

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій

(повна назва кафедри)

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



В. М. Рябенський

д.т.н., професор

« 16 » червня 2025 р.

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему:

Розробка і моделювання матричної системи керування
випрямлячем з компенсацією коливань напруг мережі

Виконав: студент 4397ст.3 групи



В. В. Донченко

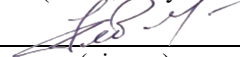
(підпис)

Керівник роботи:

завідувач каф. ПЕЕТ, д.т.н.,

професор

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



В. М. Рябенський

(підпис)

м. Миколаїв – 2025 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра	програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій
Спеціальність	172 «Телекомунікації та радіотехніка»
Освітня програма	Телекомунікації

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Гарант освітньої програми

(підпис) О.К.Жук
« 14 » квітня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр» (освітньо-кваліфікаційний рівень)

Студенту Донченку Віктору Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка і моделювання матричної системи керування випрямлячем з компенсацією коливань напруг мережі
керівник роботи Рябенський Володимир Михайлович, завідувач каф. ПЕЕТ, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора № УЧ-343 від «23» квітня 2025 року.

- Термін подання роботи: 10 червня 2025 р.
- Вихідні дані по роботі: Система керування транзисторним випрямлячем з Використанням ШІМ та FPGA, теоретичний аналіз, математичне моделювання (MATLAB), експериментальні дослідження, програмна реалізація на FPGA.
- Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)
Випрямлення змінної напруги
Синтез системи керування транзисторним випрямлячем
Моделювання транзисторного випрямляча
Охорона праці
- Перелік презентаційних матеріалів Схема тиристорного перетворювача.
MATLAB-модель для дослідження транзисторного випрямляча.
Результати моделювання випрямляча без зворотного зв'язку за напругою.
Результати моделювання випрямляча з зворотного зв'язку по напрузі.
Загальна структурна схема системи керування.
Внутрішній взаємозв'язок компонентів системи.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4 Охорона праці	Тубальцев А. М., доцент каф. екології та природоохоронних технологій		

7. Дата видачі завдання «24» квітня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд існуючої літератури з теми	03.03.2025	Виконано
2.	Вступ	10.03.2025	Виконано
3.	Випрямлення змінної напруги	07.04.2025	Виконано
4.	Синтез системи керування транзисторним випрямлячем	12.05.2025	Виконано
5.	Моделювання транзисторного випрямляча	26.05.2025	Виконано
6.	Складання VHDL-коду реалізації ПІ-регулятора напруги	26.05.2025	Виконано
7.	Висновки	30.05.2025	Виконано
8.	Складання презентації	06.06.2025	Виконано
9.	Охорона праці	09.06.2025	Виконано

Студент

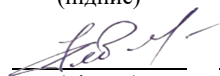


(підпис)

В. В. Донченко

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

В. М. Рябенський

(прізвище та ініціали)

Анотація

В дипломній роботі розглядається робота транзисторного випрямляча у складі суднової електроенергетичної мережі. Проведено дослідження впливу зміни напруги та частоти мережі на статичні характеристики випрямляча.

Синтезовано систему керування за принципом підпорядкованого керування. Запропоновано реалізацію даної системи на базі ПЛІС.

Проведено моделювання динаміки транзисторного випрямляча при дії основних збурювальних факторів. Отримані співвідношення, які дозволяють оцінити рівень пульсацій у випрямленій напрузі.

Ключові слова: Транзисторний випрямляч, суднова електроенергетична мережа, гармонійні спотворення (THD), ШІМ, активний фільтр, коефіцієнт потужності (PF), ПІД-регулятор, FPGA, моделювання MATLAB, якість електроенергії, реактивна потужність, компенсація гармонік, динамічні режими роботи, спектр гармонік, замкнута система керування, перехідні процеси.

Abstract

The diploma thesis considers the operation of a transistor rectifier as part of a ship's power energy network. A study was conducted on the influence of changes in voltage and frequency of the network on the static characteristics of the rectifier.

A control system was synthesized based on the principle of subordinate control. The implementation of this system was proposed based on FPGA.

The dynamics of the transistor rectifier were modeled under the influence of the main disturbing factors. Relationships were obtained that allow the assessment of the level of ripple in the rectified voltage.

Keywords: Transistor rectifier, ship power energy network, harmonic distortion (THD), PWM, active filter, power factor (PF), PID controller, FPGA, MATLAB simulation, power quality, reactive power, harmonic compensation, dynamic operating modes, harmonic spectrum, closed-loop control system, transient processes.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів..	5
Вступ.....	6
Розділ 1. Випрямлення змінної напруги	8
1.1. Некерований однофазний випрямляч	8
1.2. Робота однофазного мостового випрямляча на активно-ємнісному навантаженні.....	10
1.3. Особливості роботи керованих випрямлячів	11
1.4. Вплив гармонік на мережу живлення	12
1.5. Основні показники якості електроенергії.....	16
1.6. Використання різних показників	21
1.7. Використання активних випрямлячів	22
1.8. Висновки до розділу 1.....	23
Розділ 2. Синтез системи керування транзисторним випрямлячем	25
2.1. Транзисторний мостовий випрямляч. Силова схема та принцип роботи.....	25
2.2. Схема керування мостовим уніполярним ШІМ-випрямлячем...	29
2.3. Види широтно-імпульсної модуляції	30
2.4. Синтез замкнутої системи	32
2.5. Гармонічна складова у вхідній напрузі V_d	35
2.6. Аналоговий ПІД-регулятор	38
2.7. Реалізація ПІД-регулятора.....	41
2.8. Ідеологія побудови системи керування на FPGA	44
2.9. Висновки до розділу 2.....	47
Розділ 3. Моделювання транзисторного випрямляча	49
3.1. Дослідження розімкнутої системи.....	49
3.2. Дослідження замкнутої системи	55
3.3. Висновки до розділу 3.....	61
Розділ 4. Охорона праці	63
4.1. Потенційно небезпечні та шкідливі виробничі фактори.....	64
4.2. Заходи з техніки безпеки	72

4.3. Висновки до розділу 4.....	74
Висновки	75
Список використаних джерел	77

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

Умовні позначення та символи

α — кут керування тиристорного випрямляча.

ϕ — фазовий зсув між напругою та струмом.

h — порядок гармоніки.

THD (Total Harmonic Distortion) — сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень.

PF (Power Factor) — коефіцієнт потужності.

PWM (Pulse Width Modulation) — широтно-імпульсна модуляція.

SPWM (Sinusoidal PWM) — синусоїдальна ШІМ.

FPGA (Field-Programmable Gate Array) — програмована логічна інтегральна схема.

PID (Proportional-Integral-Derivative) — пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор.

Скорочення

АЦП — аналого-цифровий перетворювач.

DC-DC — перетворювач постійної напруги.

VHDL (VHSIC Hardware Description Language) — мова опису апаратури.

IEC (International Electrotechnical Commission) — Міжнародна електротехнічна комісія.

ГОСТ — державний стандарт.

Терміни

Гармоніки — синусоїдальні складові струму або напруги, кратні основній частоті.

Реактивна потужність — потужність, яка не виконує корисної роботи, але необхідна для створення магнітних полів.

Рекуперація — процес повернення енергії назад у мережу.

Гістерезисна ШІМ — метод керування, де струм підтримується в межах заданого діапазону.

Оптимум по модулю — метод налаштування регулятора для мінімізації похибок.

Спектр гармонік — розподіл амплітуд гармонік за частотою.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Скорочення	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВСТУП

Як відомо тиристорний випрямляч споживає від мережі струм, який має форму меандру, отже для системи живлення випрямляч представляє собою нелінійне навантаження. Таким чином, випрямляч є генератором вищих гармонійних складових.

Гармоніки створюють проблеми з моменту зародження промисловості і викликані нелінійними опорами намагнічування трансформаторів, реакторів, баластними опорами резонансних ламп і т.д. Гармоніки симетричних 3-х фазних систем є, як правило, непарними: 3-я, 5-а, 7-а, 9-а ..., і їх величина зменшується зі збільшенням порядкового номера. Кілька пристроїв можуть бути використані різними шляхами для зниження конкретних гармонік до дуже малих значень, повне усунення неможливо.

В цій дипломній роботі розглядається робота транзисторного випрямляча у складі суднової електроенергетичної мережі. Транзисторний випрямляч, на відміну від тиристорного, споживає струм близький до синусоїдального, також транзисторний випрямляч може працювати в режимі компенсації коефіцієнту потужності. Використання транзисторного випрямляча у судновій електроенергетичній системі може позбавити від багатьох проблем пов'язаних з компенсацією вищих гармонік споживаного струму і реактивної потужності.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р1				
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата					
Розробник		Донченко В. В.			Випрямлення змінної напруги	Літ.	Арк.	Аркуші	
Консультант								7	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова			
Керівник		Рябенський В. М.							
Зав. каф.		Рябенський В. М.							

РОЗДІЛ 1. ВИПРЯМЛЕННЯ ЗМІННОЇ НАПРУГИ

1.1. Некерований однофазний випрямляч

Випрямлення змінної напруги може бути здійснено за рахунок двохнапівперіодного випрямляча з нульовим виводом (рис. 1.1).

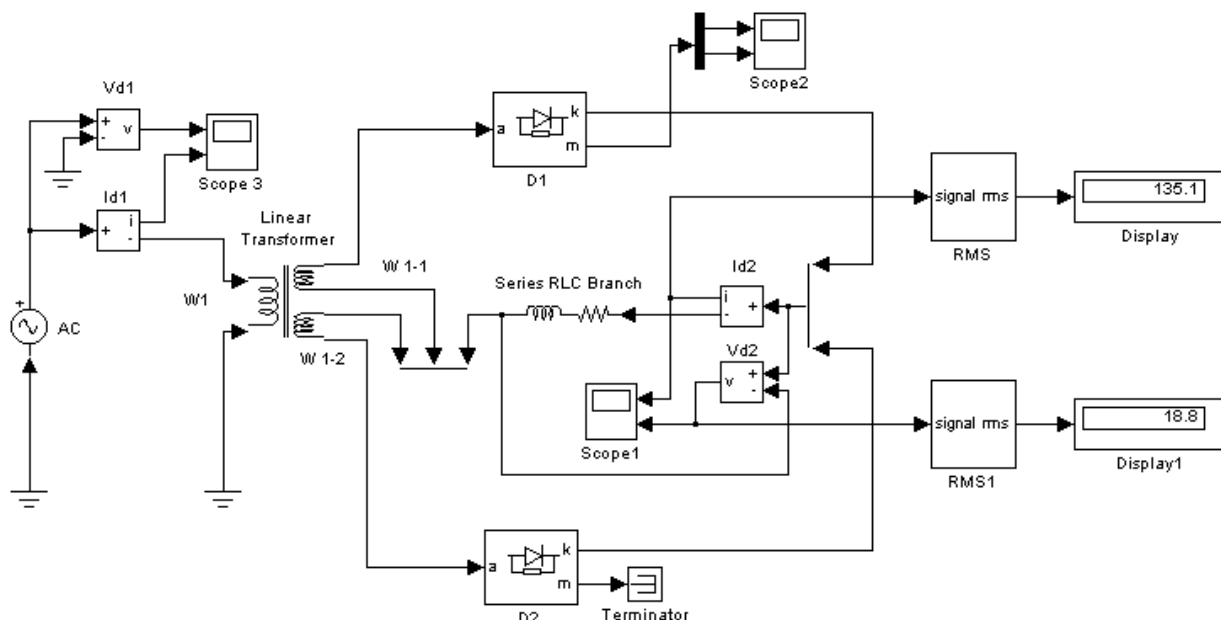


Рисунок 1.1 - Двохнапівперіодний випрямляч з нульовим виводом

На рис. 1.2 наведені графіки споживаного струму та напруги мережі при роботі випрямляча на активно-індуктивне навантаження. На рис. 1.3 представлені графіки струму та напруги на навантаженні. Споживаний від мережі струм має форму меандру, отже для системи живлення випрямляч представляє собою нелінійне навантаження. Таким чином, випрямляч є генератором вищих гармонійних складових. Розглянемо форму споживаного струму при різних типах навантаження.

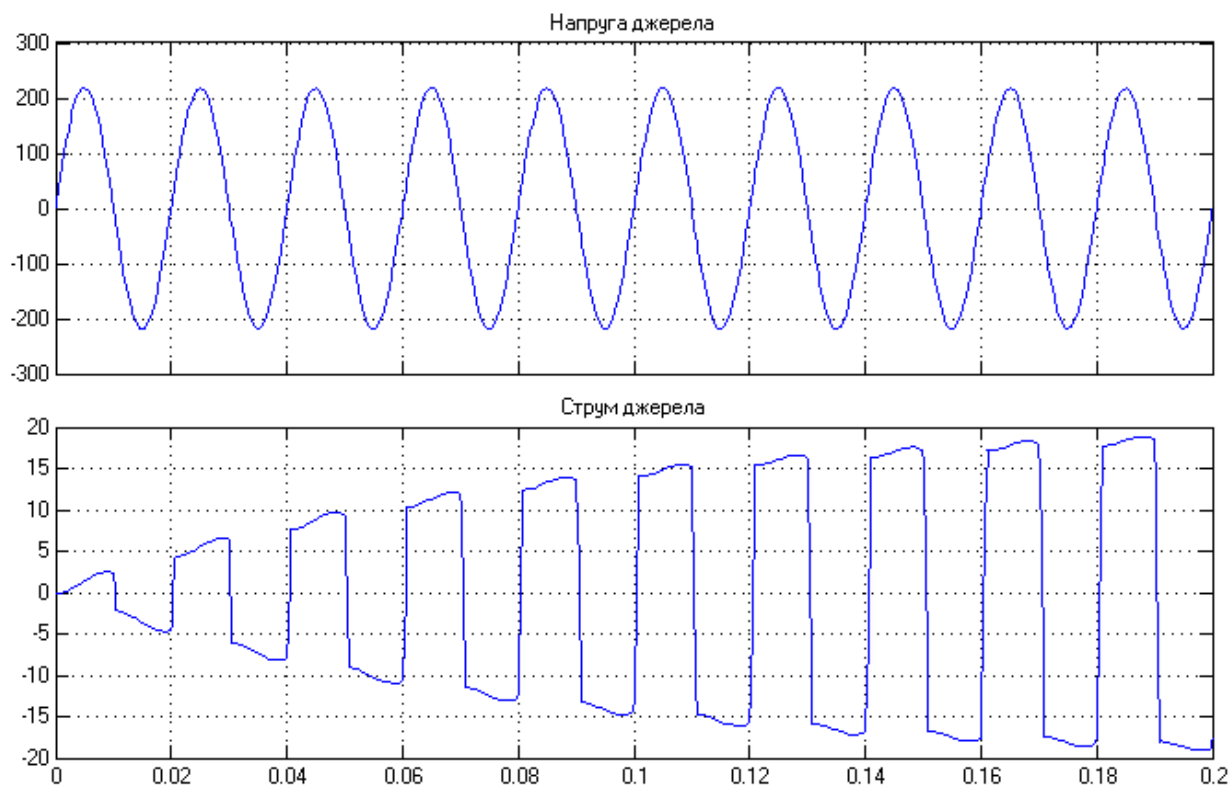


Рисунок 1.2 – Напруга мережі та споживаний струм випрямляча при роботі на активно-індуктивне навантаження

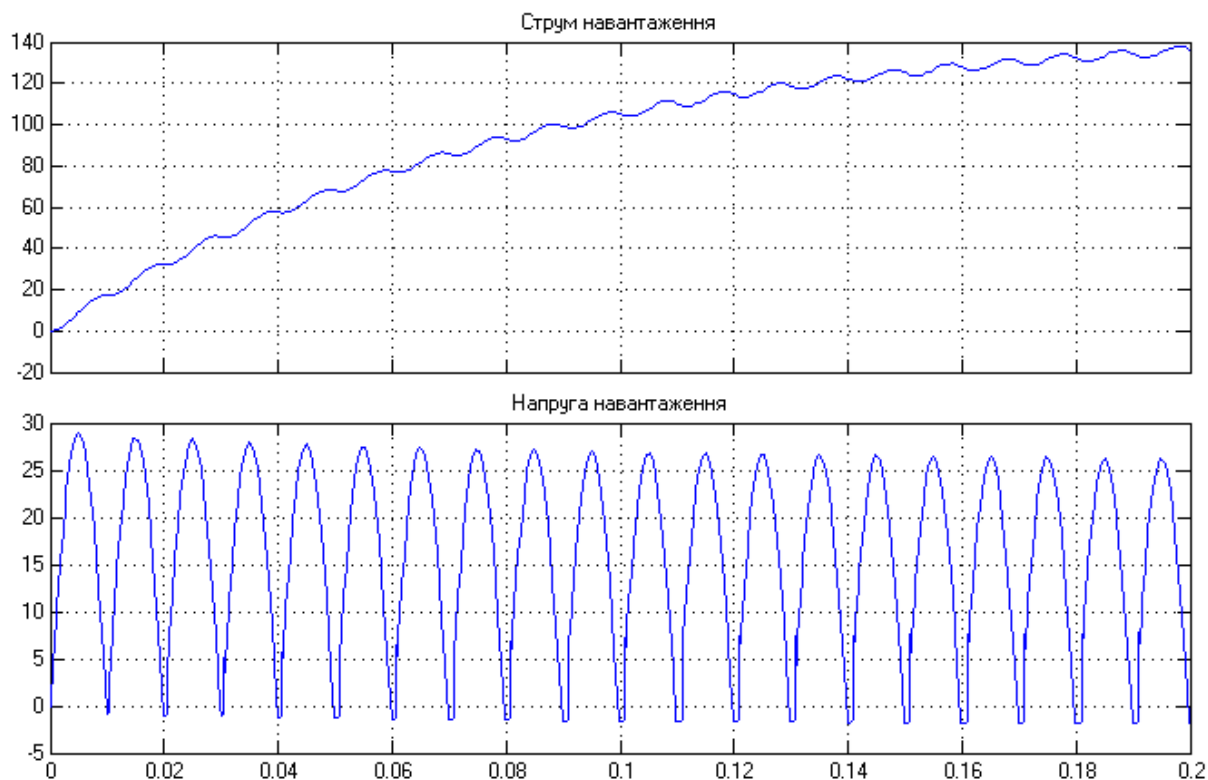


Рисунок 1.3 – Струм та напруга на активно-індуктивному навантаженні

1.2. Робота однофазного мостового випрямляча на активно-ємнісне навантаження

Схема даного випрямляча наведена на рис. 1.4.

