної потужності необхідний певний набір обладнання, який може забезпечити адекватне регулювання $\cos(\varphi)$ в режимі реального часу і залежно від змінних режимів роботи обладнання установка корекції коефіцієнта потужності з допоміжним обладнанням у вигляді комутаційної апаратури [3, 4].

КУ можуть бути регульованими і нерегульованими. Нерегульовані більш дешеві і прості у виконанні, проте, через зміну коефіцієнта потужності в

залежності від навантаження, можуть викликати надмірне підвищення $\cos(\varphi)$ і підвищення напруги на конденсаторах. Регульовані дозволяють регулювати вироблювану реактивну потужність в динамічному режимі.

На рис. 1.1 а показаний ефект регулювання КУ по реактивній потужності, а на рис. 1.1 б – установки, що складається з декількох секцій. Як видно з рис. 1.1 а, реактивна потужність зменшується пропорційно квадрату напруги від $Q_{\text{ном}}$ до Q_{min} . За умови зниження напруги від $U_{\text{ном}}$ до U_{min} .

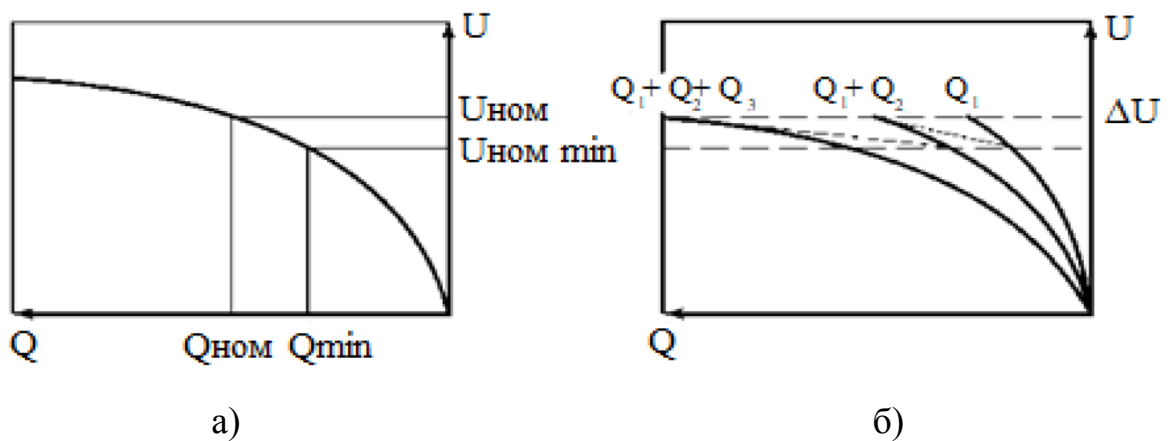


Рисунок 1.1 – Статичні характеристики конденсаторної установки [12]:
а – що складається з однієї секції; б – що складається з трьох секцій.

Цей недолік виправляється формуванням конденсаторної батареї (КБ) з декількох секцій, що підключені до мережі кожна через свій вимикач і кожна з яких управляється регулятором напруги і/або потужності, збільшуючи загальну ємність батареї. При цьому знижується напруга і зростає сумарна потужність батареї. Для КУ, що складається з трьох секцій КБ зростання ступенями $Q_1 + Q_2 + Q_3$, $Q_1 + Q_2$, Q_1 спостерігається при зниженні напруги, як показано на рис.1.1 б для КУ.

Високовольтні КУ складаються із включених послідовно та паралельно однофазних конденсаторів K . Для вимірювання струму і напруги в схему підключені трансформатори струму TA і напруги TV . Високовольтний вимикач Q призначений для відключення схеми від енергосистеми (рис. 1.2).

У конденсаторних батареях є недоліки:

- неможливість плавного регулювання реактивної потужності, а отже, і напруги установки;
- недостатня електрична міцність;
- залежність потужності конденсаторних батарей від квадрата напруги мережі;
- короткий термін служби.

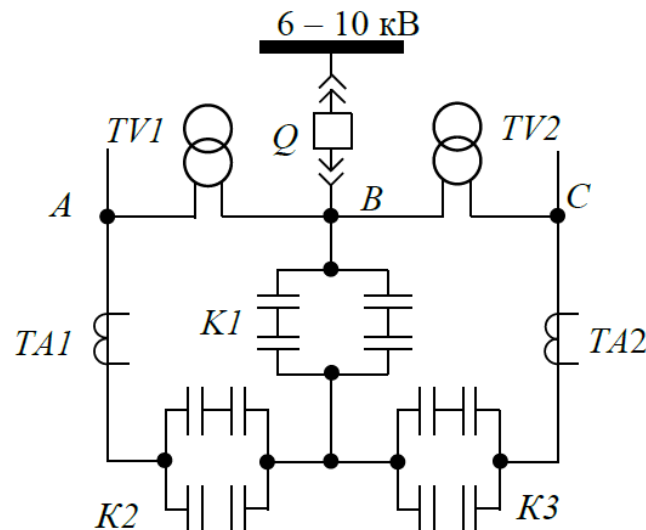


Рис. 1.2 – Принципова схема однієї трифазної секції КУ, призначеної для мереж 6-10 кВ [12]

До недоліків також можна віднести високу пожежонебезпеку, присутність залишкового розряду і схильність до КЗ і перенапруження, а також залежність реактивної потужності, що віддається, від підведеної напруги. Так само на КУ сильно впливає наявність в мережі вищих гармонік. При наявності таких гармонік необхідна перевірка ймовірності перевантаження КБ по струму при резонансах або ж близьких до таких режимів і потрібно передбачати заходи з ліквідації резонансних явищ. Основною перевагою КБ є простота в монтажі та експлуатації, низькі капітальні затрати.

Синхронні двигуни (СД) виробляють реактивну потужність при збільшенні струму збудження понад номінальне значення. З цієї причини, можливо їх використання в якості засобу компенсації реактивної потужності. Основна відмінність СД від асинхронного двигуна (АД) в тому, що магнітне

поле, необхідне для роботи СД, створюється по більшій частини окремим джерелом постійного струму (збудником). Саме тому у СД в нормальному режимі роботи (при $\cos(\varphi)=1$) практично відсутнє споживання з мережі реактивної потужності, потрібної для створення головного магнітного потоку, а в режимі перезбудження, тобто при роботі електричної машини з випереджаючим коефіцієнтом потужності, відбувається генерування потужності ємнісного характеру в мережу [4, 6].

СД зазвичай розраховуються на випереджаючий коефіцієнт потужності $\cos(\varphi)=0,9$ і при номінальній напрузі $U_{НОМ}$ і активному навантаженні $P_{НОМ}$ здатні виробляти номінальну реактивну потужність:

$$\int Q_{НОМ} \approx 0,5P_{НОМ} \cdot \quad (1.1)$$

Головною перевагою синхронних двигунів, що застосовуються для компенсації реактивної потужності, в порівнянні з конденсаторними батареями, є можливість плавно регулювати реактивну потужність, що генерується.

Недолік полягає в тому, що активні втрати на генерування реактивної потужності для синхронних двигунів більші, ніж для конденсаторних батарей, через залежності від квадрата потужності СД, що виробляється.

Найчастіше в системах електропостачання реактивну потужність основної частини графіка навантажень компенсують конденсаторні батареї, а синхронні двигуни використовуються для зниження піків графіка навантажень.

Синхронні компенсатори (СК) є різновидом синхронних двигунів. Це по суті, є синхронні двигуни полегшеної конструкції з меншими розмірами і масою, на валу яких немає навантаження. Пуск СК зазвичай реалізується в асинхронному режимі. В даний час випускаються СК потужністю понад 5 МВАр, але їх застосування обмежене мережами промислових підприємств і дуже рідкісним використанням для поліпшення показників якості напруги у потужних приймачів електричної енергії з різкозмінним ударним навантаженням (прокатні стани, дугові печі і т.п.). при великому дефіциті реактивної потужності в точці підключення споживачів, коли потрібно плавно і

швидкодіюче регулювання напруги, а також необхідний запас по реактивній потужності, виявляється вигідним впровадження СК [5, 6].

Потужність, яку здатний віддати синхронний компенсатор:

$$Q_{СК} = U_c \cdot \frac{U_c - E_q}{X_d}, \quad (1.2)$$

де: E_q – ЕРС в точці підключення СК;

U_c – напруга мережі;

X_d – опір мережі.

Знак і величина реактивної потужності синхронного компенсатора визначаються співвідношенням E_q і U_c . E_q залежить від струму збудження, причому збільшенню струму збудження відповідає зростання значення ЕРС. Якщо значення напруги мережі і ЕРС в точці підключення СК збігаються, то реактивна потужність, що генерується, буде дорівнює нулю. При збудженні в мережу генерується реактивна потужність. Струм, вироблений синхронним компенсатором, випереджає напругу на 90° . У режимі недозбудження струм СК відстає від напруги на 90° і здійснюється споживання реактивної потужності з мережі. Номінальна потужність СК вказана при роботі в режимі перезбудження. У режимі недозбудження споживана потужність дорівнює половині номінальної внаслідок конструктивних особливостей, обмежених нагріванням обмоток. СК при роботі споживає 2-4 % активної потужності від номінальної реактивної. Споживання синхронним компенсатором реактивної енергії призводить до зростання втрат напруги в мережі і зменшення величини напруги у приймачів електроенергії. Це використовується для зниження напруги в періоди малих навантажень. Синхронні компенсатори застосовують не тільки у кінцевих споживачів, але також і для стабілізації напруги в мережі при передачі електроенергії на великі відстані.

При використанні СК в режимі неповного збудження спільно з паралельно підключеними конденсаторними батареями підвищується $\cos\varphi$ мережі і разом з цим регулюється напруга, оскільки конденсаторні батареї

компенсують зменшення напруги синхронними компенсаторами і можуть лише виробляти реактивну потужність. Однак в періоди малих навантажень частина КБ повинна відключатися, щоб величина напруги не перевищувала допустимого значення [5, 6].