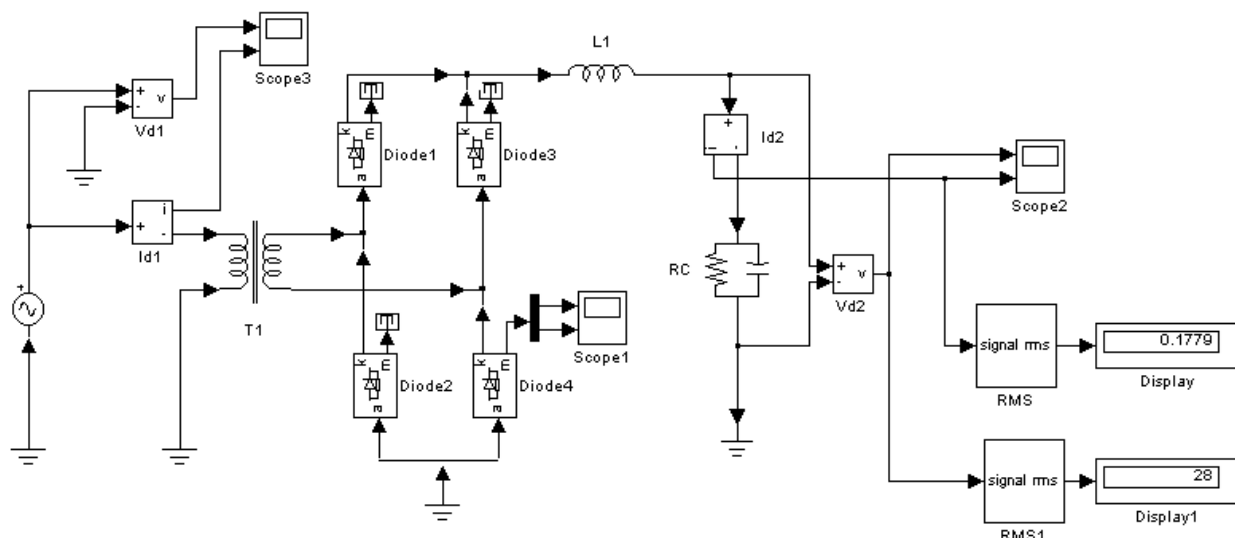


Рисунок 1.4 – Однофазний мостовий випрямляч з активно-ємнісним навантаженням

На рис. 1.5 зображені напруга мережі та споживаний струм.

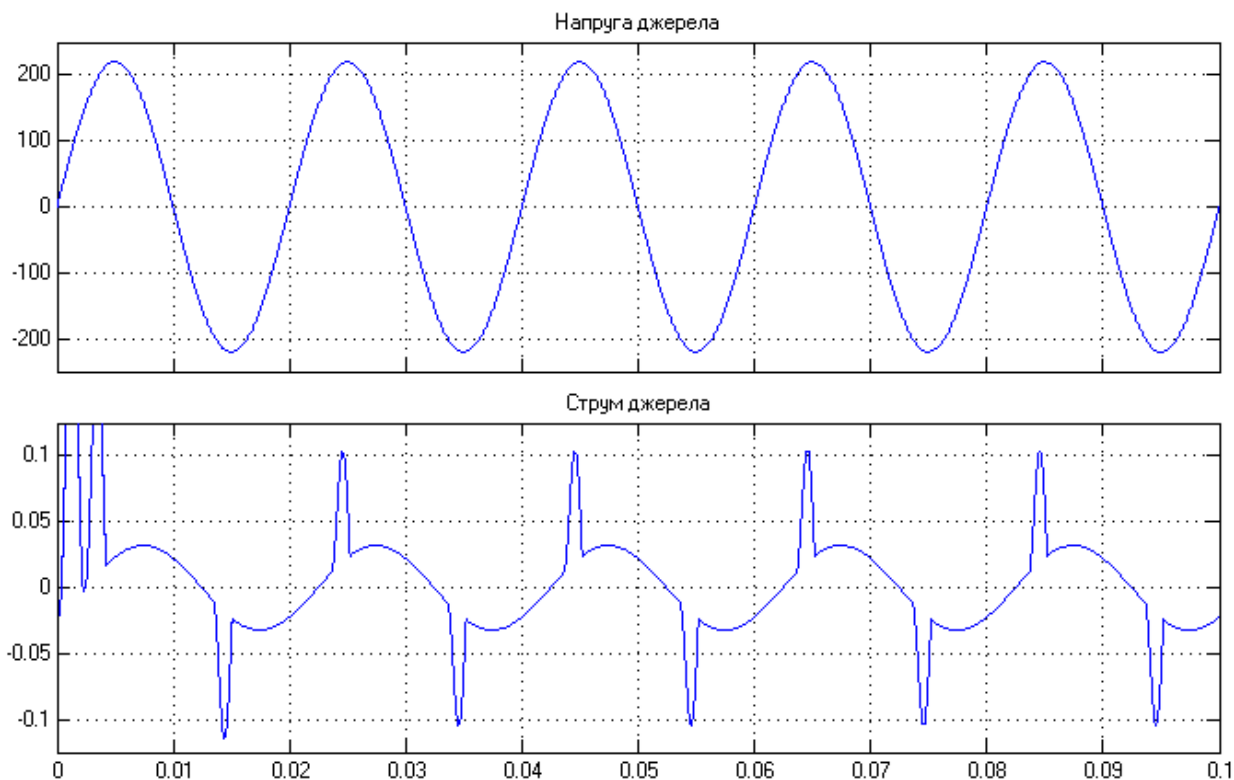


Рисунок 1.5 – Напруга мережі та споживаний струм

Таким чином, випрямляч споживає з мережі імпульсний струм.

1.3. Особливості роботи керованих випрямлячів

Розглянемо, який струм буде споживати однофазний мостовий випрямляч, що працює на активно-індуктивне навантаження (рис. 1.6).

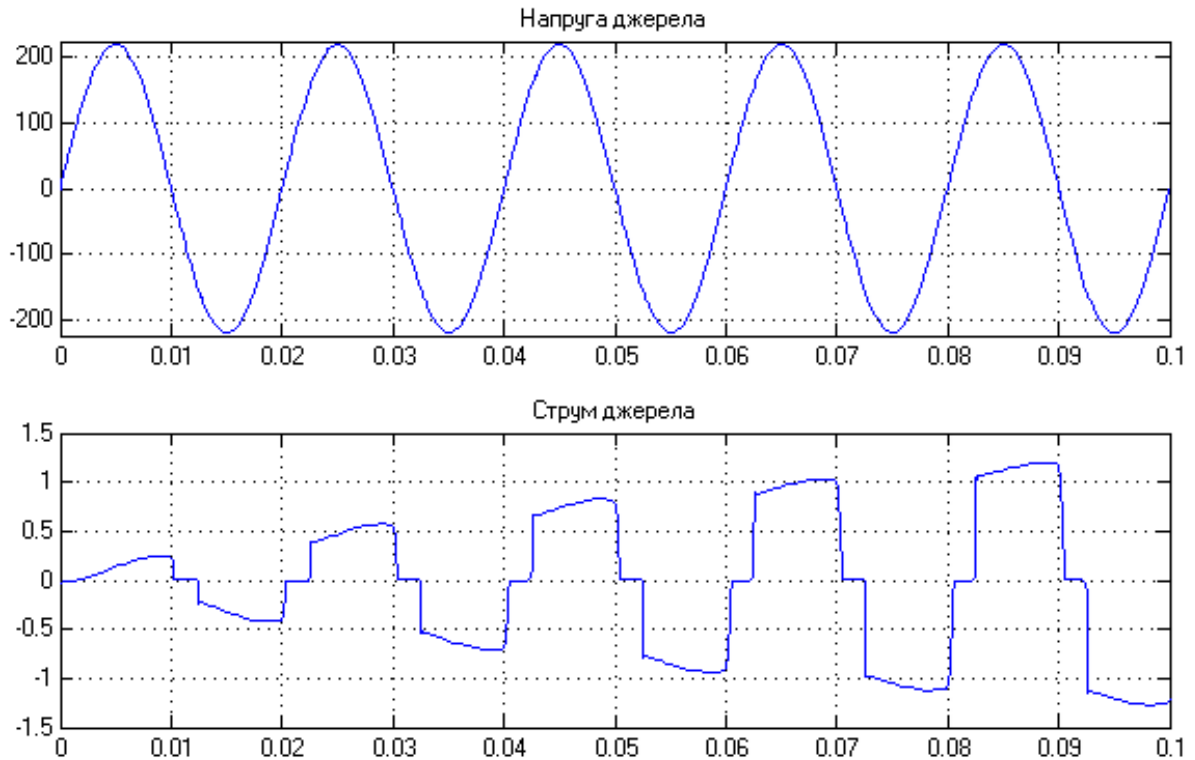


Рисунок 1.6 – Напруга мережі та споживаний струм керованого випрямляча, що працює на активно-індуктивне навантаження при $\alpha=45^\circ$

Форма кривої споживаного струму залежить від кута керування α . Розглянемо вплив вищих гармонік струму на мережу живлення.

1.4. Вплив гармонік на мережу живлення

1.4.1. Проблеми, пов'язані з гармонічними складовими енергосистеми

Обладнання, що включає силові електронні компоненти (частотне регулювання двигунів, тиристорні випрямлячі і т.д.) значно збільшує проблеми викликані гармонійними складовими в системі електроживлення. Гармоніки створюють проблеми з моменту зародження промисловості і викликані нелінійними опорами намагнічування трансформаторів, реакторів, баластними опорами резонансних ламп і т.д. Гармоніки симетричних 3-х фазних систем є, як правило, непарними: 3-я, 5-а, 7-а, 9-а ..., і їх величина зменшується зі збільшенням порядкового номера. Кілька пристроїв можуть бути використані різними шляхами для зниження конкретних гармонік до дуже малих значень, повне усунення неможливо. В даному розділі рекомендуються практичні засоби зниження впливу гармонік, особливо для блоків конденсаторів. Конденсатори особливо чутливі до гармонійних складових напруги живлення в силу того, що ємнісно-реактивний опір зменшується при збільшенні частоти. На практиці це означає, що лише відносно малий відсоток гармонійних напруг може викликати протікання значного струму в колі конденсаторів.

Присутність гармонік викликає спотворення (нормально синусоїдальної) форми хвилі напруги або струму; чим вищий вміст гармонік, тим більше ступінь спотворення. Якщо власна резонансна частота комбінації «блок конденсаторів/реактивний опір енергосистеми» близька до частоти конкретної гармоніки, виникає частковий резонанс з підвищеними значеннями напруги і струму при частоті гармоніки. В даному випадку підвищений струм викличе перегрів конденсатора з поступовим погіршенням діелектрика, яке призводить до виходу з ладу. Є кілька рішень цих проблем із застосуванням таких засобів:

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

- паралельно приєднаний фільтр і/або реактори для придушення гармонік;
- Активні силові фільтри;
- Гібридні фільтри.

1.4.2. Рішення для усунення гармонік у мережі живлення

Пасивний фільтр. Присутність гармонік в напрузі приводить до ненормально високих рівнів струму через конденсатори. Поправка на це робиться при розрахунку з урахуванням середньоквадратичного значення струму, яке в 1,3 рази більше номінального струму. Всі послідовні елементи, такі як сполуки, плавкі запобіжники, перемикачі і т.д., пов'язані з конденсаторами, розраховуються з аналогічним збільшенням (в 1,3-1,5 рази більше номінального значення).

Спотворення гармоніками форми хвилі напруги часто виражається в появі «піків» і збільшенні амплітуди нормальної синусоїдальної хвилі. Така можливість разом з іншими умовами перенапруги, які можуть виникати при протидії резонансним ефектам, як описується нижче, враховуються шляхом збільшення рівня ізоляції вище рівня ізоляції «стандартних» конденсаторів. У багатьох випадках ці два заходи достатні для забезпечення задовільної роботи.

Конденсатори є лінійними реактивними пристроями і, як наслідок, не генерують гармонік. Однак, установка конденсаторів в енергосистемі (у якій опори є переважно індуктивними) може призводити до сумарного або часткового резонансу при одній з гармонійних частот. Порядок гармоніки h_0 найменшої резонансної частоти між індуктивністю системи і блоком конденсаторів визначається за формулою

$$h_0 = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$$

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		13

де S_{sc} – рівень потужності (кВА) КЗ системи в точці з'єднання конденсатора, Q – номінальне значення потужності блоку конденсаторів в квар, h_0 – порядок гармоніки найменшої резонансної частоти f_0 , тобто $f_0/50$ для системи 50 Гц або $f_0/60$ для системи 60 Гц.

Наприклад, $h_0 = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$ може бути давати значення 2,93, яке показує, що найменша частота резонансу комбінації «конденсатор/індуктивність системи» близька до частоти гармоніки 3-го порядку системи.

Зі співвідношення $h_0 = f_0/50$ випливає, що $f_0 = 50 h_0 = 50 \times 2,93 = 146,5$ Гц.

Чим ближче власна частота резонансу наближається до частоти однієї з гармонік, присутньої в системі, тим більше (небажаний) ефект. У наведеному вище прикладі з великою ймовірністю виникнуть умови резонансу з гармонійної складової 3-го порядку спотвореної хвилі. У таких випадках необхідно вжити заходів для зміни власної частоти резонансу на значення, при якому не буде резонансу з якою-небудь присутньою гармонікою. Це досягається шляхом приєднання послідовно з конденсатором котушки індуктивності для нейтралізації гармонік. В системах 50 Гц такі реактори часто настраюються на доведення власної частоти резонансу комбінації, тобто, блок конденсаторів + реактори, до 190 Гц. Реактори налаштовуються на 228 Гц для системи 60 Гц. Такі частоти відповідають значенням $h_0=3,8$ для системи 50 Гц, тобто, приблизно посередині між гармоніками 3-го і 5-го порядку. У такій схемі присутність реактора збільшує струм основної частоти (50 Гц або 60 Гц) на невелику величину (7-8%), а також напруга через конденсатор в тому ж співвідношенні. Ця характеристика враховується, наприклад, при використанні конденсаторів, розрахованих на 440В для систем 400В.

Активний фільтр. Активні фільтри засновані на використанні силової електроніки. Як правило, вони встановлюються паралельно з нелінійним навантаженням. Активні фільтри аналізують гармоніки, що вводяться навантаженням, і потім подають струм такої ж гармоніки на навантаження з

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		14

відповідною фазою. В результаті гармонійні струми повністю нейтралізуються. Це означає, що вони не можуть більше проходити до джерела живлення і більше не видаються джерелом. Основна перевага активних фільтрів полягає в тому, що вони гарантують ефективну компенсацію гармонік навіть при зміні установки. Вони виключно прості у використанні в силу наступних характеристик:

- Автоматичне налаштування конфігурації під гармонійні навантаження незалежно від порядку гармонік;
- Усунення ризиків перевантаження;
- Сумісність з електрогенераторами;
- Підключення в будь-якій точці електричної мережі;
- Кілька фільтрів можуть використовуватися в одній і тій же установці для підвищення ефективності усунення гармонік (наприклад, у випадку встановлення нової машини);

Крім того, активні фільтри можуть також забезпечити компенсацію коефіцієнта потужності.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1.5. Основні показники якості електроенергії

1.5.1. Основні показники гармонійних спотворень і принципи вимірювань

Для кількісного виміру та оцінки гармонійних спотворень форм струмів і напруг використовуються кілька показників, зокрема:

- Коефіцієнт потужності;
- Пік-фактор або коефіцієнт амплітуди;
- Потужність нелінійних спотворень;
- Гармонійний спектр;
- Величини гармонійних спотворень.

Ці показники слід використовувати при визначенні будь-якої необхідної коригуючої дії.

1.5.2. Коефіцієнт потужності

Коефіцієнт потужності (PF) являє собою співвідношення між активною потужністю (P) і повною потужністю (S). Його часто плутають з параметром:

$$\cos \varphi = P1/S1,$$

де P1 – активна потужність струму основної частоти; S1 – повна потужність струму основної частоти. Параметр $\cos \varphi$ відноситься тільки до основної мережної частоти і тому відрізняється від коефіцієнта потужності PF, який враховує наявність в електроустановці гармонік. Інтерпретація коефіцієнта потужності: першою ознакою наявності в електроустановці значної кількості гармонік є те, що заміряний коефіцієнт потужності PF відрізняється (менше) від заміряної величини $\cos \varphi$.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		16

1.5.3. Пік-фактор

Пік-фактор або коефіцієнт амплітуди – це відношення величини амплітуди струму або напруги (I_m або U_m) до його чинного значення.

- Для синусоїдального сигналу пік-фактор дорівнює відповідно 2.
- Для несинусоїдального сигналу пік-фактор може бути чи більше або менше 2.

В останньому випадку такі значення пік-фактора свідчать про відмінність форми кривої напруги від синусоїдальної, тобто про наявність спотворень.

Інтерпретація пік-фактора: для струму, споживаного нелінійними навантаженнями, величина пік-фактора значно перевищує 2. Зазвичай вона становить від 1,5 до 2, але в критичних випадках може навіть досягати 5. Велика величина пік-фактора свідчить про наявність великих перехідних надструмів, здатних викликати помилкові спрацьовування захисних пристроїв.

1.5.4. Параметри потужності і гармоніки

Активна потужність (P) сигналу, що містить гармоніки, є сумою активних потужностей окремих гармонік струму і напруги одного і того ж порядку. Реактивна потужність визначається виключно для основної частоти, тобто

$$Q = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1.$$

Потужність спотворень. При наявності гармонік потужність спотворень D визначається як

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2},$$

де S – повна потужність.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1.5.5. Гармонійний спектр і гармонійні спотворення

Кожен тип пристрою, що породжує гармоніки, споживає струм гармоніки певної форми (певної амплітуди і фазового зсуву). Ці параметри, особливо амплітуда кожної гармоніки, мають істотне значення для аналізу. Спотворення, що вноситься окремою гармонікою (або гармонійне спотворення h -ого порядку). Спотворення, що вноситься окремою гармонікою, визначається процентним співвідношенням амплітуд гармонік h -ого порядку і сигналу основної частоти (коефіцієнт n -ой гармоніки (див. ГОСТ 13109_97):

$$u_h(\%) = 100 \frac{U_h}{U_1},$$

$$i_h(\%) = 100 \frac{I_h}{I_1}.$$

Гармонійний спектр, який відображає амплітуду кожної гармоніки в функції її частоти, називається спектром гармонік.

На рис. 1.7 представлений приклад спектра гармонік прямокутного сигналу.

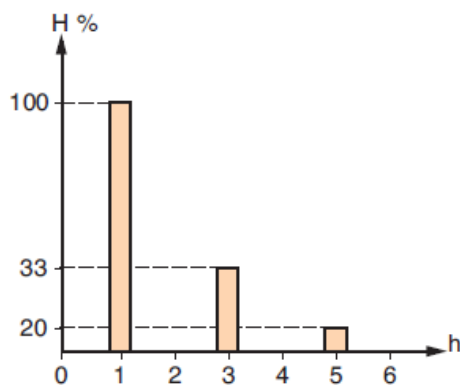


Рисунок 1.7 – Приклад спектра гармонік

Діюче значення струму і напруги може бути розраховане у функції діючого значення гармонік різних порядків:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2},$$

$$U_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2}.$$

1.5.6. Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень (THD)

Термін «сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень» THD (коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги (див. ГОСТ 13109_97) широко застосовується при визначенні рівня вмісту гармонік в знакозмінних сигналах.

Для сигналу у коефіцієнт THD визначається як:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} Y_h^2}}{Y_1}.$$

Це узгоджується з визначенням, наведеним у стандарті IEC 61000_2_2.

Зазначимо, що це значення може перевищувати 1. Відповідно до зазначеного стандарту, параметр h можна обмежити числом 50. Коефіцієнт THD дозволяє одним числом показати ступінь спотворень, що впливають на струм або напругу в будь-якому місці електроустановки. Зазвичай THD виражається у відсотках.

1.5.7. Сумарний коефіцієнт спотворень по струму або напрузі

Для гармонік струму ця формула має вигляд:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}.$$

Нижче представлена еквівалентна формула, яка є більш наочною і зручною в застосуванні, якщо відомо повне діюче значення:

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1}.$$

Для гармонік напруги формула має вигляд:

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1}.$$

Зв'язок між коефіцієнтом потужності і THD. Коефіцієнт THD відображає одним значенням ступінь спотворення форми струму або напруги з важливим показником. Спектр відображає окремі гармоніки, які впливають на спотворений сигнал (коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги (див. ГОСТ 13109_97).

$$P \approx P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Отже:

$$PF = \frac{P}{S} \approx \frac{U_1 I_1 \cos \varphi_1}{U_1 I_{rms}}.$$

Так як:

$$\frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_1^2}},$$

звідси:

$$PF \approx \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1+THD_1^2}}$$

На рис. 1.8 представлений графік залежності $\frac{PF}{\cos \varphi_1}$ від THDI.

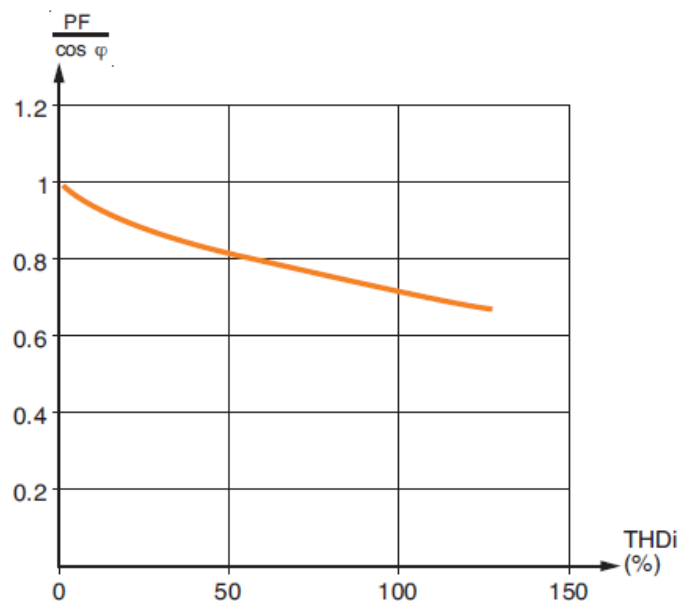


Рисунок 1.8 – Графік залежності $\frac{PF}{\cos \varphi_1}$ від THDI

1.6. Використання різних показників

Показник THDi характеризує спотворення форми напруги. Нижче наведено кілька значень THDi і відповідні їм явища, що відбуваються в електроустановці:

- THDi <5% – нормальна ситуація, відсутність збоїв в роботі обладнання
- 5-8% – значне забруднення мережі гармоніками, можливі деякі збої в роботі
- > 8% – великий ступінь забруднення мережі гармоніками, можливі збої в роботі устаткування.

Потрібно проведення ретельного аналізу і установка компенсуючих пристроїв.

Показник THDi характеризує спотворення форми струму. Пристрій, вносячий гармонійні збурення, виявляється за допомогою замірів THDi на входах і виходах різних ланцюгів і відповідно відстеження шляхів протікання гармонік.

Нижче наведено кілька значень THDi і відповідні їм явища, що відбуваються в електроустановці:

- THDi <10% – нормальна ситуація, відсутність збоїв в роботі обладнання
- 10-50% – значне забруднення мережі гармоніками з небезпекою підвищення температури і зумовленою цим необхідністю переходу на кабелі більшого перерізу і потужніші джерела живлення
- > 50% – великий ступінь забруднення мережі гармоніками, можливі збої в роботі устаткування.

Потрібно проведення ретельного аналізу і установка компенсуючих пристроїв.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Коефіцієнт потужності використовується для того, щоб оцінити: наскільки необхідно підвищити потужність джерела живлення розглянутої електроустановки.

Пік-фактор (коефіцієнт амплітуди) використовується для оцінки здатності генератора (або джерела безперебійного живлення) забезпечувати миттєві струми великої величини. Наприклад, комп'ютерне обладнання споживає струм з сильно спотвореною формою хвилі, для якого пік-фактор може досягати значень 3-5. Спектр (розкладання сигналу на окремі гармоніки) дає інше уявлення електричних сигналів і може використовуватися для оцінки ступеня їх спотворення.

1.7. Використання активних випрямлячів

При використанні пасивного випрямляча, що складається з діодного моста і фільтруючого конденсатора, незважаючи на малі пульсації випрямленої вихідної напруги на вході одержуємо несинусоїдальний струм з великими піковими значеннями.

Це значно знижує коефіцієнт потужності системи, викликає істотні радіоперешкоди. Наприклад, при пульсаціях вихідної напруги 10% від напруги на навантаженні амплітудне значення сталого споживаного струму у сім разів перевищує значення постійного струму навантаження, а коефіцієнт потужності при цьому - не більш 0,5.

Поліпшити форму струму можна шляхом внесення в ланцюг додаткових пасивних елементів. Але це приводить до збільшення масогабаритних показників пристрою, тому що реактивні компоненти в такому випадку працюють на відносно низьких частотах.

Кращі характеристики виходять при використанні активних випрямлячем, що складаються з транзисторного мосту.

Особливості транзисторних випрямлячів:

- можливість споживати синусоїдальний струм з мережі;

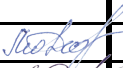
					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- можливість роботи в режимі компенсації реактивної потужності;
- можливість роботи в режимі рекуперації електричної енергії.

1.8. Висновки до розділу 1

1. Діодні та тиристорні випрямлячі представляють собою для мережі суттєво нелінійні елементи. Це призводить до спотворення кривої споживаного струму.
2. Випрямлена напруга при роботі випрямляча на активно-ємнісному навантаженні має пульсації. Величина цих пульсацій залежить від ємності конденсатора.
3. Для оцінювання рівня вищих гармонік у споживаному струмі можуть використовуватися наступні критерії: сумарний коефіцієнт спотворень по струму або напрузі, пік-фактор.
4. Одночасно регулювати вихідну напругу та споживаний від мережі струм дозволяє транзисторний випрямляч. Це дозволяє використовувати його у якості компенсатора реактивної потужності.
5. Суднова електроенергетична система характеризується сплесками та провалами напруги та частоти, тому необхідно провести дослідження впливу цих факторів на роботу транзисторного випрямляча.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р2			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Синтез системи керування транзисторним випрямлячем	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробник		Донченко В. В.						
Консультант							24	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Рябенський В. М.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРАНЗИСТОРНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ

2.1. Транзисторний мостовий випрямляч. Силова схема та принцип роботи

На рис.2.1 представлена силова схема однофазного транзисторного випрямляча (Single-phase transistor rectifier). За допомогою чотирьох транзисторів T_1 - T_4 з антипаралельними діодами формується задана вихідна напруга V_0

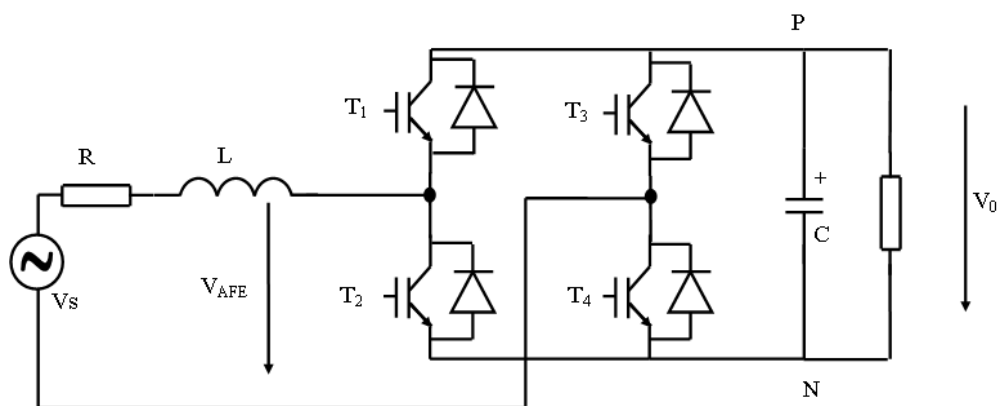


Рисунок 2.1 – Силова схема транзисторного випрямляча

Для нормальної роботи даного випрямляча повинно бути виконана умова для кожного моменту часу: $V_0 > V_0^{\wedge}$

де $V_0^{\wedge}$ - амплітудне значення напруги джерела напруги. Даний випрямляч може працювати як з біполярною ШІМ (Bipolar PWM), так і з уніполярною ШІМ (Unipolar PWM). На рис.2.2 представлені еквівалентні схеми при наступних комутаціях:

1. T_1, T_4 – відкриті, T_2, T_3 – закриті; $V_{AFE} = V_0$ (Рис.2.2,а).
2. T_1, T_4 - закриті, T_2, T_3 - відкриті; $V_{AFE} = -V_0$ (Рис.2.2,в).
3. T_1, T_3 - відкриті, T_2, T_4 - закриті або T_1, T_3 – закриті, T_2, T_4 - відкриті і ; $V_{AFE} = V_0$ (Рис.2.2,а).

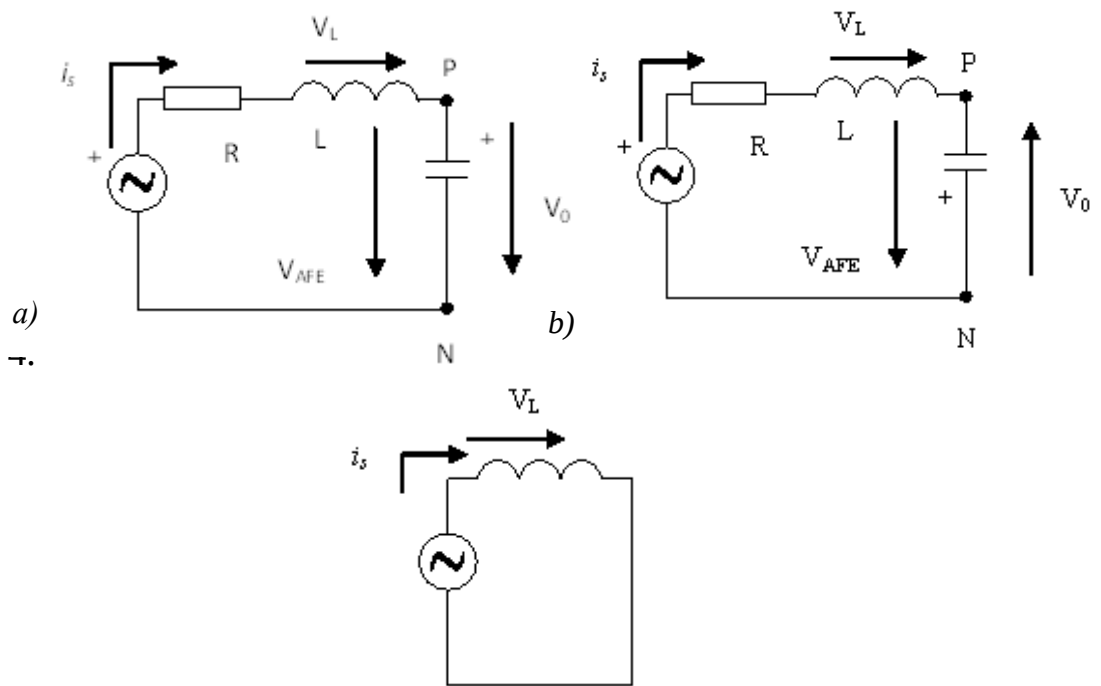


Рисунок 2.2 – Еквівалентні схеми при комутації силових вентилів

Напруга на індуктивності

$$V_L = L \frac{dis}{dt} = V_S(t) - V_R(t) - kV_0, \quad (2.1)$$

де $-V_R(t)$ напруга на резисторі R ; $k = 1, -1$ або 0 .

Перепишемо вираз (2.1) в наступному вигляді:

$$L \frac{dis}{dt} = -R - i_s + V_S(t) - kV_0. \quad (2.2)$$

Використовуючи той факт, що $V_{AFE} = kV_0$, представимо (2.2) як

$$L \frac{dis}{dt} = -R - i_s + V_S(t) - V_{AFE}. \quad (2.3)$$

Введемо в розгляд змінну стану $x = i_s$. Позначимо $U = \begin{bmatrix} V_S(t) \\ V_{AFE}(t) \end{bmatrix}$ вектор зовнішніх впливів. Запишемо рівняння (3) в формі рівнянь простору стану:

$$\begin{cases} \dot{x} = A_x + B_u \\ y = C_x + D_u \end{cases} \quad (2.4)$$

де $A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L}; -\frac{1}{L} \end{bmatrix}$; $C = [1]$; $D = [0, 0]$.

Передаточну функцію $W_1(S) = \frac{i_s(S)}{V_{AFE}(S)}$ знайдемо як

$$W_1(S) = \frac{i_s(S)}{V_{AFE}(S)} = C(sI - A)^{-1} B_{12} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{1}{1 + S \frac{L}{R}} \quad (2.5)$$

де S – оператор Лапласа; $I = [1]$ – одинична матриця; $B_{12} = -\frac{1}{R}$.

Слід зазначити що протягом періоду комутації TS напруга $V_{AFE}(t)$ зазнає змін тому доцільно розглядати середнє значення напруги $V_{AFE}(t)$ на інтервалі T_S :

$$V(t) = \frac{1}{T_S} \int_t^{t+T_S} U(t) dt \quad (2.6)$$

де T_S – період комутації.