До недоліків СК відносяться:

- підвищені втрати активної потужності; великі маса і вібрація, через що синхронні компенсатори необхідно встановлювати на масивних фундаментах;
- необхідність застосування водневого або повітряного охолодження з водяними охолоджувачами;
- необхідність постійного чергування експлуатаційного персоналу на підстанціях з синхронними компенсаторами;
- неможливість (на відміну від КУ) нарощування потужності в процесі росту навантажень [5, 6].

Активні коректори коефіцієнта потужності (ККП) являють собою проміжну ланку між імпульсним джерелом живлення і перетворювачем напруги. Призначення полягає в активній фільтрації імпульсного характеру струму мережі. ККМ зменшує фазовий зсув між напругою і струмом від джерела і формує синусоїдальну форму струму, спожитого з мережі [10, 17].

ККП широко поширені в однофазних джерелах живлення побутової та промислової апаратури. ККП не застосовують в багатofазних промислових установках, так як вони не забезпечують рекуперацію енергії [6].

Висновок по розділу:

В даний час існує декілька способів компенсації реактивної потужності. Найбільш простий і універсальний - застосування КУ. Виробники пропонують широкий вибір комплектних КУ, які при правильній експлуатації виконують своє завдання. Застосування СК виправдано в рідкісних випадках.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОРЕКТОРА КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ

Будь-який коректор може працювати в режимі переривчастого і безперервного струму дроселя, а також в граничному режимі. Найпростіша реалізація коректора коефіцієнта потужності являє собою діодний міст VD1..VD4, що є випрямлячем, напруга з якого надходить на дросель малої індуктивності L і блокується діодом VD5. Конденсатор, який забезпечує зсув випрямленого струму щодо напруги, вмикається і вимикається керованим транзисторним ключем (рис. 2.1) [5].

У запропонованому коректорі, функціональна схема якого представлена на рис. 2.1, напруга на виході мостового випрямляча являє собою половину синусоїди однієї полярності (лінія 1 на рис. 2.2) і контролюється ДВН.

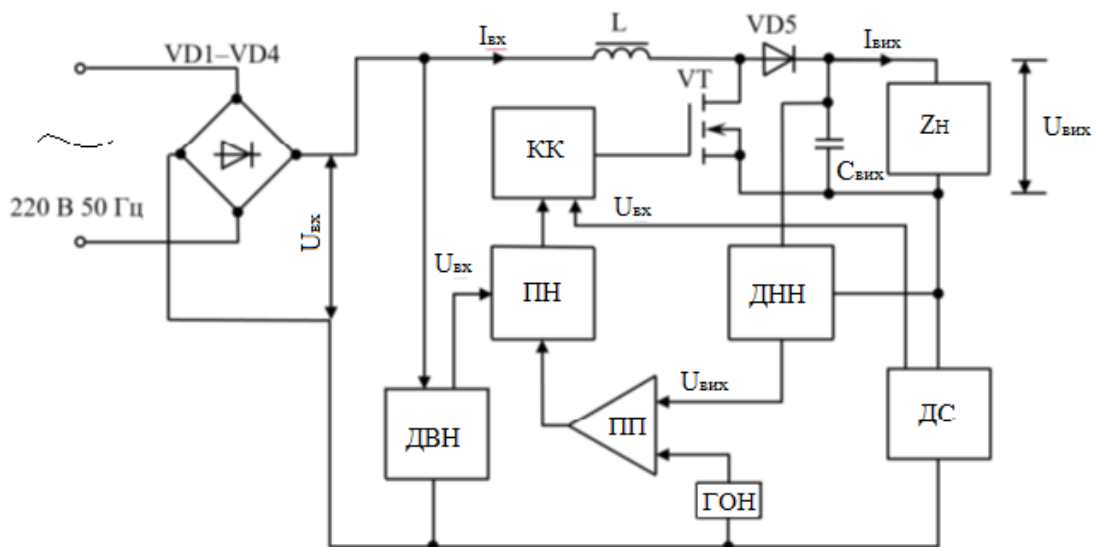


Рисунок 2.1– Схема активного коректора коефіцієнта потужності:

ДВН – датчик вхідної напруги; КК – керуючий каскад; ПН – помножувач напруги; ПП – підсилювач помилки; ДС – датчик струму; ГОН – генератор опорної напруги; ДНН – датчик напруги навантаження.

Після перемикання керуючим каскадом ключового транзистора в провідний стан струм в індуктивності L починає лінійно наростати. Датчик

струму вимірює значення I_{ex} і перетворює цю величину в сигнал U_{ex} (крива 2 на рис. 2.3).

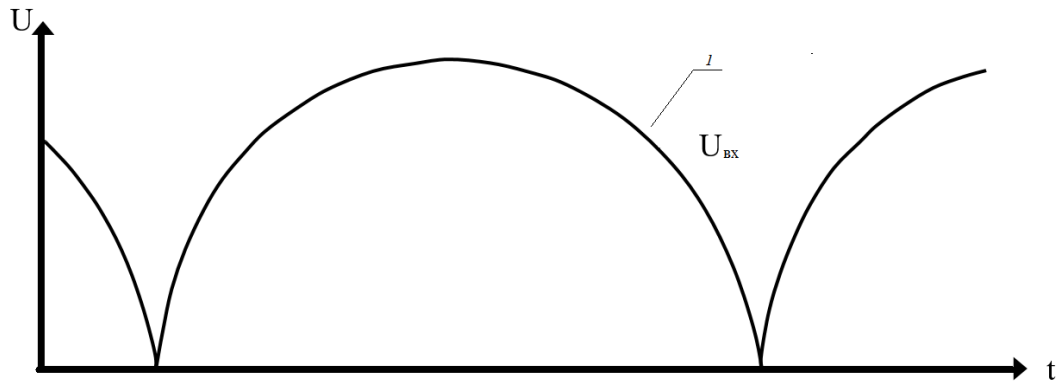


Рисунок 2.2 – Графік вхідної напруги

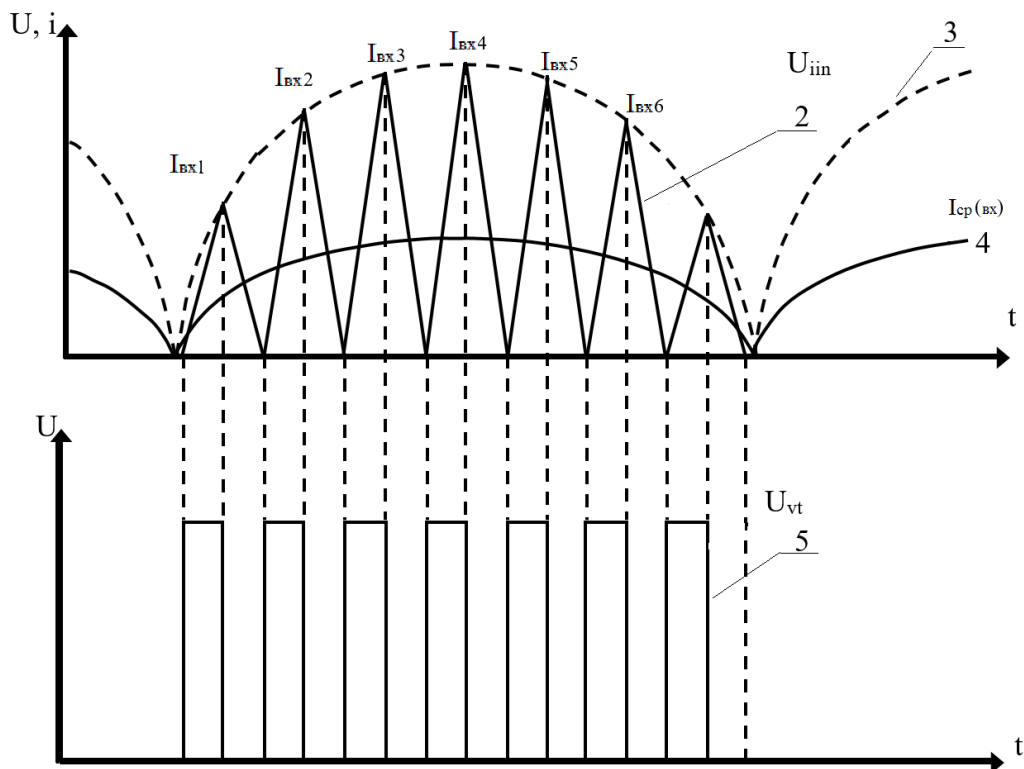


Рисунок 2.3 – Графіки, що відображають проходження процесів в активному коректорі коефіцієнта потужності

Величина L вибирається так, щоб забезпечувати більш швидке наростання струму щодо напруги. КК закриває транзистор VT в той момент часу, коли значення напруги на ДС досягає величини напруги на ДВН, при цьому спадає струм в первинному ланцюзі. При падінні струму в первинному ланцюзі до нульового значення керуючим каскадом подається сигнал на відкриття транзистора VT , надалі процес повторюється.

Лінія 3 на рис. 2.3 проходить через дійсні значення струму в ланцюзі ($I_{вх1}$, $I_{вх2}$, $I_{вх3}$), повторюючи за формою напругу на вході. Крива 4, що проходить через середні значення струму в первинному ланцюзі має форму, характерну для активного навантаження. Реально споживаний струм має вигляд повторюваних імпульсів змінної амплітуди (лінія 5 на рис. 2.3).

Вид сигналів при безперервному струмі дроселя зображений на рис 2.4.