Розглянемо, як змінюється напруга $V_{AFE}(t)$ протягом періоду T_S при використанні біполярної ШІМ. Дана ШІМ представляє собою чергування схем рис.2.2.а і рис.2.2.б. Графік змін $V_{AFE}(t)$ приведений на рис.2.3

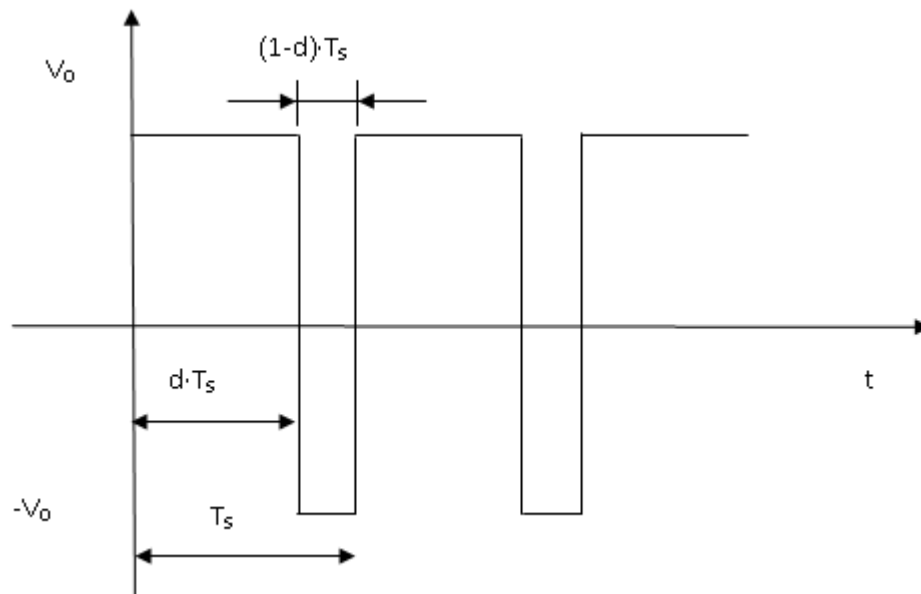


Рисунок 2.3 – Графік напруги $V_{AFE}(t)$ при біполярній ШІМ

Коефіцієнт заповнення d задається ШІМ контролером. Використовуючи вираз (2.6) розрахуємо середнє значення $V_{AFE}(t)$ на інтервалі T_S :

$$\begin{aligned} V_{AFE}(t) &= \frac{1}{T_S} \int_t^{t+T_S} V_{AFE}(t) dt = \frac{1}{T_S} (T_S \cdot V_0 \cdot d(t) - V_0(1 - d(t)) \cdot T_S) = \\ &= V_0(2 + d(t) - 1) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Відношення малого прирощення $\Delta V_{AFE}(t)$ до малого прирощення Δd знайдемо з виразу (2.7)

$$\frac{\delta V_{AFE}}{\delta d} = 2 \cdot V_0 \quad (2.8)$$

Якщо припустити, що протягом T_s всі величини отримують мале прирощення, то на основі (8) і (5) отримуємо передатню функцію

$G(S) = \frac{I_S}{d} (S)$, де I_S ; d мале прирощення величин I_s і d відповідно. Тоді:

$$G(S) = \frac{I_S}{d} (S) = -\frac{2V_0}{R} \cdot \frac{1}{1+S \cdot \frac{L}{R}}. \quad (2.9)$$

В граничному випадку, коли $R \rightarrow 0$ маємо:

$$\lim_{R \rightarrow 0} G(S) = -\frac{2V_0}{S \cdot L} \quad (2.10)$$

Для уніполярної ШІМ рис.2.4 знайдемо середнє значення $V_{AFE}(t)$ на інтервалі T_s :

$$V_{AFE}(t) = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} V_{AFE}(t) dt = \frac{1}{T_s} \cdot T_s \cdot V_0 \cdot d(t) \quad (2.11)$$

Отже, в такому випадку маємо:

$$G(S) = \frac{I_S}{d} (S) = -\frac{V_0}{R} \cdot \frac{1}{1+S \cdot \frac{L}{R}} \quad (2.12)$$

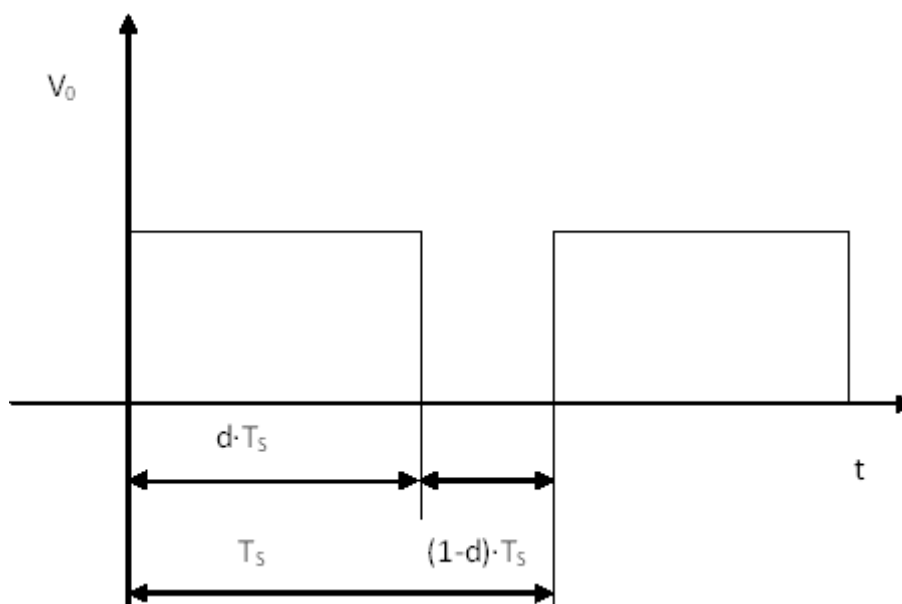


Рисунок 2.4 – Графік напруги $V_{AFE}(t)$ при уніполярній ШІМ.

2.2. Схема керування мостовим уніполярним ШІМ-випрямлячем

Класична схема управління представлена на рис.2.5.

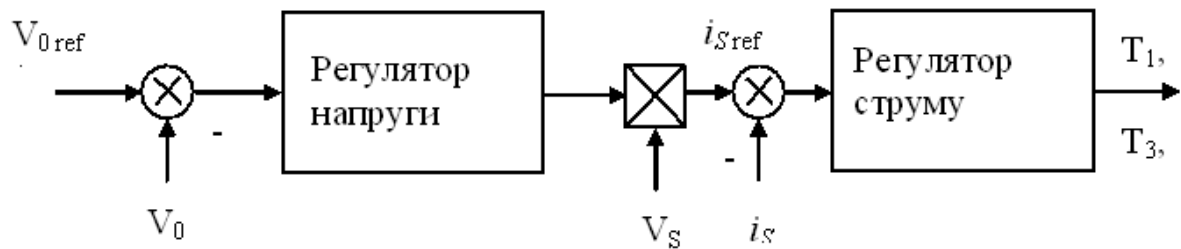


Рисунок 2.5 – Схема керування мостовим ШІМ - випрямлячем.

Схема управління включає в склад регулятор напруги (як правило ПІ-регулятор), який регулює необхідну потужність для підтримки сталості напруги V_0 .

По суті контролер напруги формує необхідну амплітуду вхідного струму. Для отримання миттєвого значення струму $i_s(t)$, співпадаючого по фазі з напругою джерела $V_s(t)$, сигнал з входу регулятора напруги помножується на синусоїдальний сигнал $V_s(t)$. Швидкодіючий регулятор струму формується в схемі заданий струм $i_s(t)$. В якості регулятора струму можемо використовувати гістерезисний або лінійний контролер з широтно-імпульсною модуляцією.

2.3. Види широтно-імпульсної модуляції

2.3.1. Синусоїдальна ШІМ з керуванням миттєвого струму (Sinusoidal PWM with instaneous current control)

На рис.2.5 показана схема управління миттєвим струмом з синусоїдальною ШІМ-напруги у внутрішньому контурі регулювання. Помилка в контурі регулювання синусоїдального струму за допомогою регулятора перетворюється на команду формування синусоїдальної ШІМ-напруги.

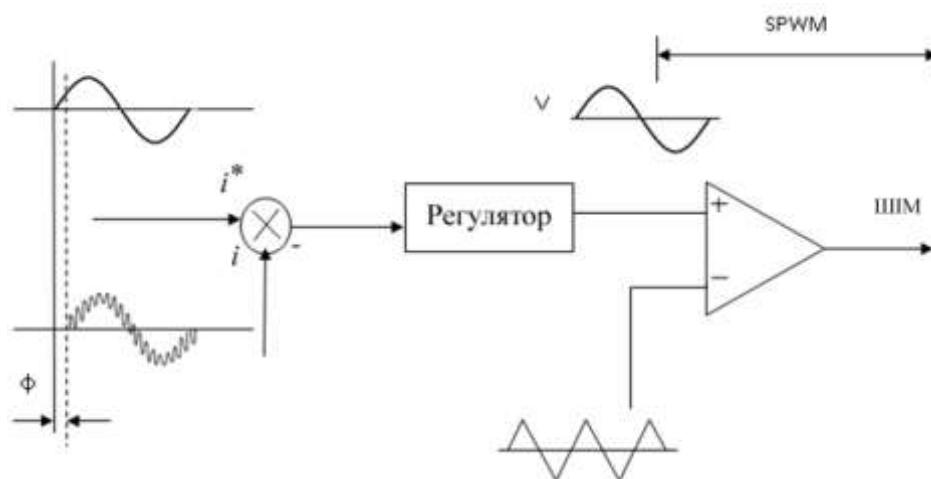


Рисунок 2.6 – Блок схема управління миттєвого струму з синусоїдальною ШІМ

Схема управління доволі проста, проте має декілька проблем. Через обмежену полосу пропускання контуру регулювання діючий струм буде мати фазову затримку ϕ и похибку по амплітуді, які збільшуються зі збільшенням частоти.

2.3.2. ШІМ з гістерезисним токовим управлінням (Hysteresis-Band Current Control PWM)

На Рис.6 показана схема управління для даного виду ШІМ.

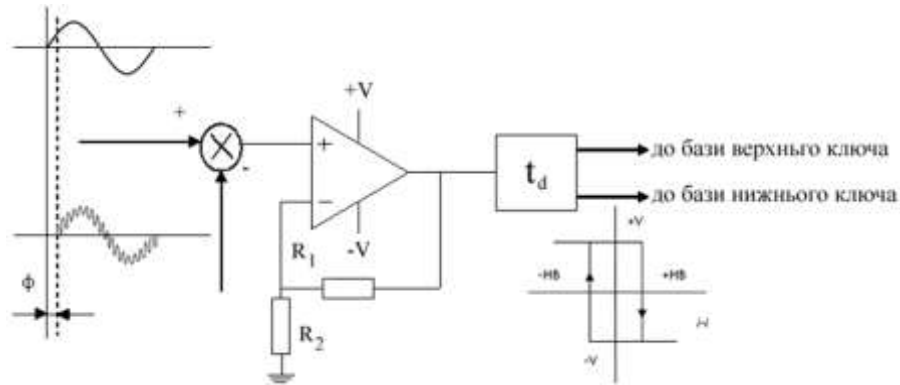


Рисунок 2.6 – Блок схема ШІМ з гістерезисним токовим управлінням

Рис.2.6 пояснює принцип роботи гістерезисної ШІМ. Схема керування генерує синусоїдальний опорний сигнал i^* заданої амплітуди і частоти (slave reference wave). Цей опорний сигнал порівнюється з поточним сигналом струму i . Якщо струм i перевищить верхній поріг (Upper band HB), то вимкнеться транзистор Q_1 , включиться транзистор Q_2 . В результаті вихідна напруга стрибком зміниться зі значення $+0,5 V_d$ до $-0,5 V_d$ і струм почне зменшуватись. Між перемиканням пари транзисторів Q_1 і Q_2 витримується час затримки t_d (dead-time) для запобігання короткого замикання.

Якщо струм i стане менше нижнього порогу (Lower band HB), то Q_1 включиться, Q_2 виключиться. Таким чином, струм i буде повторювати струм i^* з пульсаціями. Пульсації струму залежать від ширини гістерезису. Коли верхній ключ у плечі закритий позитивний нахил кривої струму визначається виразом

$$\frac{di}{dt} = \frac{0.5V_d - V_s \sin \omega t}{T}, \quad (2.13)$$

де $0.5V_d$ – прикладена напруга, $V_s \sin \omega t$ – миттєва напруга джерела.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		31

Відповідні вирази для випадку коли нижній ключ у плечі виявляється закритим визначається формулою

$$\frac{di}{dt} = \frac{-(0.5V_d - V_s \sin \omega t)}{T} \quad (2.14)$$

В блок-схемі на рис.6 ширина гістерезису виявляється як

$$HB = V \frac{R_2}{R_1 - R_2}, \quad (2.15)$$

де V - напруга живлення компаратора.

Умови для перемикання

а) верхнього ключа у стані «увімкнено» :

$$(i^* - i) > HB,$$

б) нижнього ключа у стані «увімкнено»:

$$(i^* - i) < -HB.$$

Частота перемикання для даної ШІМ залежить від ширини гістерезису. Також можна показати, що основна гармоніка струму i має фазовий зсув відносно опорного сигналу i^* .

2.4. Синтез замкнутої системи

Розглянемо структурну схему замкнутої системи (рис.2.7).

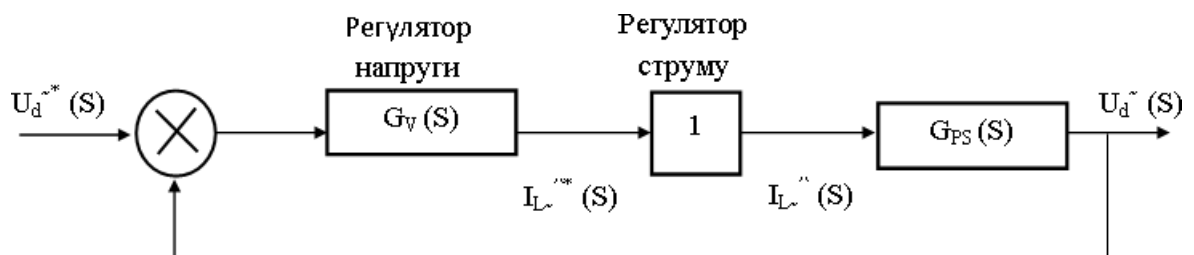


Рисунок 2.7 – Структурна схема замкнутої системи

Дана система являє собою систему підпорядкованого регулювання. Внутрішній контур - контур управління струмом з регулятором струму; зовнішній контур - контур управління вихідною напругою U_d .

При використанні гістерезисної ШІМ в контурі струму за рахунок негативного зв'язку и релейного елементу струм в навантаженні пульсує біля

заданого значення. Для області нижніх частот контур струму приблизно можна замінити на ідеальну підсилювальну ланку з коефіцієнтом передачі

$$K_I = \frac{I_{L\sim}^{\wedge}(S)}{I_{L\sim}^{\wedge*}(S)} = 1 \quad (2.16)$$

де $I_{L\sim}^{\wedge}(S)$ – мале прирощення вихідного струму; $I_{L\sim}^{\wedge*}(S)$ – мале прирощення задаючого впливу для струму. Для синтезу замкнутої системи необхідно отримати передатну функцію силової частини

$$G_{ps} = \frac{V_d^{\wedge}(S)}{I_{L\sim}^{\wedge}(S)}, \quad (2.17)$$

де $V_d^{\wedge}(S)$ – мале прирощення вихідної напруги. Розглянемо частину вхідної схеми (Рис.2.8)

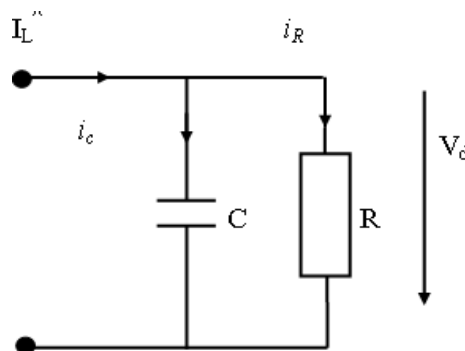


Рисунок 2.8

Позначимо $I_{L\sim}$ – мале прирощення середнього струму, який протікає через індуктивність.

По першому закону Кірхгофа можна записати

$$I_{L\sim} = i_C + i_R. \quad (2.18)$$

Враховуючи, що $i_R = \frac{V_d}{R}$, а $i_C = C \frac{dV_d}{dt}$, перепишемо (2.18) як

$$I_{L\sim} = C \frac{dV_d}{dt} + \frac{V_d}{R}. \quad (2.19)$$

Застосуємо до виразу (2.19) перетворення Лапласа. У результаті отримуємо:

$$I_{L\sim} = \frac{V_d(S)}{R} + C \cdot S \cdot V_d(S). \quad (2.20)$$

З виразу (2.20) можна отримати передатну функцію силової частини:

$$G_{ps} = \frac{V_d^{\wedge}(S)}{I_{L\sim}^{\wedge}(S)} = \frac{R}{1 + R \cdot C \cdot S} \quad (2.21)$$

Таким чином, передатна функція силовій частини представляє собою аперіодичну ланку зі сталою часу $\tau = RC$.

У ряді практичних випадків настройка контурів регулювання здійснюється шляхом вибору за певними правилами параметрів регулятора.

У якості об'єкта управління виступають послідовно з'єднані контур регулювання струму і силова частина.

Передатна функція об'єкта :

$$W_0(S) = K_I \cdot G_{PS}(S) = \frac{R}{1+R \cdot C \cdot S} = \frac{K_0}{T_0 S + 1}, \quad (2.22)$$

де $K_0 = R$; $T_0 = RC$.

Для реалізації настройки на оптимум по модулю (ОМ) повинен бути використаний пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор з передатною функцією

$$G_V(S) = \beta_p + \frac{\tau_p \cdot S + 1}{\tau_p \cdot S}, \quad (2.23)$$

де β_p – коефіцієнт підсилення регулятора $\tau_p = \tau_0$.

Значення терміну «оптимум по модулю» полягає в тому що при налаштуванні на ОМ намагаються у широкій полосі частотної області зробити модуль частотної характеристики замкнутого контуру близьким до одиниці.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

2.5. Гармонічна складова у вхідній напрузі V_d

Розглянемо фактори від яких залежать пульсації у вхідній напрузі V_d , для цього звернемося до схеми зображеної на рис.2.9. Процеси, які проходять в цій схемі, повністю ідентичні процесам, які протікають схемі керованого випрямляча.

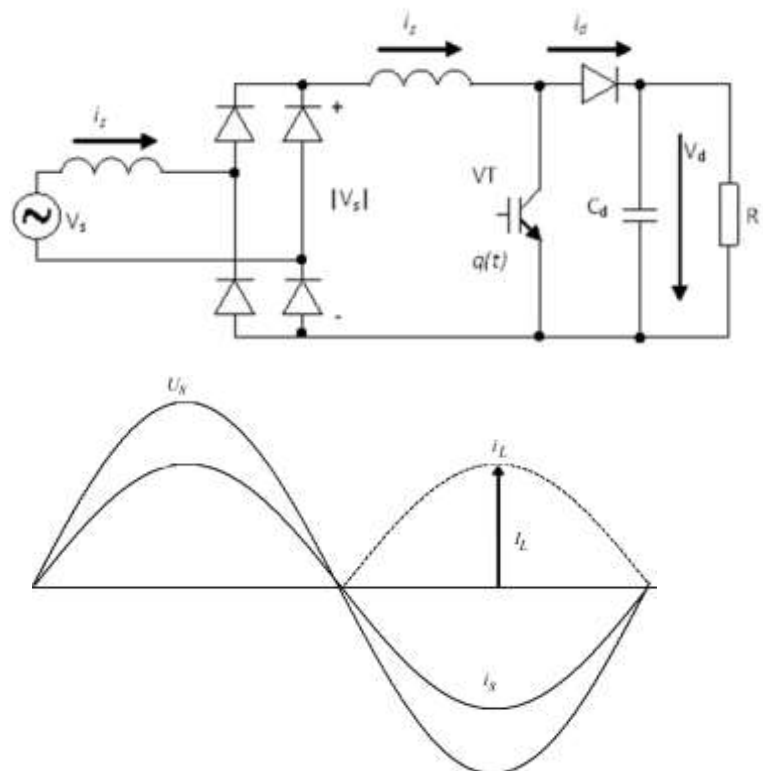


Рисунок 2.9

Елементи L_d, VT, D, L_d утворюють підвищуючий DC-DC перетворювач.

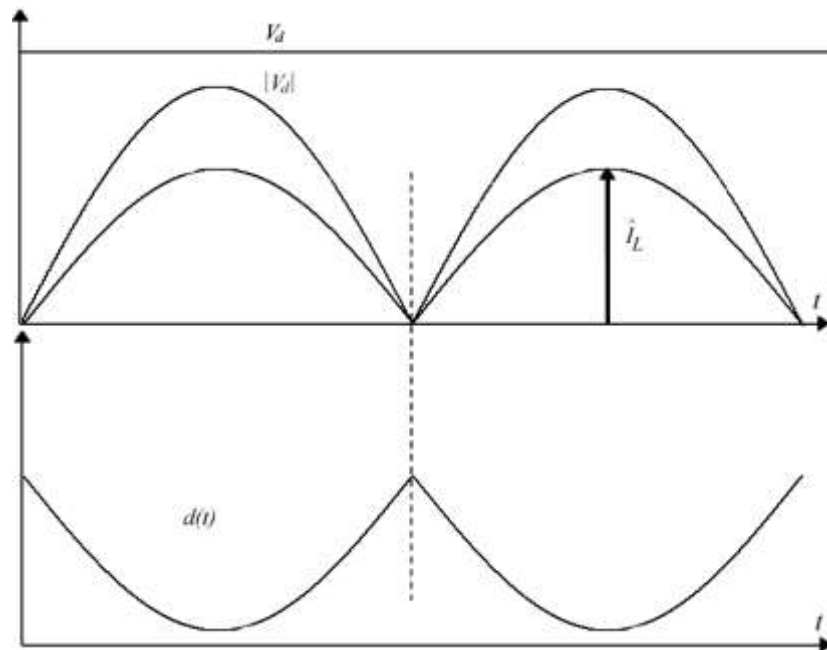


Рисунок 2.10 – Часові діаграми роботи схеми

Для нормальної роботи перетворювача повинно виконуватись умова :

$$V_d > V_s^{\wedge} \quad (2.24)$$

де $V_s^{\wedge}$ – амплітудне значення вхідної напруги .

Для підвищуючого DC-DC перетворювача, працюючого в режимі безперервних струмів, справедливим являться вираз

$$\frac{V_d}{V_s} = \frac{1}{1-d(t)} . \quad (2.25)$$

де $d(t)$ – коефіцієнт заповнення ШІМ.

З попереднього виразу виразимо $d(t)$:

$$d(t) = 1 - \frac{V_s^{\wedge} - |\sin(\omega t)|}{V_d} . \quad (2.26)$$

Струм i_d і i_L зв'язані співвідношенням

$$\bar{i}_d(t) = (1 - d)\bar{i}_L(t) . \quad (2.27)$$

Для того, щоб перетворювач споживав з мережі синусоїдальний струм і працював з коефіцієнтом потужності рівним одиниці, струм i_L повинен бути:

$$i_L(t) = I_L |\sin(\omega t)| . \quad (2.28)$$

Підставляємо попередні вирази та маємо:

$$\bar{i}_d(t) = (1 - d)\bar{i}_L(t) = \frac{V_s^{\wedge}}{V_d} I_L^{\wedge} |\sin(\omega t)|^2 \quad (2.29)$$

Представимо $\sin^2(\omega t)$ як:

$$\sin^2(\omega t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t.$$

Отже, вираз (5) можна переписати у вигляді:

$$\overline{i_d} = \frac{1}{2} \frac{V_s^\wedge}{V_d} I_L^\wedge - \frac{1}{2} \frac{V_s^\wedge}{V_d} I_L^\wedge \cos 2\omega t. \quad (2.30)$$

Вираз (6) показує, що струм вихідного каскаду $\overline{i_d}$ складається з компоненту постійного струму i_d і змінної складової $i_{d2}(t)$ що змінюється з частотою 2ω .

Припустимо, що конденсатор достатньо великої ємності, і що змінна складова струму $i_{d2}(t)$ замикається через нього.

Тоді:

$$V_{d2}(t) = \frac{1}{\omega C} \int i_{d2} d(\omega t), \quad (2.31)$$

де $V_{d2}(t)$ – напруга пульсацій на ємності.

Підставляючи вираз для $i_{d2}(f)$ в вираз (1.31), отримаємо:

$$V_{d2}(f) = \frac{1}{\omega C} \frac{I_L^\wedge V_s^\wedge}{2 V_d} \int \cos 2\omega t d(\omega t) = -\left(\frac{I_L^\wedge V_s^\wedge}{4\omega C V_d}\right) \sin 2\omega t, \quad (2.32)$$

де $V_{d2}^\wedge = \left(\frac{I_L^\wedge V_s^\wedge}{4\omega C V_d}\right)$ – амплітуда пульсацій у випрямленій напрузі.

2.6. Аналоговий ПІД-регулятор

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД, Proportional-Integral-Derivative - PID) регулятор – найбільш поширена структура регулятора в управлінні процесами. ПІД-регулятор генерує вихідний сигнал, що є сумою трьох складових пропорційного регулювання (proportional control), регулювання по інтегралу (integral control) і регулювання по похідній (derivative control). Перша частина $U_p(t)$ пропорційна похибці вихідної величини, тобто різниці між вихідною величиною і опорним значенням, друга частина $U_I(t)$ – інтеграл за часом похибки вихідної величини, а третя $U_D(t)$ – похідній похибки.

Рівняння класичного ПІД-регулятора має вигляд

$$u(t) = u_0 + K \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] = U_0 + U_p(t) + U_i(t) + U_D(t).$$

Параметр K – посилення регулятора, T_i – стала часу інтегрування, а T_d – стала часу диференціювання. Коефіцієнт U_0 – корегуюче значення або зсув, налаштовує середній рівень вихідного сигналу регулятора. Параметри K , T_i і T_d можна налаштувати найчастіше за допомогою ручок на панелі управління регулятора. Підсилення регулятора K може бути безрозмірним, проте у багатьох пристроях воно виражається в технічних одиницях.

Класичний регулятор – це теоретична конструкція, яку не можна точно відтворити на практиці. Наприклад, з математичної точки зору, вихідний сигнал такого регулятора не обмежений. Вихід реального регулятора, навпаки, буде обмежений деякими межами U_{min} або U_{max} , тобто має вигляд, зображений на рис. 2.11.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		38

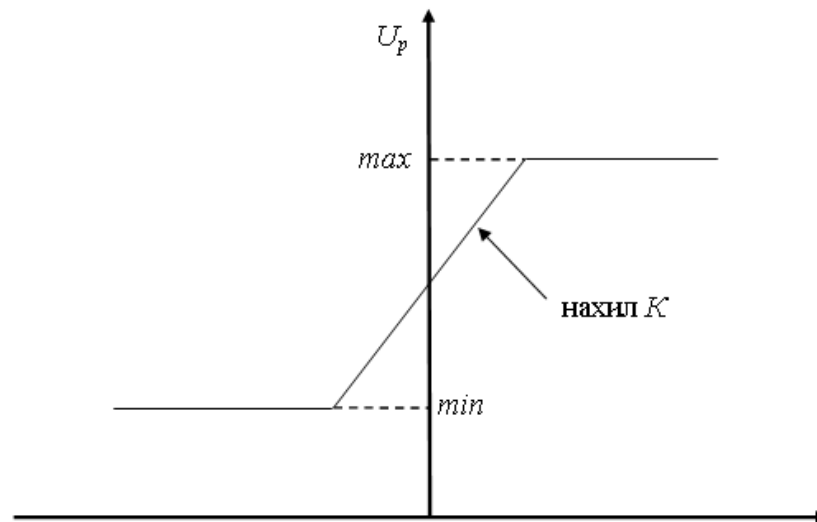


Рисунок 2.11 – Пропорційне регулювання

Якщо пропорційний регулятор має дуже велике підсилення, він веде себе як двохпозиційний регулятор. Інтегральна частина регулятора використовується для усунення стаціонарних похибок. Її сенс інтуїтивно зрозумілий. Якщо замкнута система, що складається з фізичного процесу і регулятора, досягла стаціонарного стану, всі її сигнали, зокрема $e(t)$ і $u(t)$ постійні. Стаціонарне стан може зберегтися лише за умови, що інтегральна частина $u(t)$ постійна, в іншому випадку $U_I(t)$ буде змінюватися. Відповідно, інтегральна частина залишається постійною якщо $e(t)$ дорівнює нулю.

Стала часу інтегрування T_i - присутня в знаменнику рівняння таким чином, значення окремих складових рівняння регулятора виявляються співрозмірними. Підтвердження цьому добре видно з перехідної характеристики пропорційно-інтегруючого регулятора. Відразу після стрибка помилки $e(t)$ на виході регулятора маємо $K \cdot e$. З плином часу T_i - вихідна величина регулятора стає вдвічі більше.

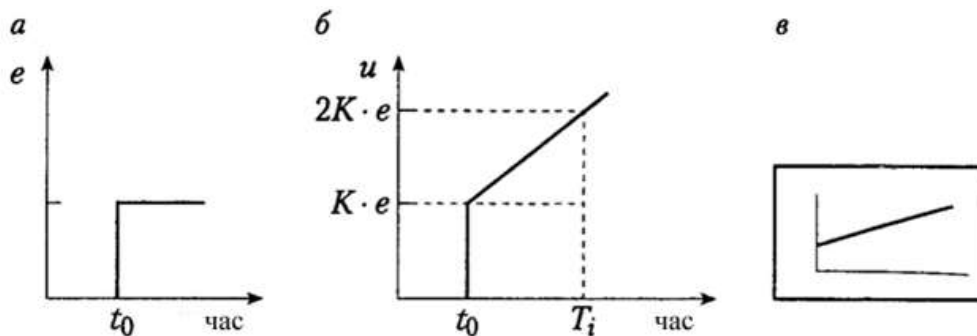


Рисунок 2.12 – Перехідна характеристика ПІ-регулятора : a – скачок похибки відбувається в момент t_0 ; b – вихід інтегральної частини зростає з часом до тих пір, поки похибка постійна; c – позначення ПІ-регулятора на блок-схемі

Регулятор можна також описати за допомогою перетворення Лапласа

$$U(s) - U_0(s) = \delta U(s) = U_p(s) + U_i(s) + U_D(s) = K \cdot \left[1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right] E(s) =$$

$$= K \frac{1 + T_i \cdot s + T_i \cdot T_d \cdot s^2}{T_i \cdot s} \cdot E(s)$$

(2.33)

де $U_p(s)$, $U_d(s)$ і $U_D(s)$ - зображення Лапласа для компонент сигналу $u_p(t)$, $u_l(t)$, і $u_D(t)$ відповідно. Ступінь чисельника перевершує ступінь знаменника, тому посилення регулятора наближене до нескінченності при високих частотах - це наслідок диференціальної складової. На практиці диференціювання не можна виконати точно, тому використовується апроксимація першого порядку з постійною часу T_f і рівняння ПІД регулятора приймає вигляд

$$\delta U(s) = U_p(s) + U_i(s) + U_D(s) = K \cdot \left[1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + \frac{T_d \cdot s}{1 + T_f \cdot s} \right] \cdot E(s)$$

(2.34)

Часто стала часу фільтру нормалізується відносно сталої часу диференціювання

$$T_f = \frac{T_d}{N}, \quad (2.35)$$

де N - число порядку 5-10. Посилення диференціальної частини регулятора на високих частотах при цьому обмежена значенням $K \cdot N$. ПІД - регулятор являє собою окремий випадок узагальненого регулятора і може бути виражений через поліноми R , S і T . Попереднє рівняння можна переписати у вигляді

$$T_i \cdot s \cdot (1 + T_f \cdot s) \cdot \delta U(s) = K \cdot [T_i \cdot s \cdot (1 + T_f \cdot s) + 1 \cdot T_f \cdot s + T_i \cdot T_d \cdot s^2] \cdot E(s)$$

(2.36)

Якщо цей вираз розділити на $T_i \cdot T_f$, то в результаті отримаємо ПІД-регулятора форматі

$$R(s) = s^2 + \frac{1}{T_f} \cdot s, \quad (2.37)$$

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$S(s) = T(s) = K \cdot \left[1 + \frac{T_d}{T_f} \right] \cdot s^2 + K \cdot \left[\frac{1}{T_f} + \frac{1}{T_i} \right] \cdot s + \frac{K}{T_i \cdot T_f}. \quad (2.38)$$

Як уже зазначалося, регулятор, описуваний цим рівнянням, може зсунути всі полюса і тим самим змінити динамічні властивості замкненої системи. Завдяки тому що ПД - регулятор являє собою систему другого порядку, можна успішно застосовувати для управління процесами з динамікою другого порядку. Насправді більшість технічних процесів мають порядок вище, ніж другий, однак ПД - регулятори часто можна успішно використовувати і для управління такими процесами. Це пов'язано з тим, що багато процесів, що мають у дійсності динаміку більш високого порядку, наближено ведуть себе подібно системам другого порядку. У системах, які не можна апроксимувати рівняннями другого порядку, застосування ПД - регуляторів не рекомендується.

2.7. Реалізація ПД-регулятора

При реалізації регулятора необхідно прийняти до уваги багато різних факторів. Перш за все слід розробити дискретну модель регулятора і визначити відповідну частоту вибірки. Амплітуда вихідної величини регулятора повинна бути "реалістичною", тобто перебувати між мінімальним і максимальним допустимими значеннями. Це обмеження викликає додаткові проблеми при реалізації та експлуатації. У багатьох застосуваннях повинен бути обмежений не тільки вихідний сигнал, але і швидкість його зміни через фізичних можливостей виконуючих механізмів і запобігання їх надмірного зносу. Зміна налаштувань параметрів і переключення з автоматичного режиму роботи на ручний або інші зміни умов експлуатації не повинні призводити до збурень регульованого процесу.

Регулятори можна створити за аналоговою технологією на базі операційних підсилювачів або, що стає все більш поширеним, як цифрові пристрої на основі мікропроцесорів.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Незважаючи на те що цифрова технологія має багато переваг, аналоговий підхід, як і раніше зберігає свої позиції, оскільки він є основою для нових рішень. До очевидних переваг цифрових регуляторів відноситься можливість за допомогою каналів зв'язку з'єднувати їх один з одним, що дозволяє переводити обмін даними та застосовувати дистанційне керування.

2.7.1. Дискретна модель ПІД-регулятора

Для того щоб аналоговий регулятор реалізувати програмно, необхідна дискретна модель. Якщо регулятор спочатку проектується на базі аналогового опису, а потім будується його дискретна модель, при досить малих інтервалах вибірки похідні за часом замінюються кінцевими різницями, а інтегрування - підсумовуванням. Помилка вихідної величини процесу обчислюється для кожної вибірки

$$e(kh) = u_c(kh) - y(kh) \quad (2.39)$$

Передбачається, що інтервал вибірки h є постійним. Будь-які зміни сигналу, які могли підійти протягом інтервалу вибірки, не враховуються.

Існує два типи алгоритму регулятора - позиційний і збільшень. Ми розглянемо тільки алгоритм прирощення.

Алгоритм прирощення. Альтернативним підходом є алгоритм ПІД - регулятора, в якому обчислюється лише зміна його вихідного сигналу. Алгоритм збільшення (incremental form) ПІД - регулятора зручно застосовувати, якщо виконавчий механізм являє собою різновид інтегратора.

В алгоритмі збільшень розглядаються тільки зміни вихідного сигналу від моменту часу $(k-1)h$ до моменту kh . Алгоритм регулювання записується у вигляді

$$\Delta u(kh) - u[(k-1)h] = \Delta u(kh) + \Delta u_I(kh) + \Delta u_D(kh) \quad (2.40)$$

Пропорційна частина алгоритму прирощень обчислюється з рівняння

$$\Delta u_p(kh) = u_I(kh) - u_p[(k-1)h] = K[e(kh) - e[(k-1)h]] =$$

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$= K\Delta e(kh) \quad (2.41)$$

інтегральна частина

$$\Delta u_I(kh) = u_I(kh) - u_I[(k-1)h] = K \cdot \alpha \cdot e(kh) \quad (2.42)$$

і диференційна частина

$$\Delta u_D(kh) = \beta \cdot \Delta u_D[(k-1)h] - K \cdot \frac{T_d}{h} \cdot (1 - \beta) \cdot [\Delta y(kh) - \Delta y[(k-1)h]] \quad (2.43)$$

де

$$\Delta y(kh) = y(kh) - y[(k-1)h] \quad (2.44)$$

З обчислювальної точки зору алгоритм надзвичайно простий. Для його застосування як правило, досить операцій з плаваючою точкою ординарної точності. У цьому алгоритмі не виникає проблем через насичення. При перемиканні з ручного режиму на автоматичний регулятор, який обчислює прирощення не вимагає присвоєння початкового значення керуючому сигналу U_0 . Невеликим недоліком алгоритму прирощення є необхідність враховувати інтегральну складову. Опорне значення скорочується як в пропорційній, так і диференційній частинах, починаючи з другої вибірки після його зміни. Тому, якщо використовується регулятор на базі алгоритму прирощення без інтегральної складової, можливий дрейф керованого процесу від опорного значення.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

2.8. Ідеологія побудови системи керування на FPGA

На рис.2.12 узагальнена структурна схема управління. За даною схемою можна визначити, які інтерфейси повинні бути присутні у системі.