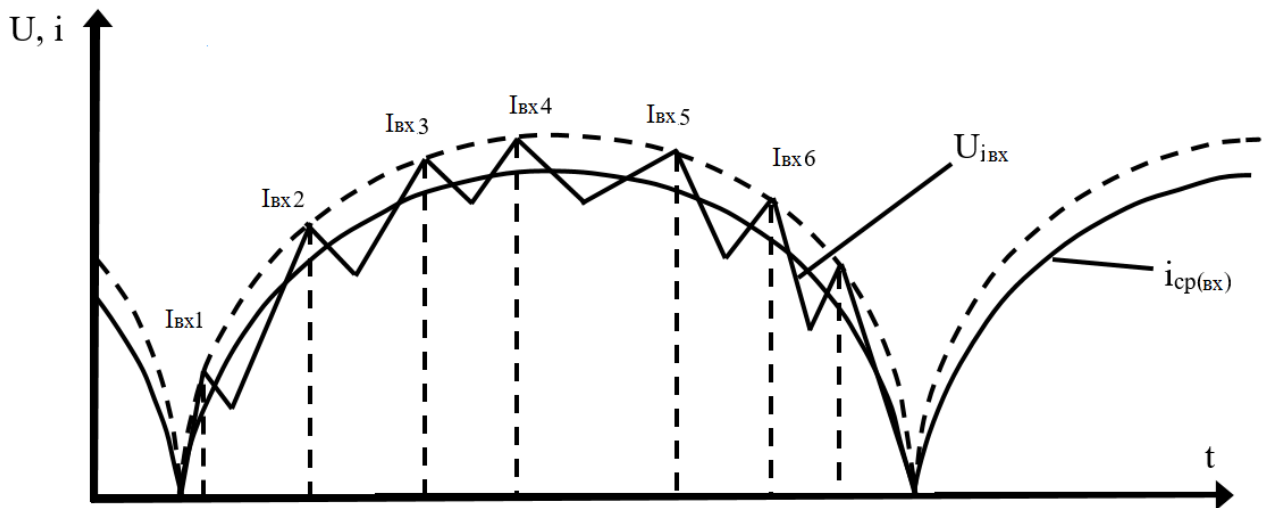


Рисунок 2.4 – Графік роботи активного коректора коефіцієнта потужності при безперервному струмі дроселя

Між відключеннями транзистора VT струм в дроселі L не досягає нульового значення, тому середнє значення $I_{cp(вх)}$ виявляється ще ближче до форми синусоїдального сигналу, ніж в режимі розривних струмів.

Недолік схеми в тому, що необхідна стабілізація напруги в навантаженні коректора, так як на вході випрямляча відсутня фільтр для забезпечення коефіцієнта потужності, близької до одиниці. Зміна вхідної напруги $U_{вх}$ через коливання напруги мережі тягне за собою зміну середнього струму в навантаженні, отже, змінюється вихідна напруга $U_{вих}$.

Напруга на виході залежить від опору, тому що спад струму в індуктивності L буде проходити повільніше або швидше. Підсилювач помилки ПП спільно з датчиком напруги навантаження ДНН утворюють систему відстеження вихідної напруги коректора (рис. 2.1).

На виході датчика знімається напруга, яка пропорційна напрузі навантаження $U_{вих}$. Помножувач напруг ПН перемножує сигнали $U_{вх}$ і $U_{вих}$. Транзистором VT управляє сигнал з ПН. Поріг перемикання транзистора регулюється для утримування постійної напруги на навантаженні.

Пікове значення струму дроселя в граничному режимі представляє:

$$I_{BX} = \frac{(U_{ВИХ} - U_{ВХ})(1 - D)}{L \cdot f}, \quad (2.1)$$

де: $U_{ВИХ}$ – напруга на виході коректора, або напруга навантаження;

$U_{ВХ}$ – випрямлена напруга на вході коректора;

D – скважність керуючих сигналів;

L – величина індуктивності;

f – частота перетворення.

Коректор працює в режимі автогенерації при змінній частоті перетворення f і шпаруватості керуючих сигналів. Тому для розрахунків в опорної частоти приймається середня частота, яка вказується як рекомендована для розрахунків. Значення цієї частоти знаходиться в технічній документації на конкретну мікросхему.

Із (2.1) отримаємо, що:

$$L = \frac{(U_{ВИХ} - U_{ВХ}) U_{ВХ}}{I_{ВХ} \cdot f \cdot U_{ВИХ}}, \quad (2.2)$$

виходячи з того, що $\frac{U_{ВХ}}{U_{ВИХ}} = 1 - D$.

ККМ апроксимує форму споживаного струму до синусоїдальної, тому можна пов'язати напругу і струм в навантаженні з напругою і струмом мережі через споживану потужність, після чого розрахувати значення індуктивності.

Використовується така розрахункова формула:

$$P_{ВИХ} = \frac{U_{ВХ} \cdot I_{ВХ}}{2} = U_{ВИХ} \cdot I_{ВИХ} \cdot \quad (2.3)$$

Остаточню:

$$L = \frac{U_{ВХ}^2 \cdot I_{ВХ}}{4P_{ВИХ} \cdot f} \left(1 - \frac{U_{ВХ}}{U_{ВИХ}}\right) \cdot \eta. \quad (2.4)$$

де η – ККД коректора, що дорівнює 0,9...0,95.

Вираз (2.4) використовується для розрахунку індуктивності в режимі розривних струмів. Збільшення величини індуктивності переведе коректор в режим нерозривних струмів. При цьому необхідно врахувати наявність максимального струму дроселя (I_{max}), а також амплітуди коливань струму дроселя (ΔI_{ex}), яка приймається в розмірі 40 % від максимуму. Для режиму безперервного струму дроселя величина індуктивності обчислюється за формулою:

$$L = 1,75 \frac{U_{BX}^2}{P_{ВІХ}} \cdot \frac{1}{f} \left(1 - \frac{U_{BX}}{U_{ВІХ}} \right) \cdot \eta. \quad (2.5)$$

Максимальний струм в індуктивності, що враховується в конструктивному розрахунку дроселя визначається за формулою:

$$I_{max} = 1,7 \frac{P_{ВІХ}}{U_{BX}} \frac{1}{\eta}. \quad (2.6)$$

Значення ємності конденсатора $C_{вих}$ визначається виходячи з умови обмеження амплітуди коливань напруги $U_{вих}$. Для цього необхідно задати амплітуду коливань вихідної напруги $\Delta U_{вих}$ і провести розрахунки за формулою:

$$C_{ВІХ} \geq \frac{P_{ВІХ}}{2\pi \cdot f_{BX} \cdot U_{ВІХ} \Delta U_{ВІХ}}. \quad (2.7)$$

де f_{ex} – вхідна частота коректора, яка складає 50 Гц.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОРЕКТОРА КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ

Коректор коефіцієнта потужності (рис. 3.1) досліджується за допомогою:

1. Модуля «Мультиметри», що складається з двох цифрових приладів Mastech M890, які надають можливість вимірювати напругу, струм, ємність конденсаторів, величину опору.

2. Модуля вимірювального, що складається з двох амперметрів постійного струму магнітоелектричної системи типу M42300 з межею вимірювання 2 А, одного амперметра змінного струму електромагнітної системи типу EA0700 з межею вимірювання 1 А і вольтметра змінного струму типу Ц42300 з межею вимірювання 0...250 В.

3. Модуля «Вимірювач потужності», що призначений для вимірювання наступних параметрів електричного кола:

- дійсного значення напруги (TrueRMS) в діапазонах 0...30 В, 0...300 В;
- дійсного значення струму (TrueRMS) в діапазонах 0...0,2 А, 0...2 А;
- активної потужності в діапазоні 0...600 Вт;
- реактивної потужності в діапазоні 0...600 ВАр;
- повної потужності в діапазоні 0...600 ВА;
- частоти в діапазоні 5...200 Гц;
- $\cos(\varphi)$;
- кута зсуву фаз між струмом і напругою φ .

Дослідження проводилось по схемі (рис. 3.2) в режимі роботи некерowanego випрямляча, що працює на фільтр CI . Було знято покази осцилографа при $I_n=0,3$ А, $U_n=18,3$ В.

На схемі (рис. 3.2) видно, що наростання струму в мережі і на виході випрямляча відбувається з відставанням від напруги, крім того, через відключення фільтра $C\varphi$ присутні перешкоди на осцилограмі струму I_d . Струм являє собою повторювані імпульси, $\cos(\varphi)$ імпульсних джерел невисокий.