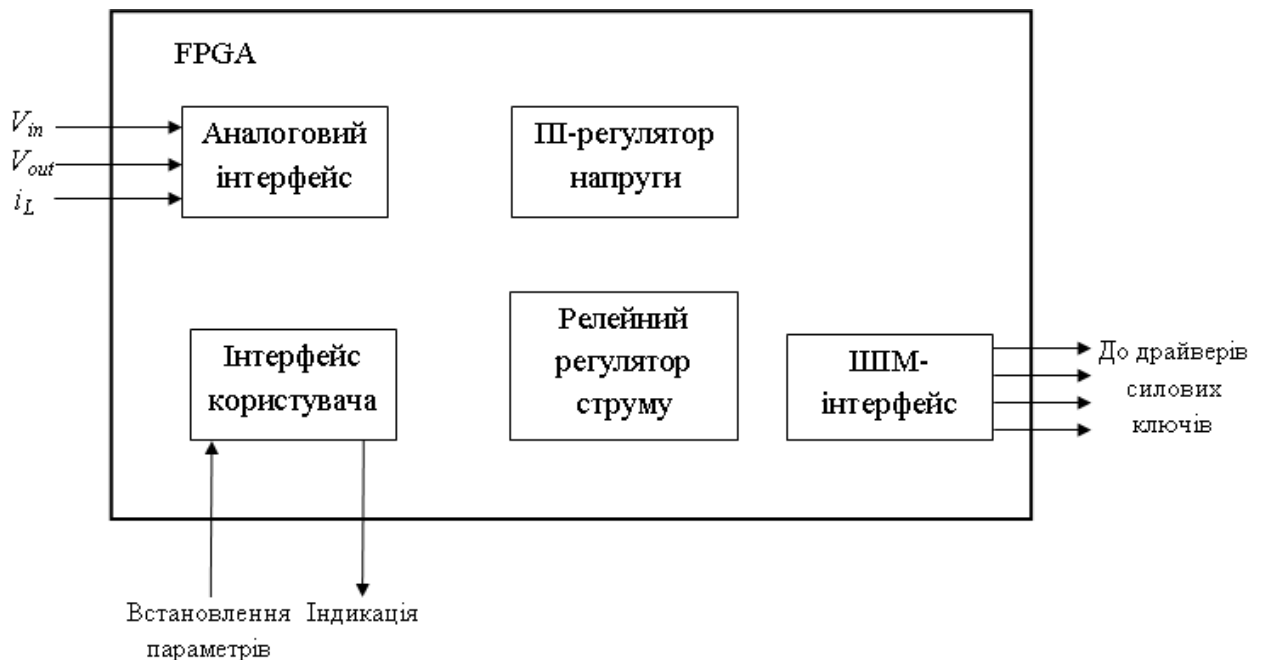


Рисунок 2.12 – узагальнена структурна схема керування

Аналоговий інтерфейс – призначений для організації зв'язку FPGA з зовнішнім аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Система повинна проводити дискретизацію трьох аналогових сигналів: V_{in} – вхідної напруги; V_{out} – вихідної напруги; i_L – вхідного струму. Тут можна використовувати або три ідентичних АЦП, або один АЦП з аналоговим мультиплексором.

ШІМ-інтерфейс – формує керуючі сигнали для силових ключів. Ці сингали подаються на драйвери.

Інтерфейс користувача – служить для введення установочних параметрів і введення необхідної інформації. Інформація, наприклад, може виводитись на символний РКІ.

Система також має у своєму складі два окремо оформлених внутрішніх блока: ПІ-регулятор напруги і релейний регулятор струму.

Розглянемо внутрішній взаємозв'язок блоків системи (рис.2.13).

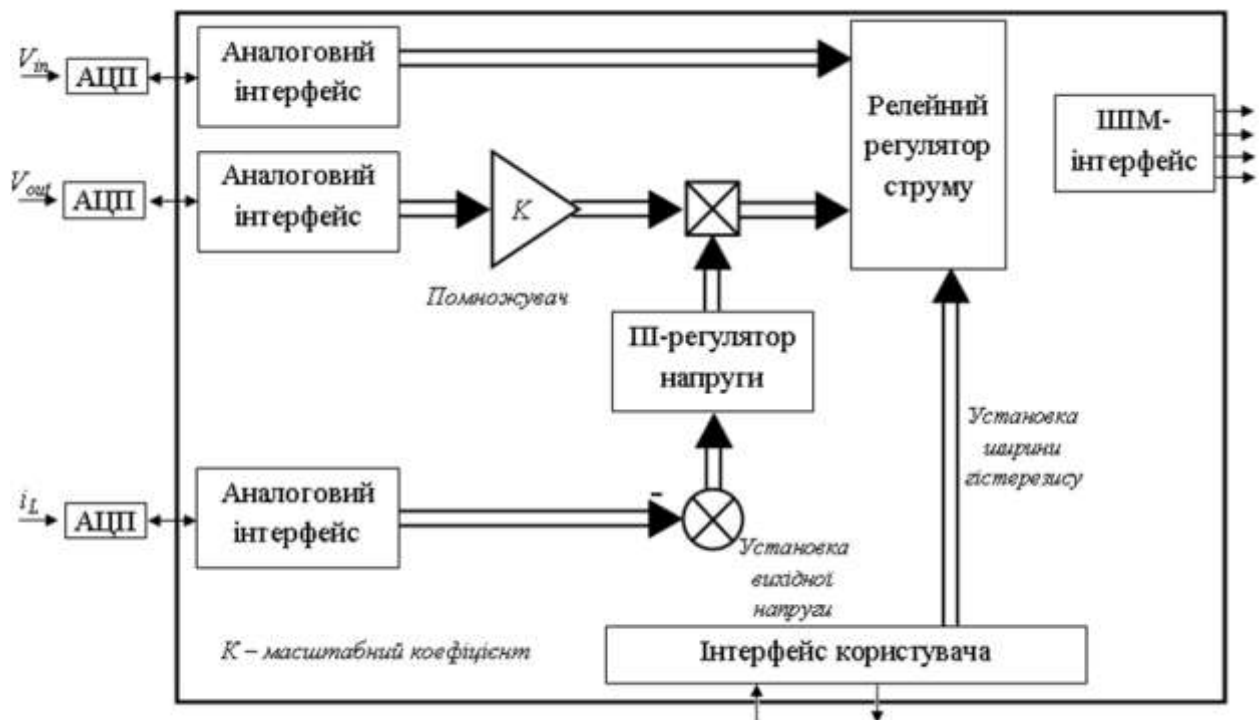


Рисунок 2.13 – Внутрішній взаємозв'язок системи

Декомпозиція системи на окремі блоки дозволяє спроектувати систему по принципу «зверху-вниз», тобто розробляти усі блоки незалежно один від одного. Реалізація основних блоків на мові VHDL представлена нижче.

VHDL-код реалізації ПІ-регулятора напруги представлений у лістингу 1

Лістинг 1

```
entity PI is
    port(
        RSTn: IN bit;
        CLK: IN bit;
        Uc: IN integer range 0 to 16;
        Y: IN integer range 0 to 16;
        C1: IN integer range 0 to 16;
        K: IN integer range 0 to 16;
        Umax: IN integer range 0 to 16;
        Umin: IN integer range 0 to 16;
        Ud: OUT integer range 0 to 16);
end PI;

architecture RTL of PI is
    signal I: integer range 0 to 16;
begin
    p0: process(RSTn, CLK)
        variable e: integer range 0 to 16;
        variable u: integer range 0 to 16;
        variable x: integer range 0 to 16;
        variable Ipart: integer range 0 to 16;
    begin
        if (RSTn='1') then
            I<=0;
        elsif (CLK'event and CLK='1') then
            Ipart:=I;
            I:=Ipart+e;
            if (I>Umax) then
                I:=Umax;
            elsif (I<Umin) then
                I:=Umin;
            end if;
            Ud:=I;
        end if;
    end process;
end RTL;
```

```

e:=Uc-Y; -- обчислення помилки
Ipart:=I; -- присвоїти попередній стан інтегральної
складової
Ipart:=Ipart+C1*e; -- обчислення інтегрального складника
x:=K*e+Ipart; -- обчислення виходу регулятора
if(x<Umin) then
    u:=Umin;
elseif(x<Umax) then
    u:=x;
else
    u:=Umax;
end if;
Ipart:=u-K*e; -- антинасичувальна поправка
I<=Ipart; -- збереження поточного значення інтегральної
складової
Ud<=u; -- встановлення виходу регулятора
end if;
end process;
end RTL;

```

VHDL-код реалізації релейного регулятора струму представлений у лістингу 2

Лістинг 2

```

entity RelayReg is
    port(
        CLK:IN bit; --бітовий вхід синхронізації
        Iset: IN integer range 0 to 16; -- вхід устанавлення струму
        Ifb: IN integer range 0 to 16; -- сигнал зворотного зв'язку
        DeadZone: IN integer range 0 to 16; -- зона нечутливості
        Q: OUT bit); --вихід регулятора
end RelayReg;

architecture RTL of RelayReg is
    begin
        p0: process(CLK)
            variable UpperLimit: integer range 0 to 16; -- змінна для обчислення верхнього
            порогу спрацьовування
            variable LowerLimit: integer range 0 to 16; -- змінна для обчислення нижнього
            порогу спрацьовування
            begin
                if (CLK'event and CLK='1') then -- при позитивному фронті сигналу
                синхронізації
                    UpperLimit:=Iset+DeadZone; -- обчислити верхній
                    LowerLimit:=Iset-DeadZone; -- і нижній поріг
                    if (Ifb>UpperLimit) then
                        Q<='1'; -- перевірити умови спрацьовування
                    регулятора
                    elseif(Ifb<LowerLimit) then
                        Q<='0';
                    end if;
                end if;
            end process;
        end RTL;

```

VHDL-код ШИМ-інтерфейса представлений у лістингу 3

Лістинг 3

```

entity PWM_Interface is
    port (
        X: in bit; -- сигнал з виходу релейного регулятора струму
        Q: out bit_vector(0 to 3)); -- управляючі сигнали на транзистори
end PWM_Interface;

architecture structure of PWM_Interface