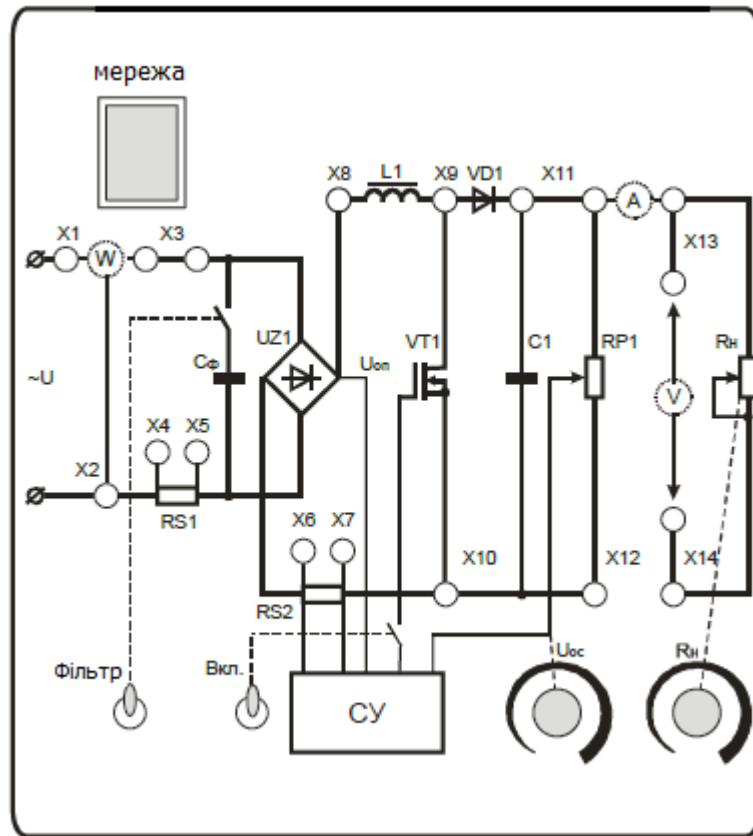


Рисунок 3.1 – Модуль коректора коефіцієнта потужності

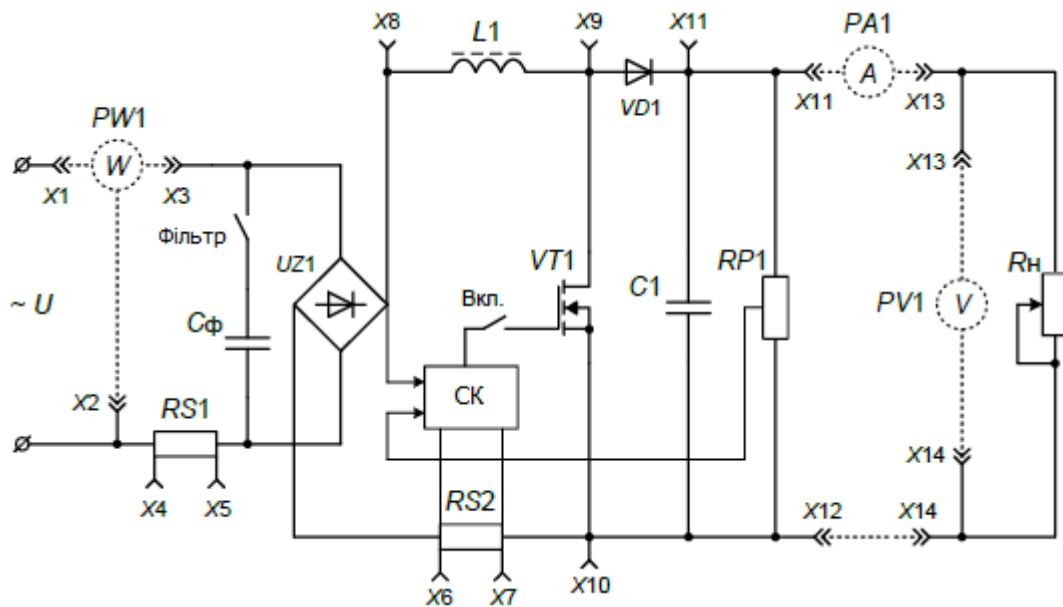


Рисунок 3.2 – Принципова схема для дослідження некерованого випрямляча з ємнісним фільтром

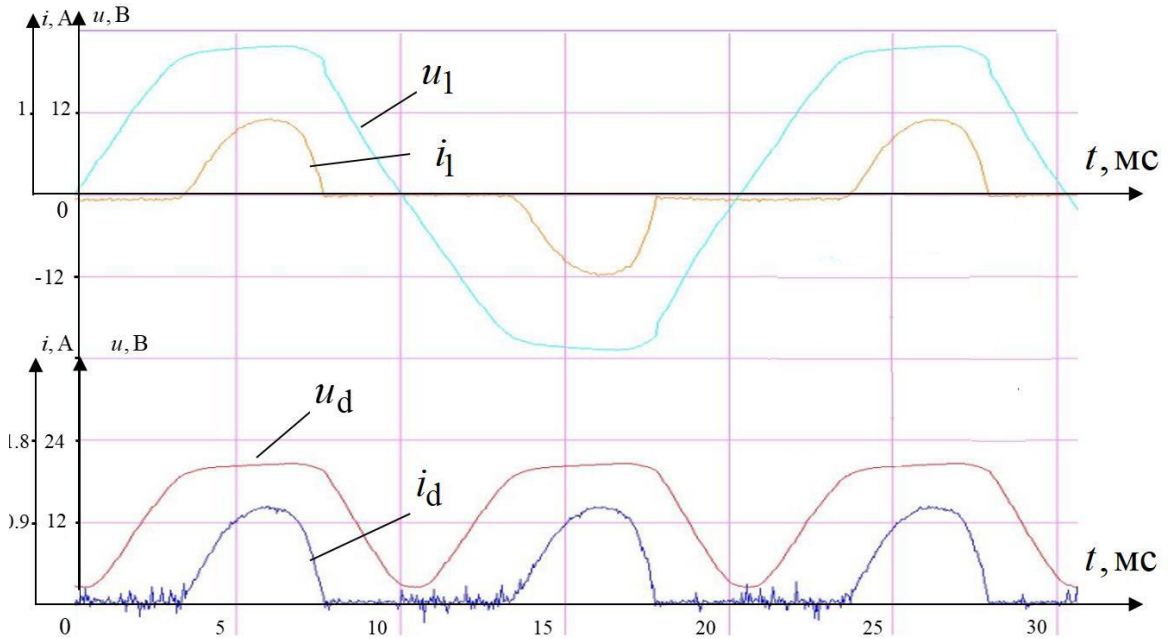


Рисунок 3.3 – Осцилограми випрямленої напруги u_d і випрямленого струму i_d , напруги u_1 і струму i_1 на вході ККП

На рис. 3.4 представлені енергетичні характеристики некерованого випрямляча, що працює на ємнісний фільтр.

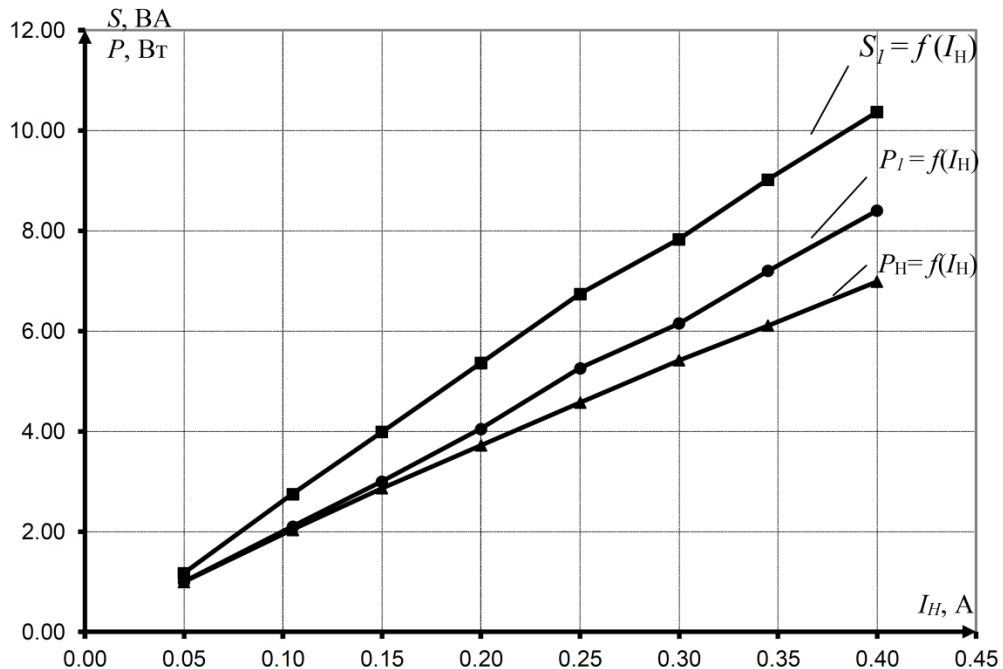


Рисунок 3.4 – Енергетичні характеристики $P_1 = f(I_H)$, $S_1 = f(I_H)$, $P_H = f(I_H)$, де P_1 – активна потужність мережі; S_1 – повна потужність мережі; P_H – активна потужність на навантаженні; I_H – струм навантаження.

На рис. 3.5 лінія залежності активної потужності від струму нижче ніж повної, що свідчить про наявність реактивної складової. Потужність на навантаженні менше потужності мережі через менше діюче значення напруги.

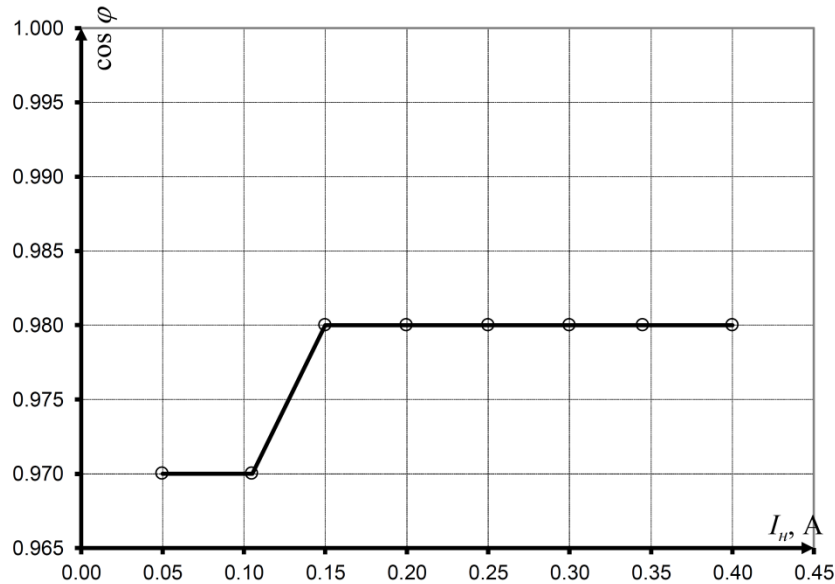


Рисунок 3.5 – Енергетичні характеристики $\cos(\varphi) = f(I_H)$

Коефіцієнт потужності $\cos(\varphi)$ зростає із збільшенням струму навантаження. Незважаючи на те, що $\cos(\varphi)$ має досить високе значення, близьке до 1, є можливість його підвищити. Після чого були зняті осцилограми в режимі: $I_H=0,5 A$, $U_H=25 B$ з включеною системою управління ККП. На рис. 3.6 наведені осцилограми випрямленої напруги u_d і випрямленого струму i_d , напруги u_l і струму i_l на вході ККП.

На рис. 3.6 середнє значення струму повторює форму напруги на вході ККП і на виході випрямляча. ККП працює в режимі безперервних струмів.

На рис. 3.7 представлені енергетичні характеристики некерованого випрямляча з включеною системою управління ККП.

Графіки залежності повної та активної потужності від струму майже збігаються. Активна потужність на навантаженні менше, оскільки значення випрямленої напруги нижче, ніж величина напруги до випрямляча.

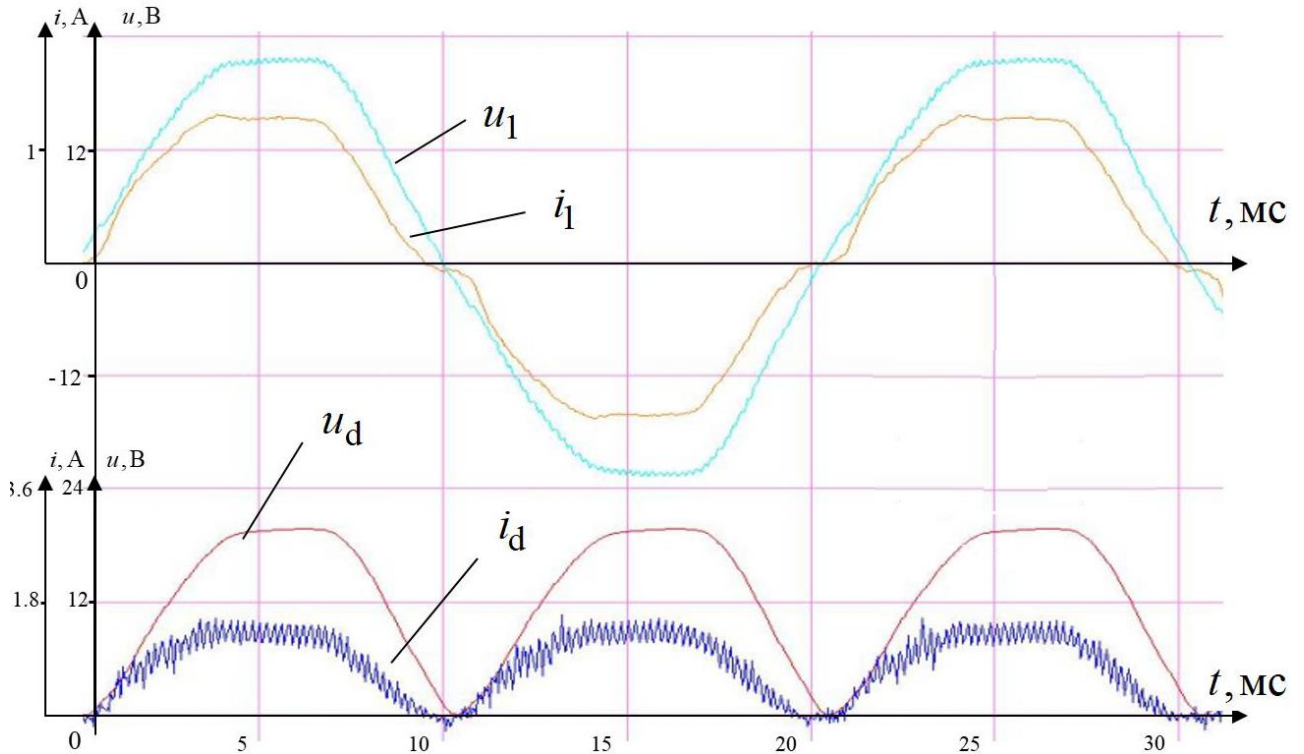


Рисунок 3.6 – Осцилограми випрямленої напруги u_d і випрямленого струму i_d , напруги u_1 і струму i_1 на вході ККП

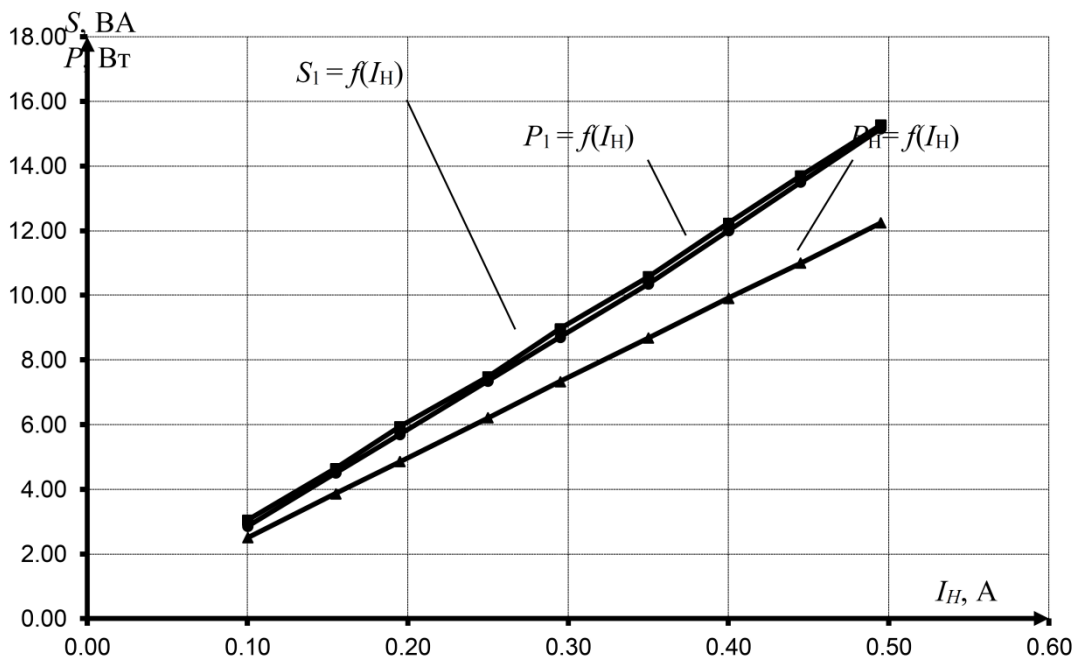


Рисунок 3.7 – Енергетичні характеристики $P_1 = f(I_H)$, $S_1 = f(I_H)$, $P_H = f(I_H)$, де P_1 – активна потужність мережі; S_1 – повна потужність мережі; P_H – активна потужність на навантаженні; I_H – струм навантаження.

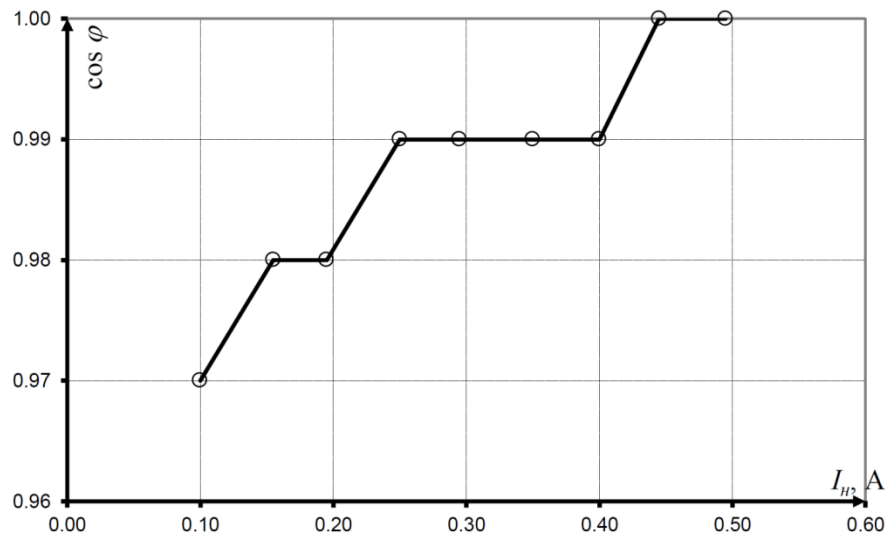


Рисунок 3.8 – Енергетичні характеристики $\cos(\varphi)$

З графіка (рис. 3.8) видно збільшення коефіцієнта потужності при включенні системи управління ККП. Форма і значення $\cos(\varphi)$ залежить від коефіцієнта пульсацій, який збільшується з підвищенням струму навантаження.

Перевірка фізичної моделі проводилася з використанням пакета Simulink (додаток MatLab), який дозволяє будувати графічні моделі тими ж способами, що і реальні фізичні моделі [18, 19].

Вихідні дані для схеми: потужність $P=15,8 \text{ Вт}$, вхідна напруга $U_{вх}=25 \text{ В}$, вихідна напруга $U_{вих}=23 \text{ В}$, $I_{вх}=9 \text{ А}$. Частота комутації $f=100 \text{ кГц}$, частота розрахункова $f_{вх}=50 \text{ Гц}$. Схема представлена рис. 3.9.

Параметри (рис. 3.9): UZ1 – діодний міст, що випрямляє вхідну напругу; RS1, RS2 – шунтувальні резистори; VT – транзистор, що створює комутацію; L1 – дросель малої індуктивності; VD1 – блокувальний діод, R_H – опір навантаження, S – вимірювач потужності. Блок «Мережа» – джерело змінної напруги 25 В, $C_{вих}$ – конденсатор фільтра, PID-controller U – пропорційно-інтегральний контролер контуру напруги, PID-controller I – пропорційно-інтегральний контролер контуру струму.

На рис. 3.10 спостерігається зміщення пікового значення струму щодо напруги внаслідок переважання індуктивної частини навантаження. При

коефіцієнті потужності, близькому до 0,96...1 струм має синусоїдальну форму і майже повторює напругу.