```

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

begin
-- встановлення виходу
Q(0)<=X;      --затвор T1
Q(3)<=X;      --затвор T4
Q(1)<= not X; --затвор T2
Q(2)<= not X; --затвор T3
end PWM_Interface;

```

2.9. Висновки до розділу 2

1. Система керування транзисторним випрямлячем побудована за принципом підпорядкованого керування. Тобто, має в своєму складі внутрішній швидкодіючий регулятор струму та зовнішній регулятор напруги.
2. В вихідній напрузі присутні пульсації з частотою в два рази більшою ніж частота мережі.
3. При проектуванні системи була виконана декомпозиція на блоки: аналоговий інтерфейс, ШІМ-інтерфейс, інтерфейс користувача, ПІ-регулятор напруги і релейний регулятор струму.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.РЗ			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Моделювання транзисторного випрямляча	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробник		Донченко В. В.	<i>ВВ</i>				48	
Консультант								
Н. контр.		Добрінова Л. П.	<i>ЛП</i>					
Керівник		Рябенський В. М.	<i>ВМ</i>					
Зав. каф.		Рябенський В. М.	<i>ВМ</i>			НУК імені адмірала Макарова		

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНЗИСТОРНОГО ВИПРЯМЛЯЧА

3.1. Дослідження розімкнутої системи

На рис.3.1 зображена MATLAB-модель для дослідження транзисторного випрямляча без зворотного зв'язку по вихідній напрузі. У даній моделі використовується замкнутий спосіб формування ШІМ.

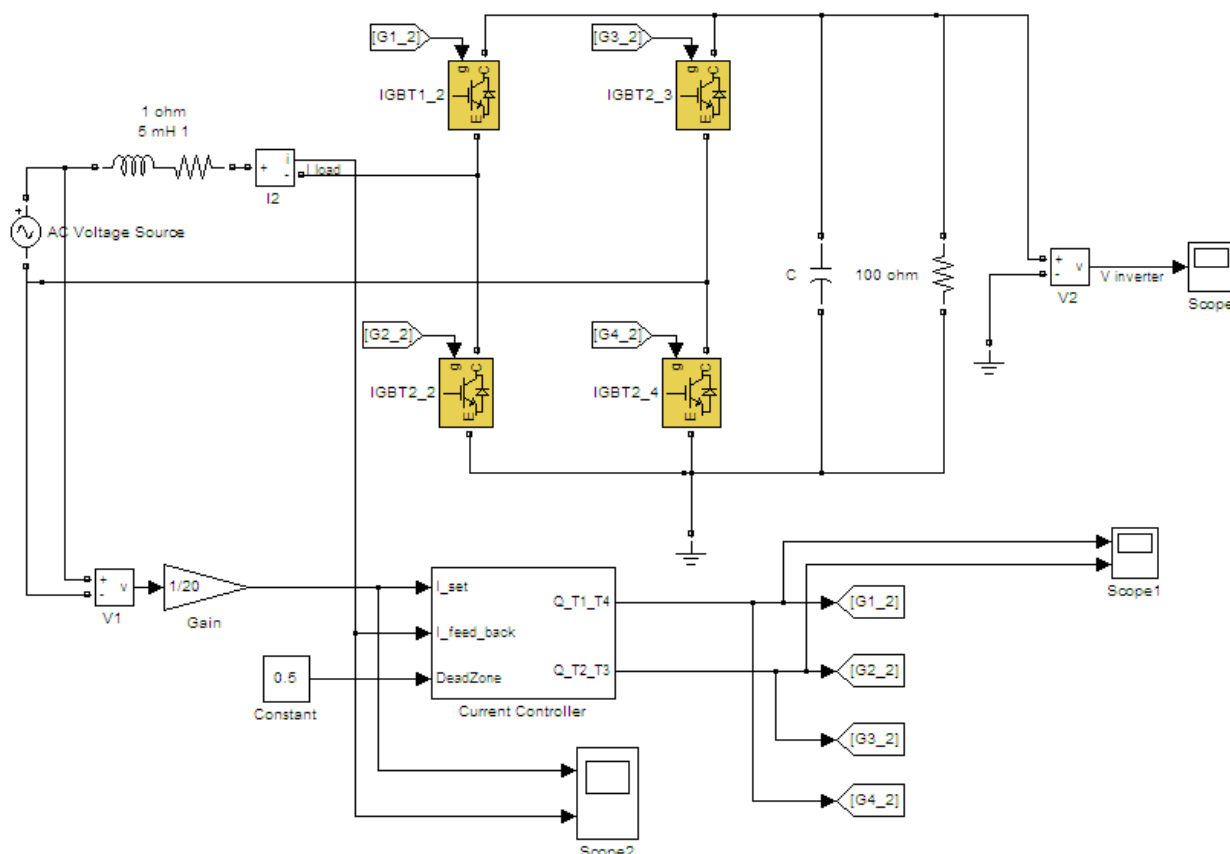


Рисунок 3.1 – Модель для дослідження розімкнутої системи

Реалізація підсистеми гістерезисна ШІМ (Current controller) представлена на рис.3.2.

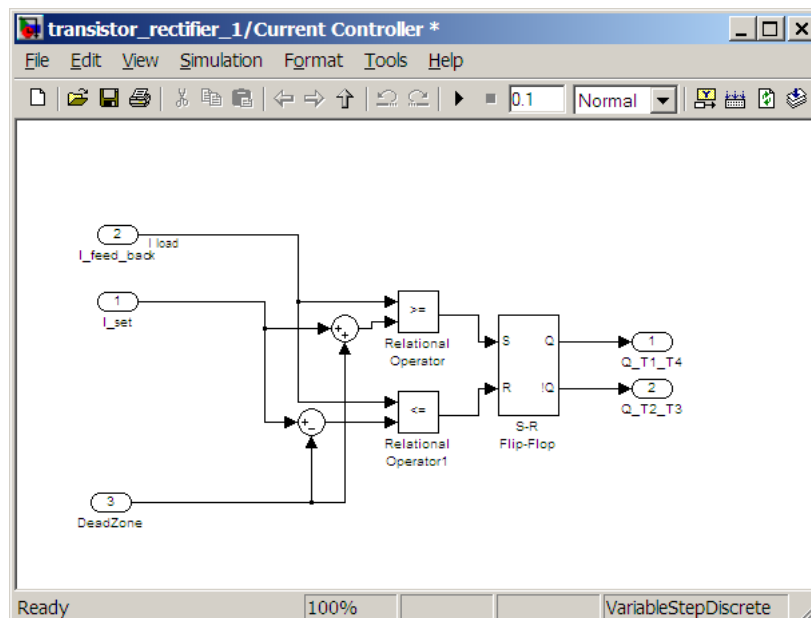


Рисунок 3.2 – Підсистема Current controller

На рис.3.3-3.5 показані результати моделювання для транзисторного випрямляча з параметрами: $L = 10$ мГн, $C = 200$ мкФ, $R = 100$ Ом. Амплітуда напруги живлення становить 100 В. Задаюче значення для регулятора струму дорівнює 5 А, $\cos\varphi = 1$.

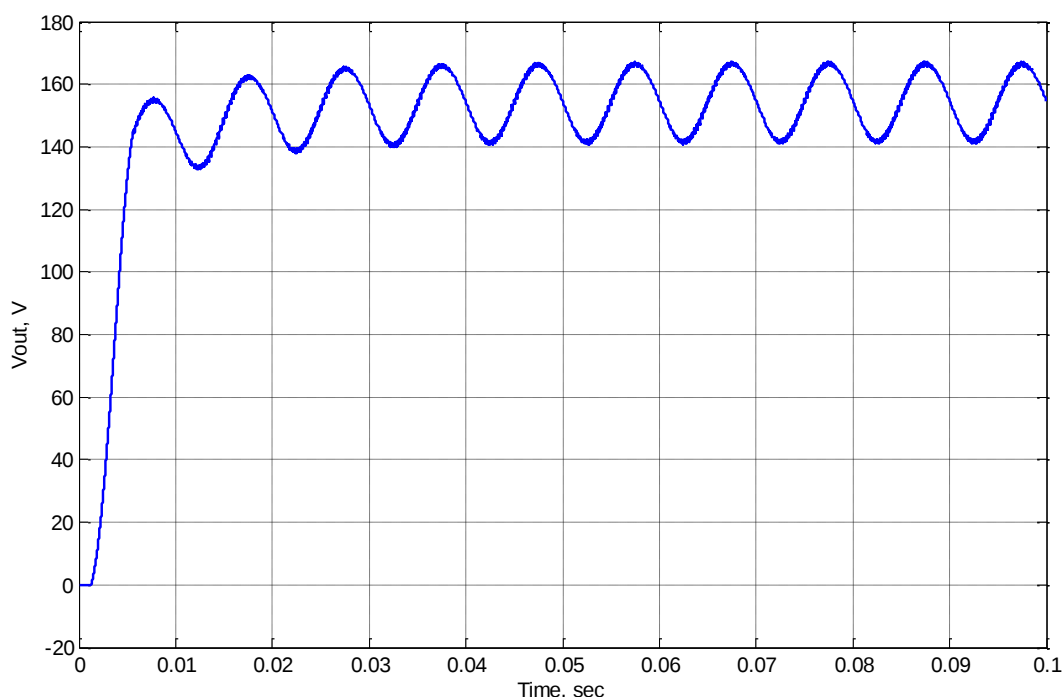


Рисунок 3.3 – Вихідна напруга транзисторного випрямляча

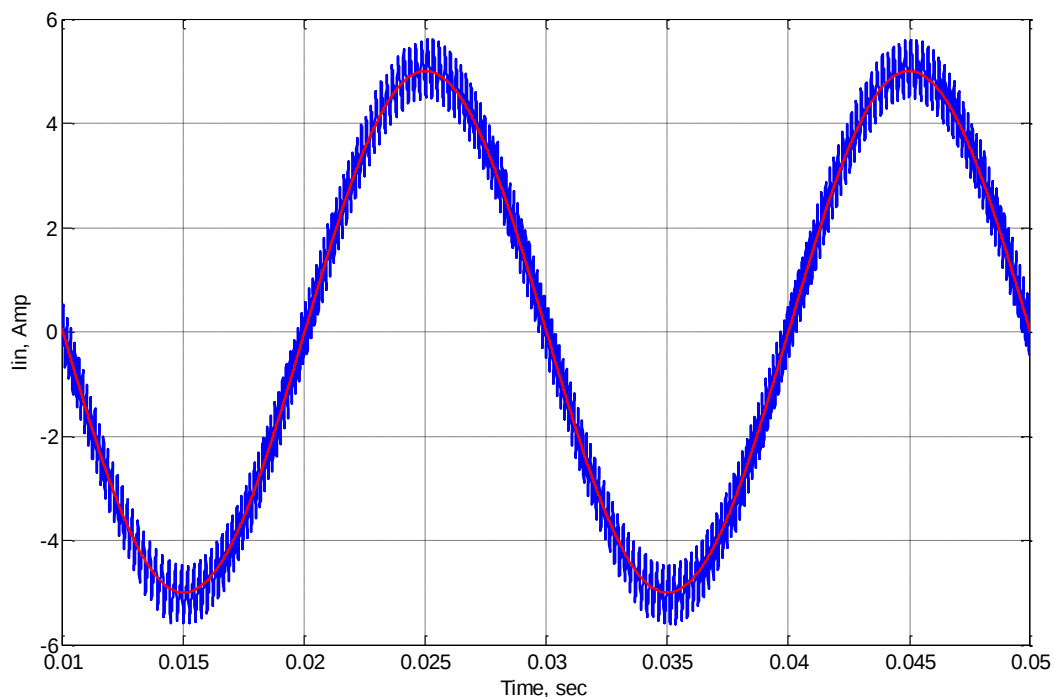
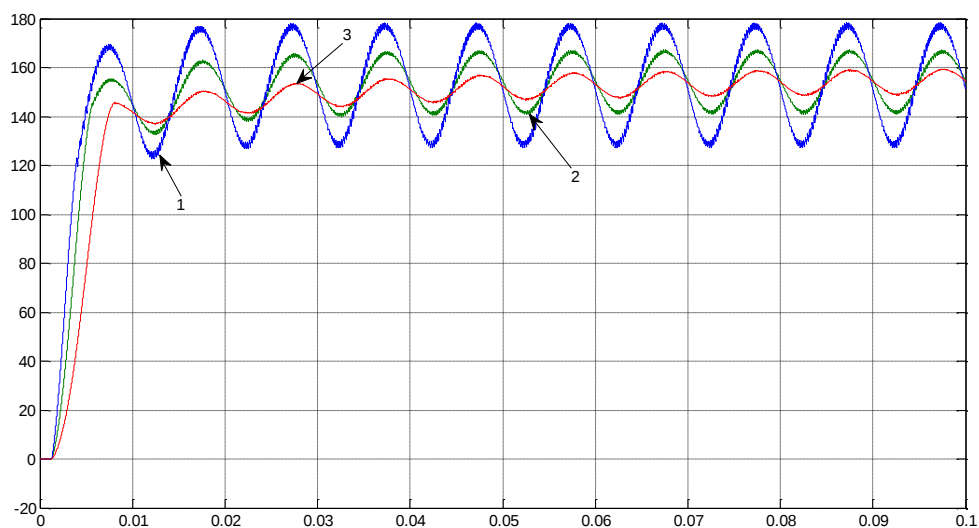


Рисунок 3.4 – Вхідний струм транзисторного випрямляча

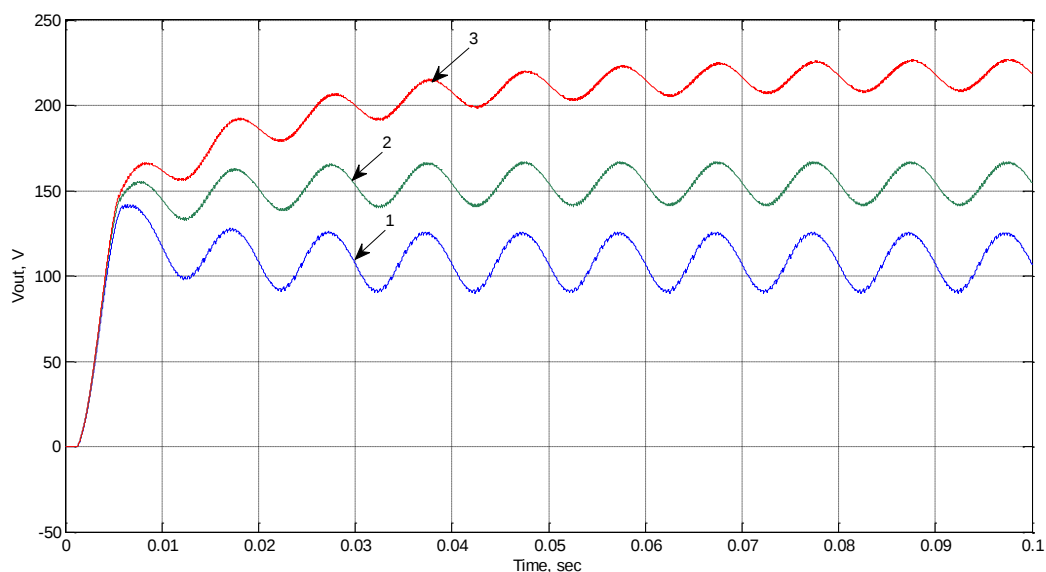
На рис.3.5 представлені графіки вихідної напруги при зміні ємності вихідного фільтра. Зі збільшенням ємності амплітуда пульсацій випрямленої напруги зменшується.



(1 - $C = 100 \text{ мкФ}$, 2 - $C = 200 \text{ мкФ}$, 3 - $C = 500 \text{ мкФ}$)

Рисунок 3.5 – Вихідна напруга випрямляча при зміні ємності. Опір навантаження $R = 100 \text{ Ом}$

На рис.3.6 представлені графіки вихідної напруги при зміні опору навантаження. Зі збільшенням R спостерігається зростання середнього значення випрямленої напруги.



(1 - $R = 50 \text{ Ом}$, 2 - $R = 100 \text{ Ом}$, 3 - $R = 200 \text{ Ом}$)

Рисунок 3.6 – Вихідна напруга випрямляча при зміні опору навантаження.

Ємність конденсатора $C = 200 \text{ мкФ}$