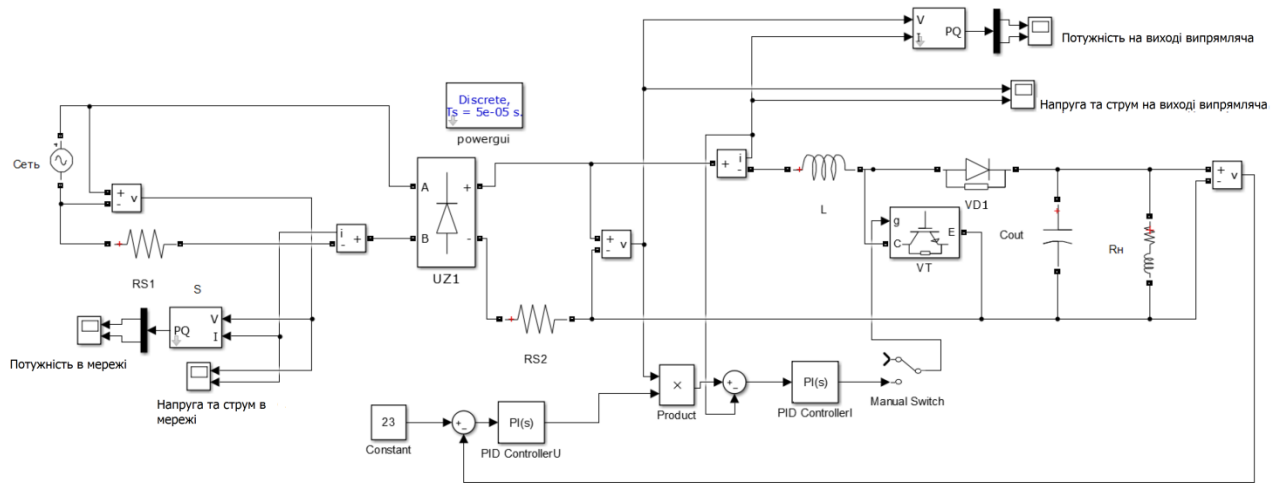


Рисунок 3.9 – Схема ККП в Simulink

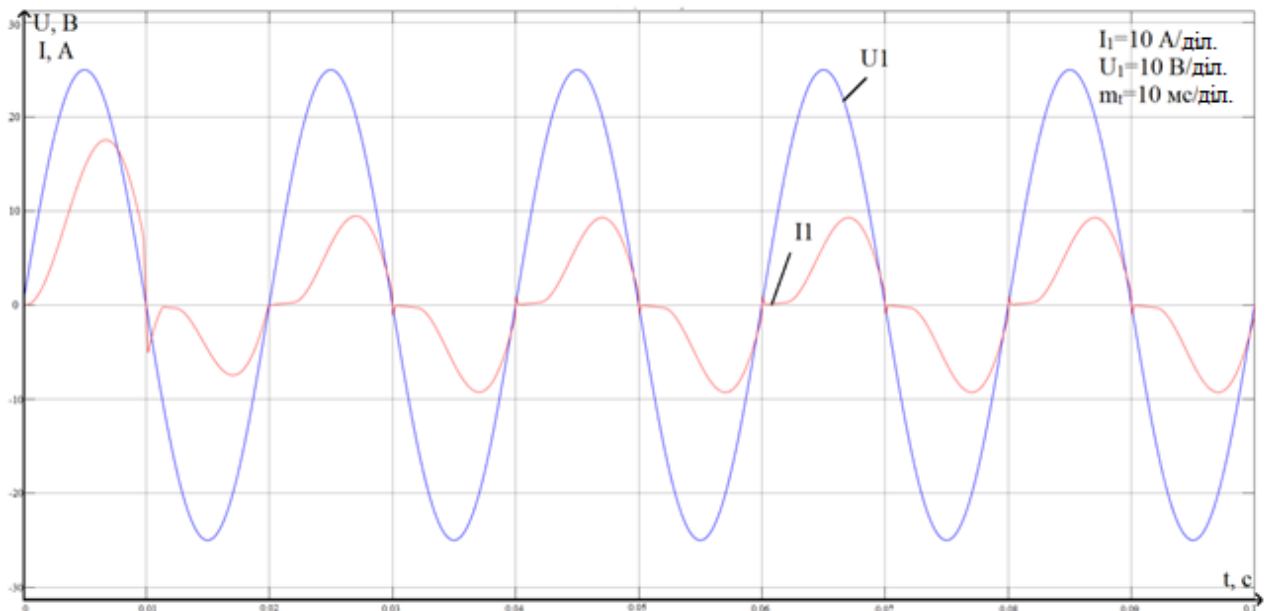


Рисунок 3.10 – Напруга (U_1) та струм (I_1) на вході ККМ

На рис. 3.11 зображені осцилограми споживаної з мережі потужності. Значення реактивної потужності Q_1 в сталому режимі роботи високе.

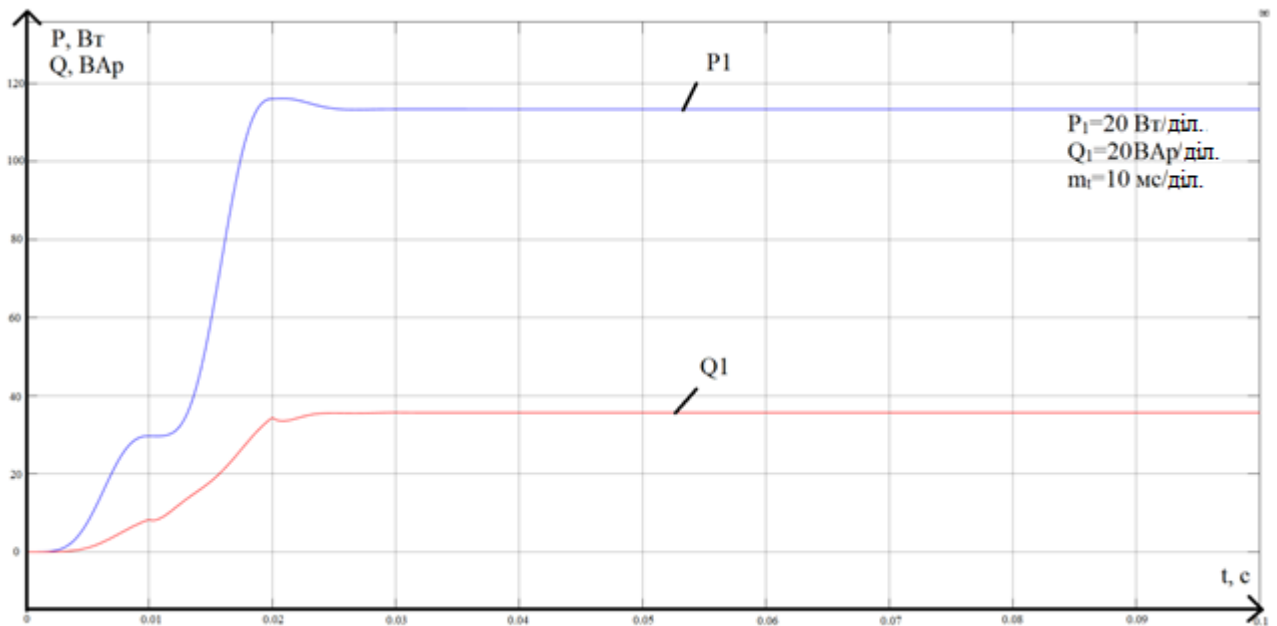


Рисунок 3.11 – Активна (P_1) і реактивна (Q_1) потужність на вході ККП

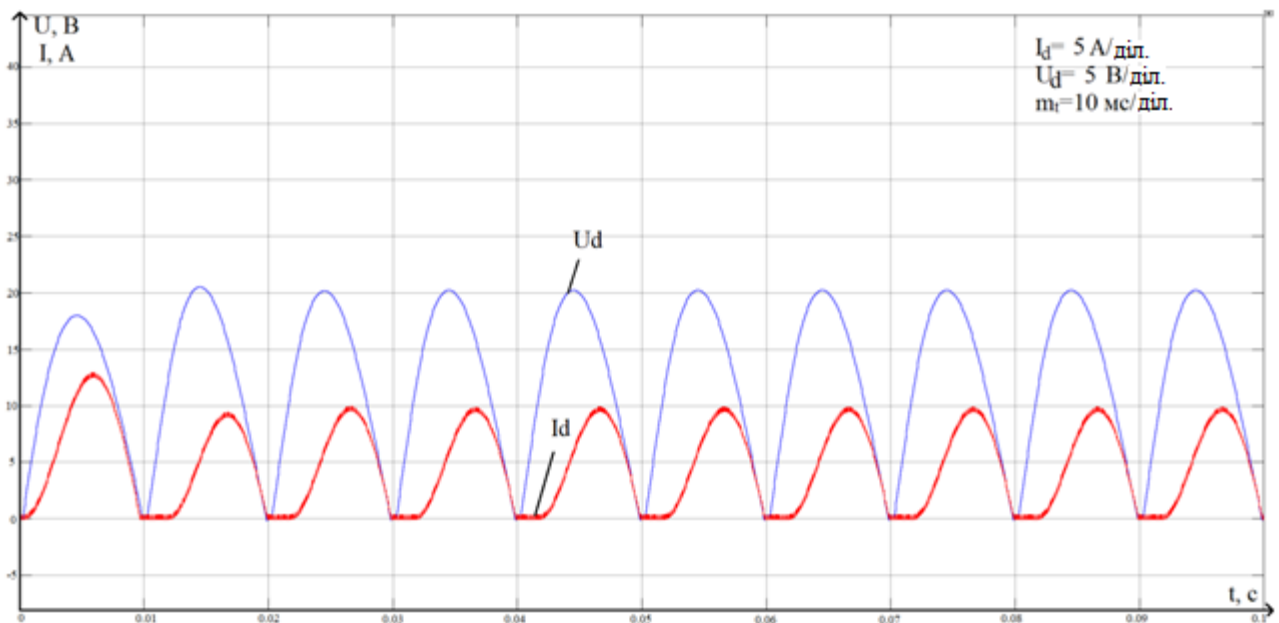


Рисунок 3.12 – Випрямлені напруга (U_d) і струм (I_d)

Випрямлені струм I_d і напруга U_d в сталому режимі повторюють входні параметри.

Негативні ділянки на рис. 3.13 характеризують передачу активної P_H і реактивної Q_H потужності в мережу.

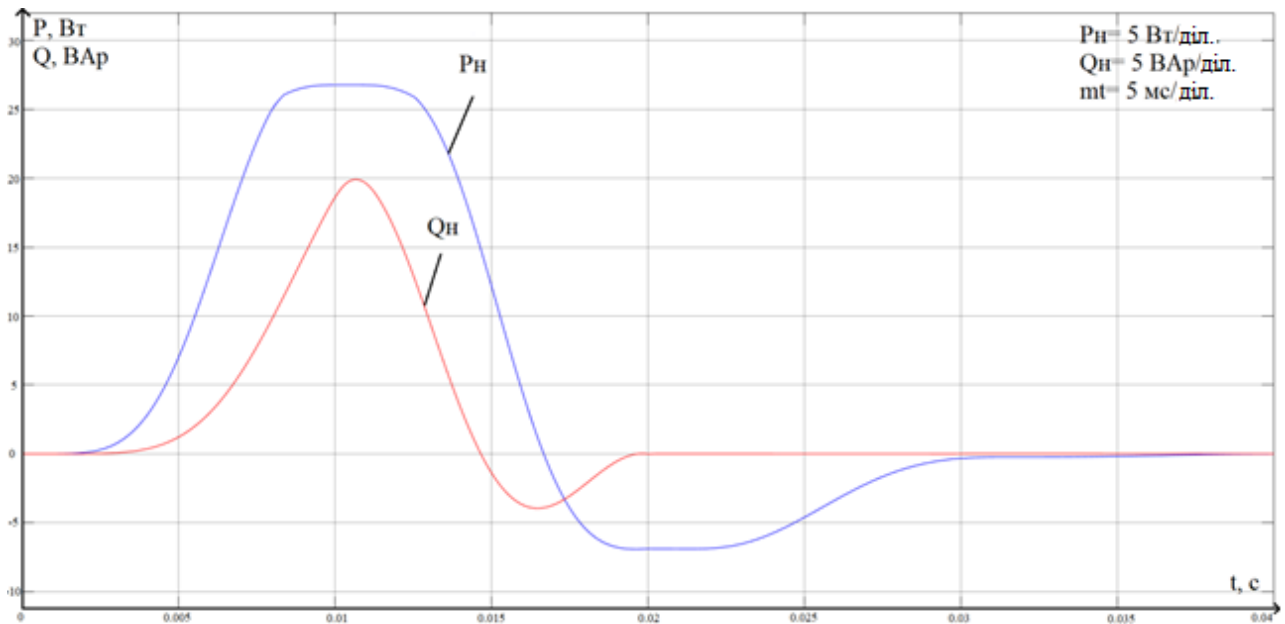


Рисунок 3.13 – Активна (P_H) і реактивна (Q_H) потужність навантаження

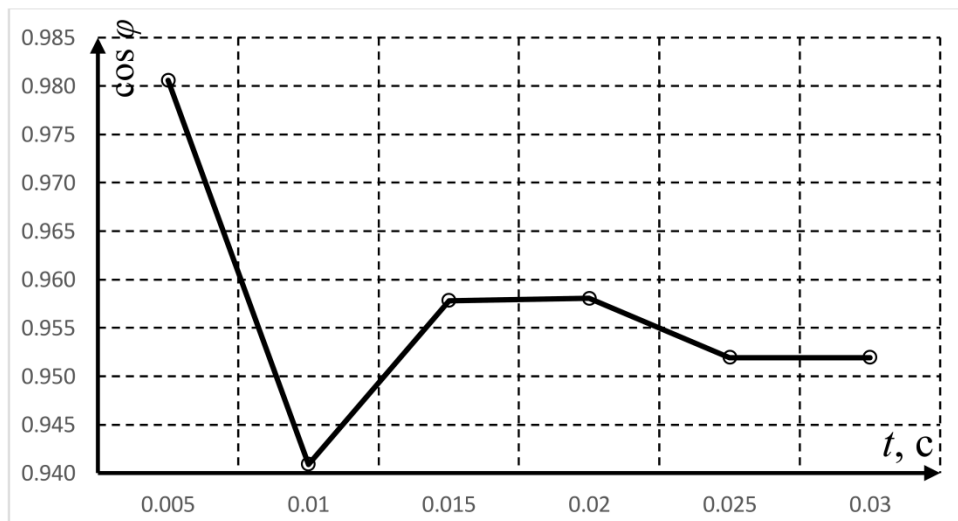


Рисунок 3.14 – Характеристика $\cos(\varphi)$

Графік (рис. 3.14) побудований з використанням даних відношення активної потужності до повної і відображає високий коефіцієнт потужності, який далі буде підвищено.

Після замикання перемикача Manual Switch (рис. 3.9), осцилограми напруги і струму стали збігатися по фазі, що свідчить про зменшення реактивної складової потужності (рис. 3.15).

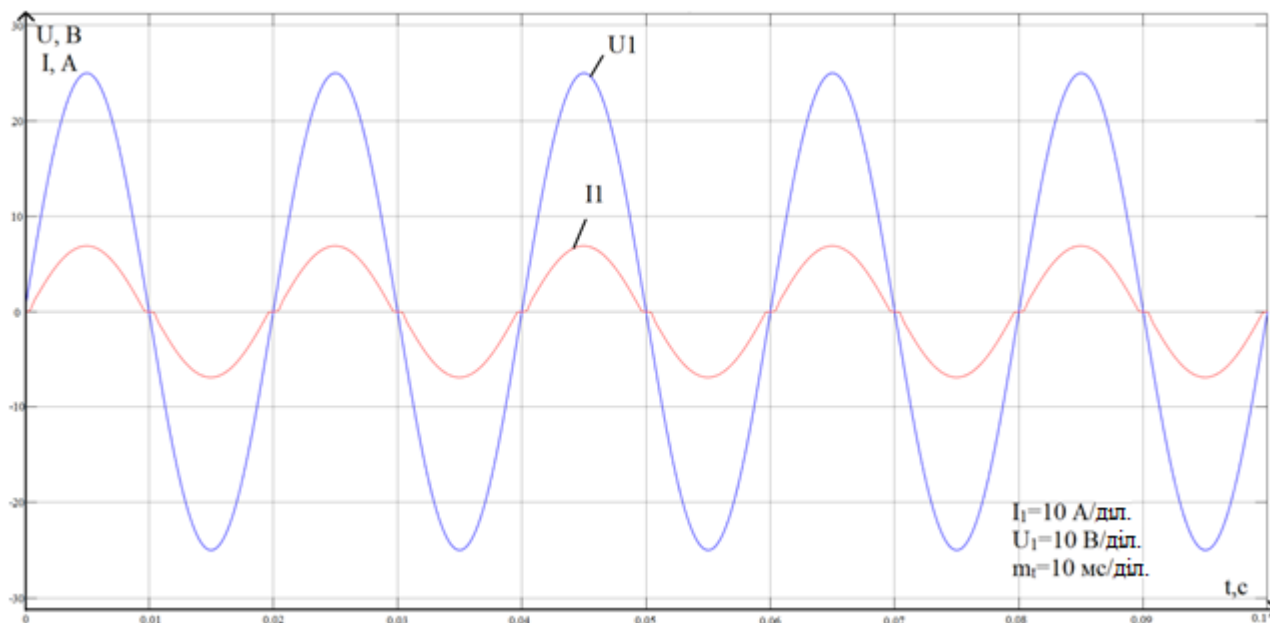


Рисунок 3.15 – Напряга (U_1) і струм (I_1) на вході ККМ

Осцилограми випрямленого струму і напруги на навантаженні так само майже збігаються за формою, зсув по фазі відсутній (рис. 3.16). Наростання струму і напруги відбувається одночасно. Середньоквадратичне значення струму зменшилося.

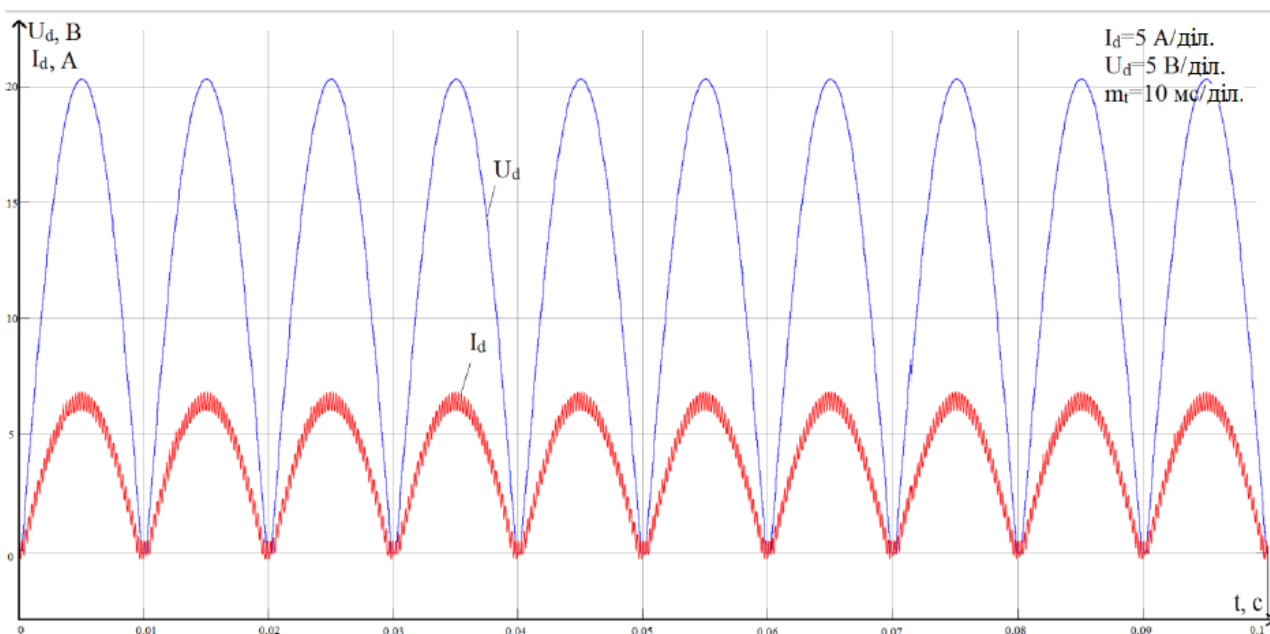


Рисунок 3.16 – Випрямлені напряга (U_d) та струм (I_d)

Рівень реактивної потужності зменшився. Таким чином, повна потужність майже повністю дорівнює активній (рис. 3.17).

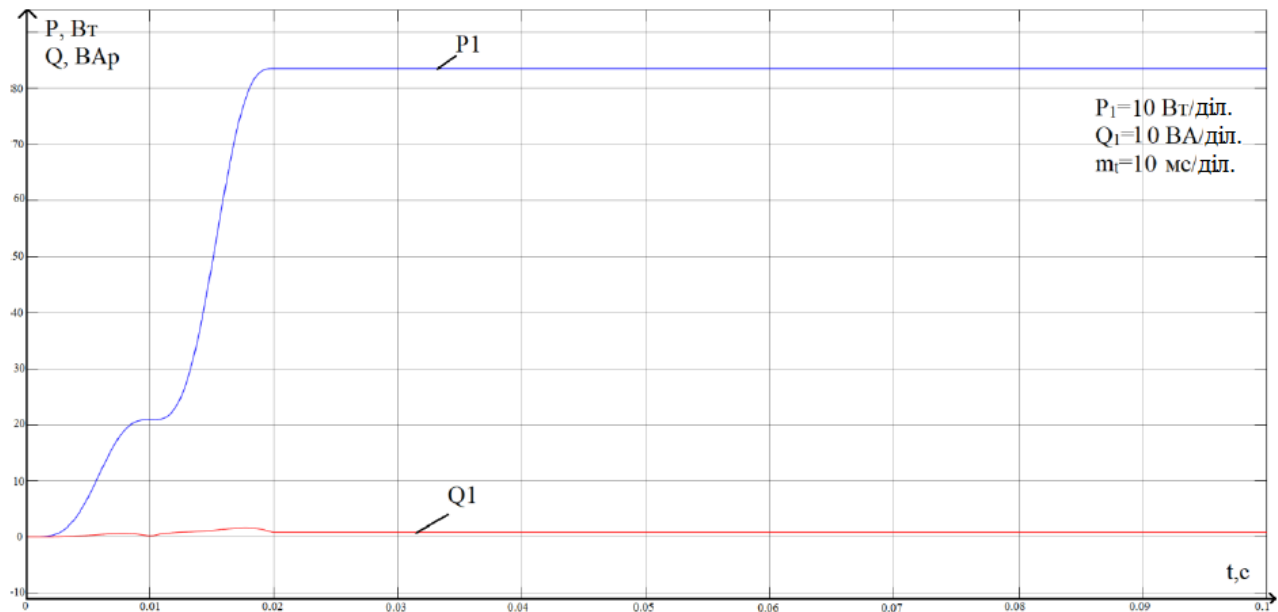


Рисунок 3.17 – Активна (P_1) і реактивна (Q_1) потужності на вході ККП

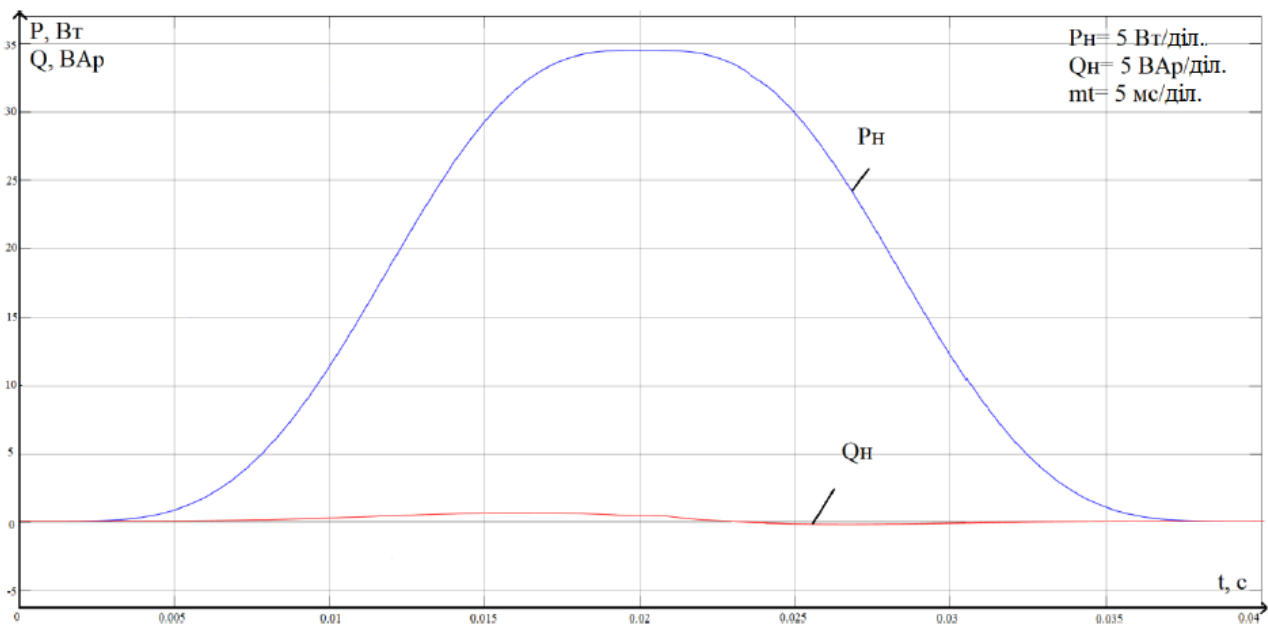


Рисунок 3.18 – Активна (P_H) і реактивна (Q_H) потужності навантаження

Повну потужність навантаження, як і на вході ККП можна прийняти рівною активній потужності, тому що вплив реактивної складової несуттєвий.

Характеристика на рис. 3.19 побудована з використанням даних залежності активної та реактивної потужностей від часу. На ній видно

збільшення коефіцієнта потужності щодо схеми з вимкненою системою управління ККП.

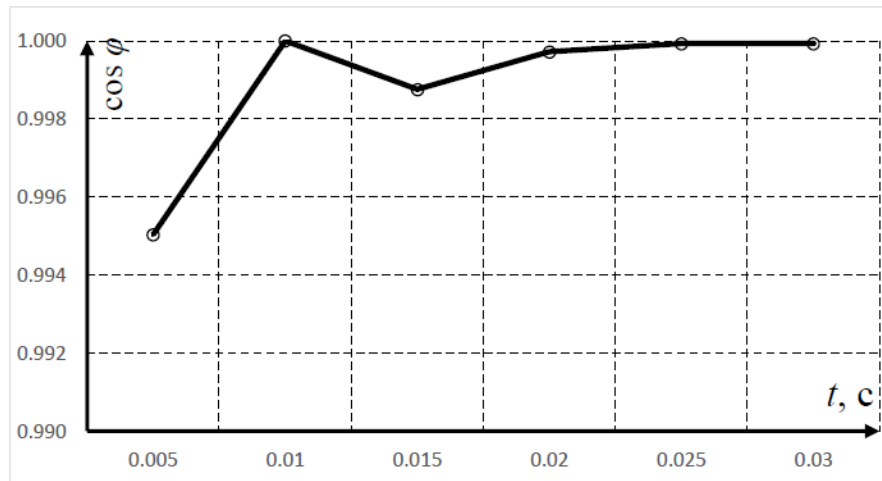


Рисунок 3.19 – Характеристика $\cos(\varphi)$

З графіків (рис. 3.7, 3.17, 3.18) походить, що при застосуванні ККП відбувається значне зменшення споживаної і поверненої в мережу реактивної складової потужності.

Висновок по розділу:

Результати, отримані на лабораторному стенді і в моделі Simulink схожі, що дозволяє використовувати дану модель для сторони нижчої напруги ПС 110/10 кВ. Опір навантаження в моделі був нижче (в 2,5 рази) для наочного порівняння значень і форми напруги і струму на одному графіку, однак при цьому зросли значення електричної потужності.

ВИСНОВКИ

В результаті аналітичного огляду передових технологій зниження показників реактивної складової електричних мереж встановлено доцільність застосування корекції коефіцієнта потужності.

Здійснено порівняння лабораторної установки ККП з програмною моделлю в Simulink і отримані схожі результати вимірювань.

Встановлено можливість використання запропонованої імітаційної моделі для досліджень мереж на стороні нижчої напруги ПС 110/10 кВ.

Опір навантаження в моделі був нижче (в 2,5 рази) для наочного порівняння значень і форми напруги і струму на одному графіку, однак при цьому зросли значення електричної потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аметистова Е.В. Основы современной энергетики: учебник для вузов: в 2 т. Е.В. Аметистова, А.П. Бурман и В.А.Строев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. –632 с.
2. Бессонов Л.А. Электрические цепи. – М.: Юрайт, 2014. –701 с.
3. Воротницкий В.Э. Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях энергоснабжающих организаций / В.Э. Воротницкий, М.А. Калинкина, В.Н. Апряткин // ЭСКО. –2003. – №7 (19).
4. Гельман М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
5. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие. / А.В. Кабышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 234 с.
6. Компенсация реактивных мощностей. – <http://leg.co.ua/stati/podstancii/kompensaciya-reaktivnyh-moschnostey.html>.
7. Конденсаторные установки высокого напряжения с автоматическим регулированием мощности. – <http://kvar.su/katalog/kondensatornyeustanovki/kondensatornye-ustanovki-vysokogo-n-11>.
8. Корректор коэффициента мощности (ККМ). – <http://bourabai.ru/toe/source14.htm>.
9. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: ИнтернетИнжиниринг, 2006. –672 с.
10. Лыкин А.В. Электрические системы и сети / А.В. Лыкин. – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 254с.
11. Петров Г.М. Электрификация объектов при строительстве городских подземных сооружений: учебник для студентов горных вузов /

Г.М. Петров – М.: Издательство «Горная книга»: Издательство Московского государственного горного университета, 2011 .– 528 с.

12. Преобразовательная техника: учебное пособие к лабораторным работам / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, Н.М. Сапрунова, О.Г. Терещина. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 161 с.

13. Продукты и сервисы – Simscape Power Systems. – <https://matlab.ru/products/simpowersystems>.

14. Продукты и сервисы – Simulink. – <https://matlab.ru/products/simulink>.

15. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий: учебное пособие / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин. – Москва: РадиоСофт, 2010. – 328 с.

16. Тиристорные преобразователи. – <http://ckdelektroprom.ru/products/fku/stk-6-10-35-v/tiristornoupravljajemyj-reaktor-tur>.

17. Федоров А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров, В.В. Каменева. – 4-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.

18. Фильтровые конденсаторные установки. – http://slavenergo.ru/kondensatornie_ustanovki_filtrovie.

19. Конденсаторные батареи и реакторы фильтров – <http://ckdelektroprom.ru/products/fku/stk-6-10-35-kv/reaktory>.

20. Василега П. О. Електропостачання: Навчальни й посібник. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с.

21. Електропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.

22. Електропостачання: навч. посіб. / Ф.П. Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.

23. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях.– К.: Техніка, 1981. – 160 с.

24. Metal Enclosed & Harmonic Filters –

http://www.gegridsolutions.com/HVMV_Equipment/metal_harmonic_filter.htm.

25. Metal enclosed capacitor banks ABBACUS. –

<http://new.abb.com/highvoltage/capacitors/mv/capacitor-banks>.