Рис.3.7 – 3.10 містять результати моделювання при різному $\cos\phi$.

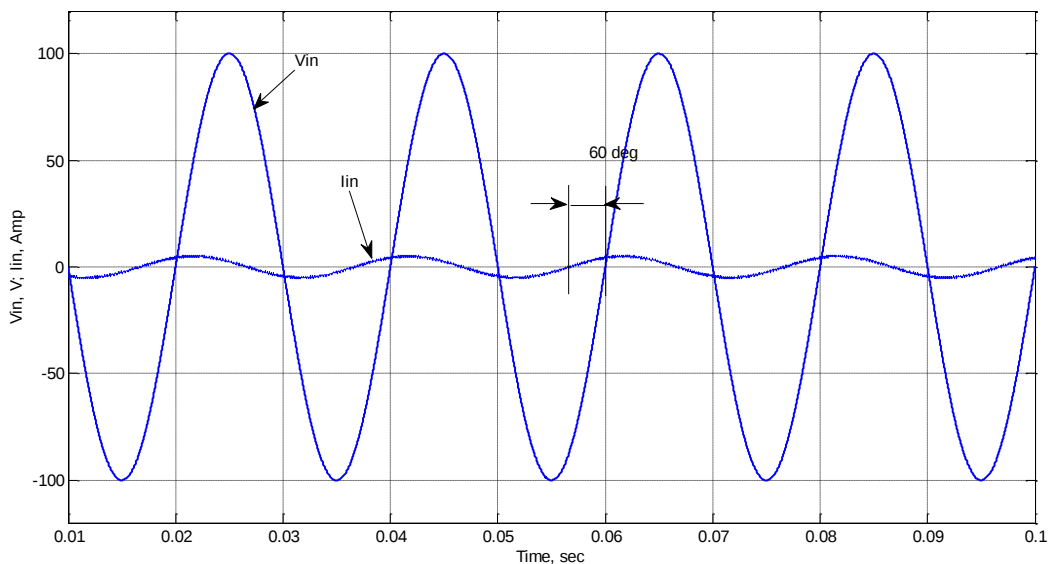


Рисунок 3.7 – Графіки вхідної напруги і струму при випереджаючому $\cos\phi$

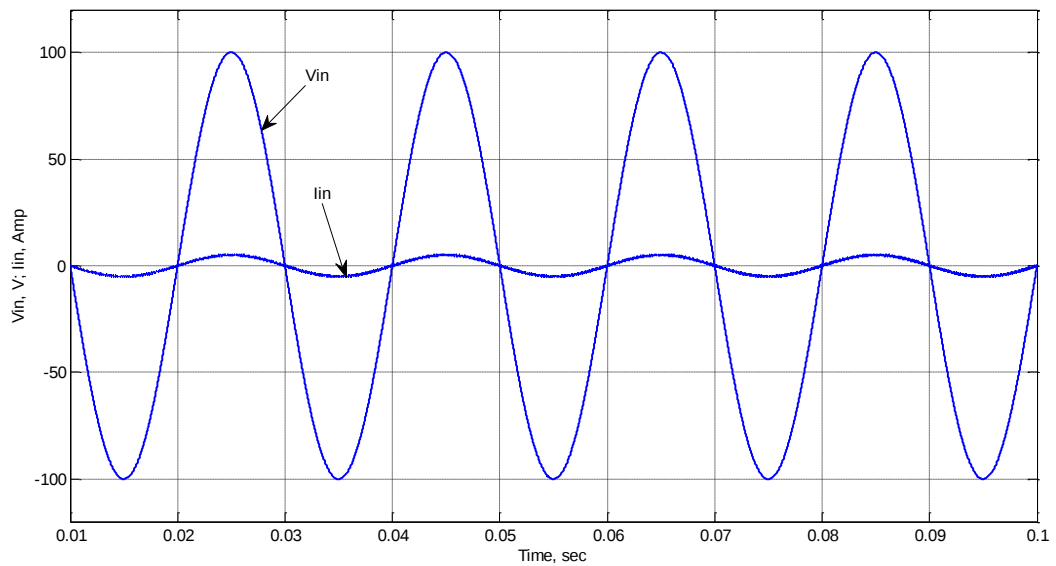


Рисунок 3.8 – Графіки вхідної напруги і струму при $\cos\varphi = 1$

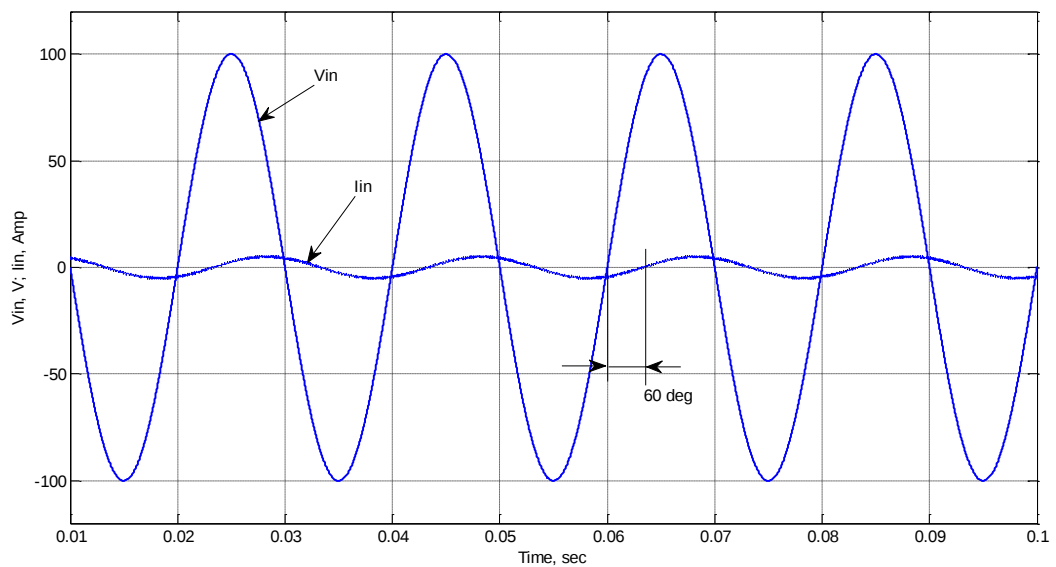


Рисунок 3.9 – Графіки вхідної напруги і струму при відстаючому $\cos\varphi$

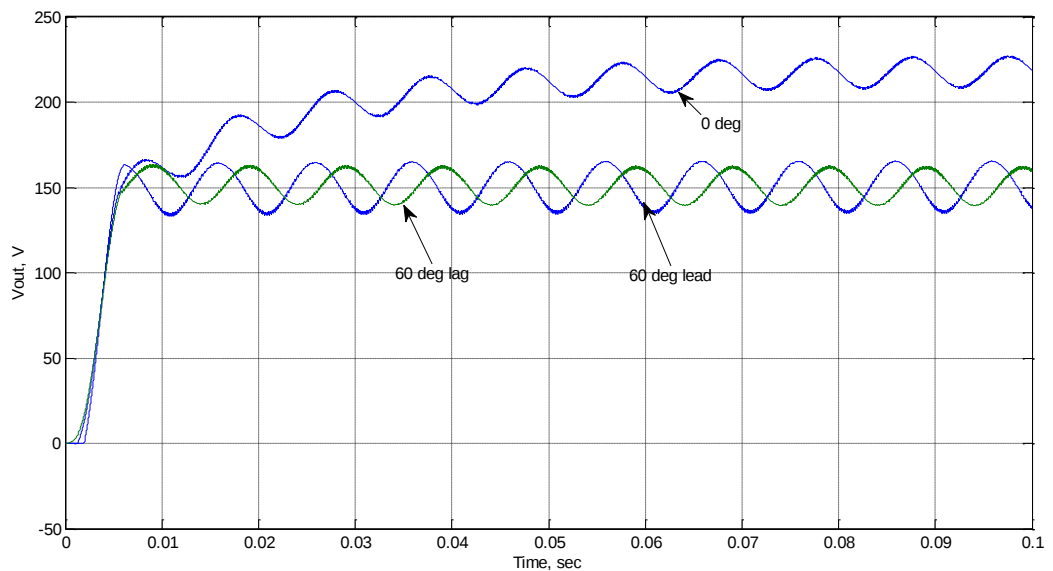


Рисунок 3.10 – Графіки вихідної напруги випрямляча
при різних $\cos\phi$

З графіка 3.10 видно, що якщо випрямляч працює в режимі генерації або споживання реактивної потужності, то відбувається зменшення середнього значення випрямленої напруги.

Вплив зміни частоти живлячої напруги представлено на рис.3.11.

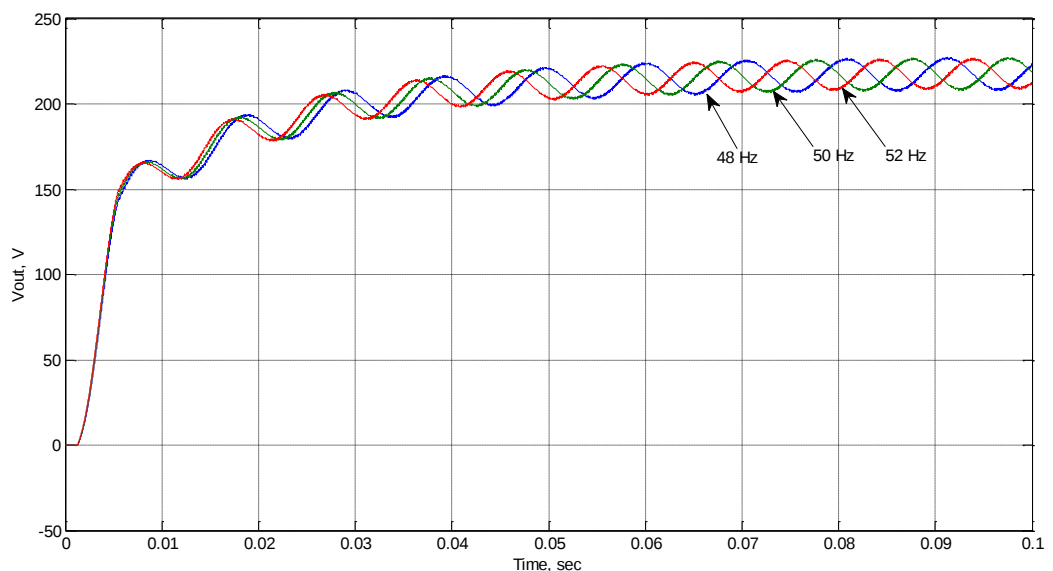


Рисунок 3.11 – Графіки вихідної напруги для різних частот напруги
живлення

Зміна частоти живлячої напруги слабо впливає на вихідну напругу випрямляча.

3.2. Дослідження замкнутої системи

Модель для дослідження замкнутої системи зображена на рис.3.12

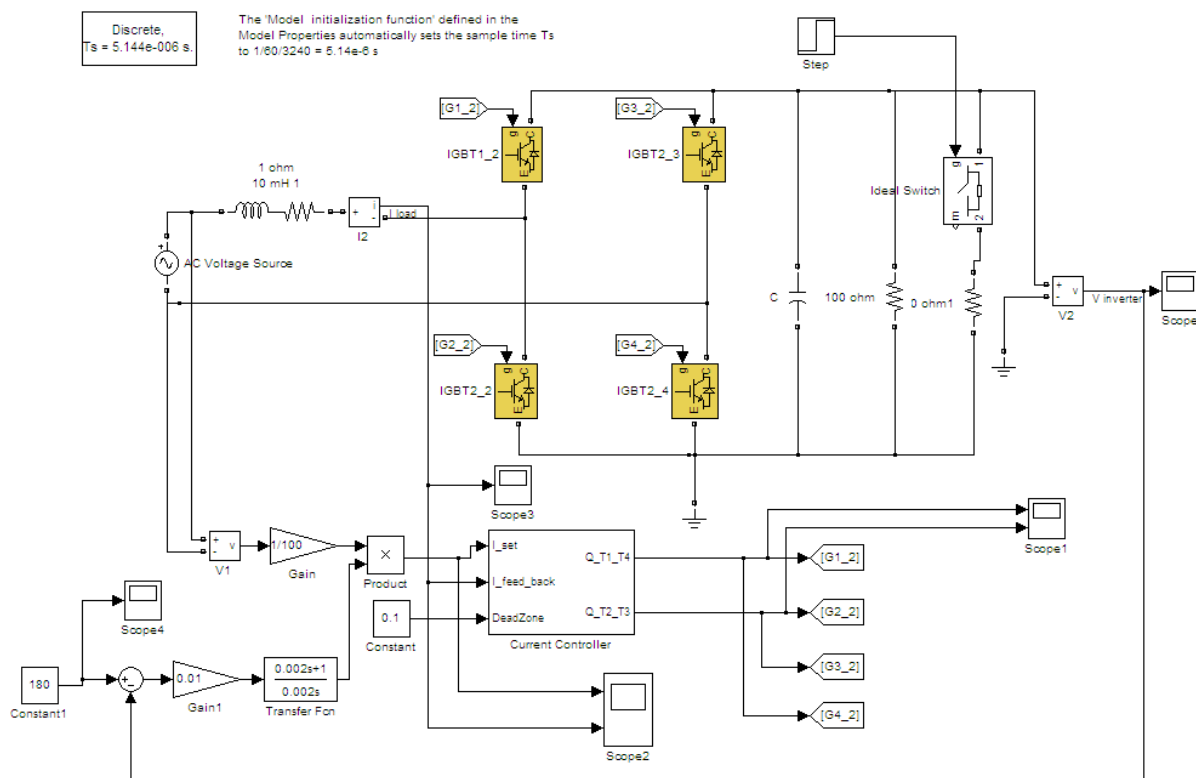


Рисунок 3.12 - Модель для дослідження замкнутої системи

Замкнута система містить у своєму складі ПІ-регулятор напруги.

На рис. 3.13 показана перехідна характеристика системи при зміні задаючого значення V_{set} з 150 до 180 В.

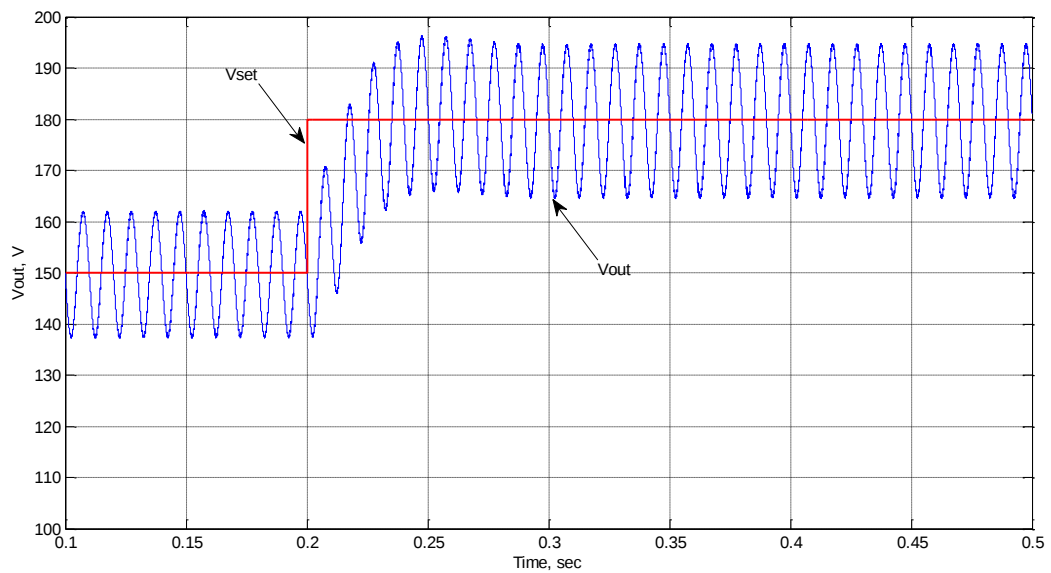


Рисунок 3.13 – Графік вихідної напруги

Зміна вхідного струму наведена на рис. 3.14.

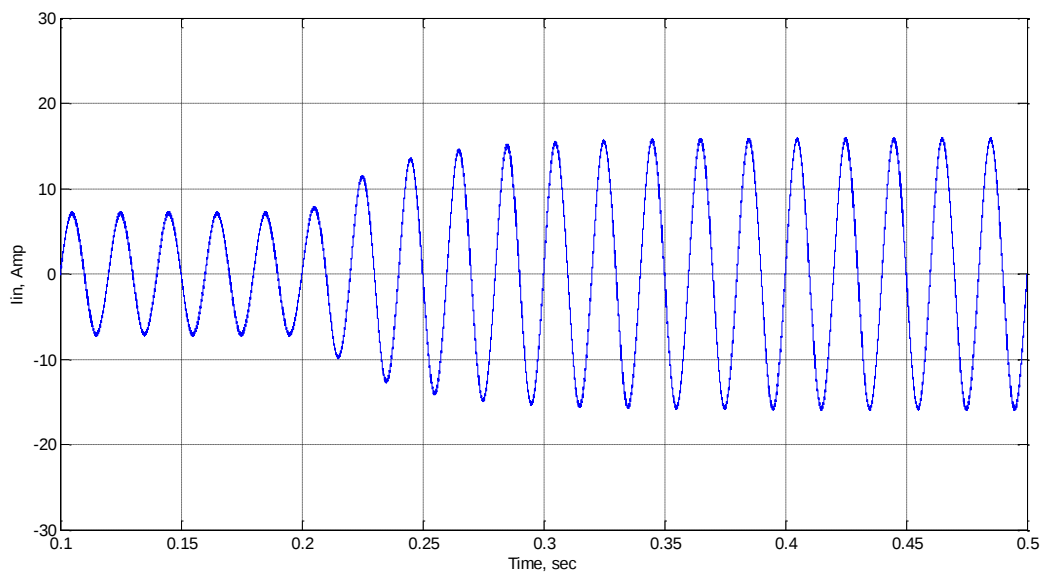


Рисунок 3.14 – Вхідний струм при зміні задаючого значення V_{set} з 150 до 180

В

Розглянемо динаміку випрямляча при провалі напруги живлення (рис. 3.15).

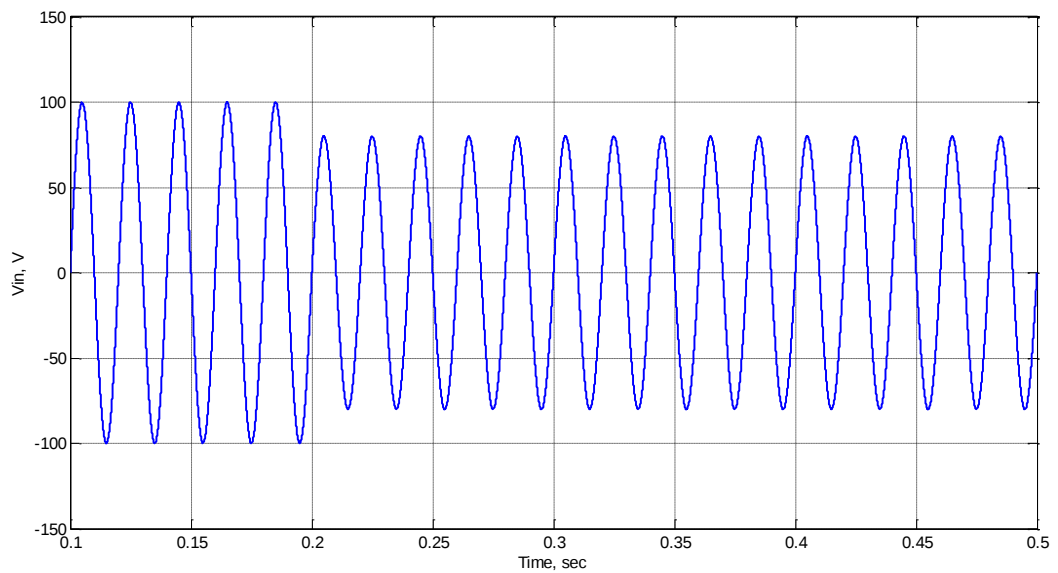


Рисунок 3.15 – Провал напруги живлення

На рис. 3.16 зображений графік зміни вихідної напруги.

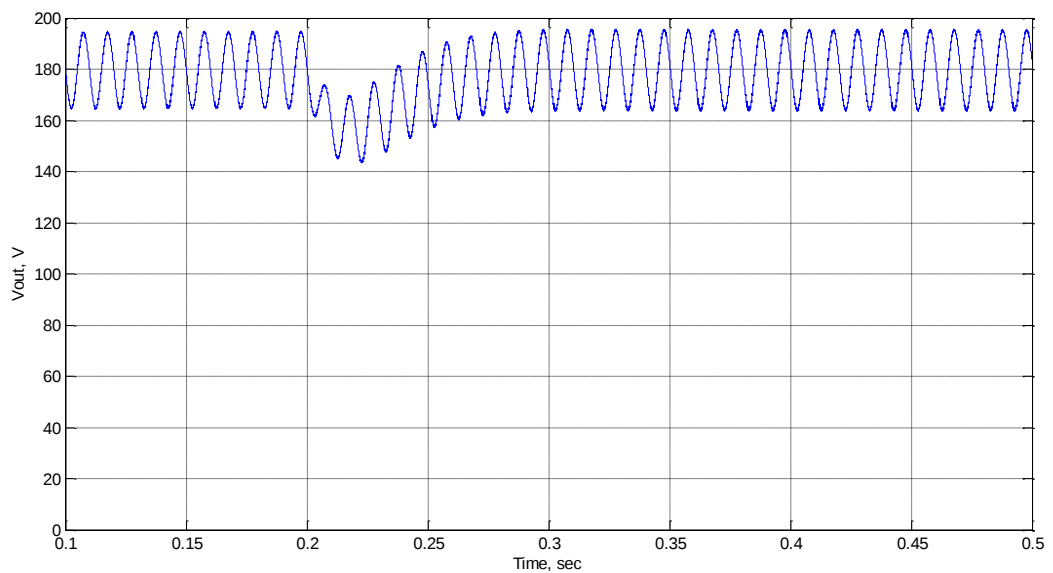


Рисунок 3.16 – Вихідна напруга випрямляча

З цього графіку видно що вихідна напруга випрямляча зменшується разом з напругою мережі, але через деякий час система стабілізує її значення.

Зміна вхідного струму у часі наведено на рис. 3.17.

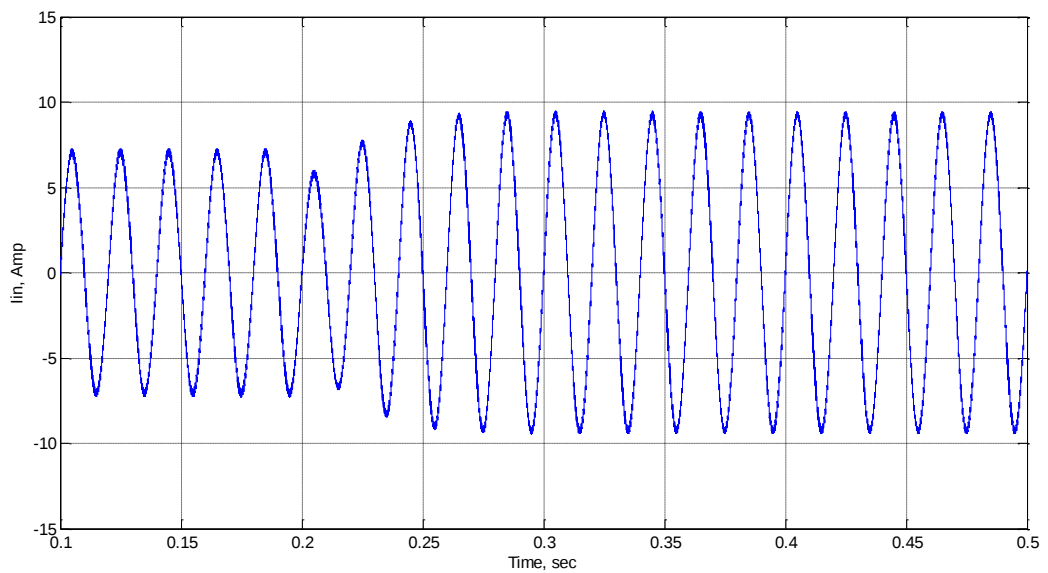


Рисунок 3.17 – Вхідний струм випрямляча

Далі розглянуто різке збільшення навантаження. Графік вигідної напруги при збільшенні навантаження представлений на рис.3.18, а графік вхідного струму на рис.3.19.

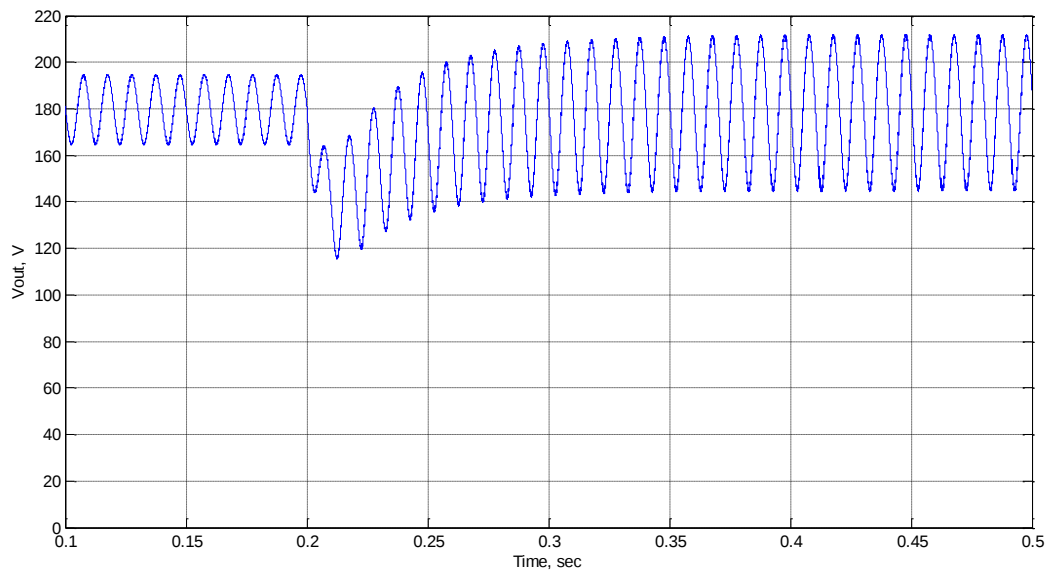


Рисунок 3.18 – Вихідна напруга при збільшенні навантаження

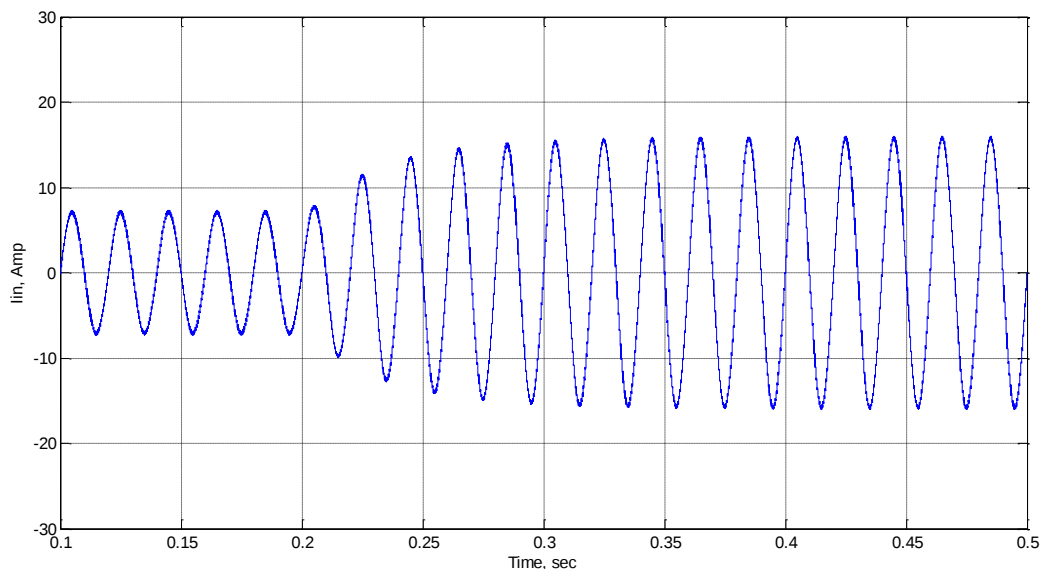


Рисунок 3.19 – Вхідний струм при збільшенні навантаження

Як видно з графіків система веде себе подібно до випадку з провалом наруги мережі живлення. В обох випадках система встановлює значення вихідної напруги за 0,1 с, при цьому споживаний струм збільшується. Можна зробити висновок, що система чутлива до зміни напруги живлення та зміни навантаження.

Проведемо дослідження реакції системи при зміні частоти мережі.

На рис.3.20 представлено графік зміни частоти мережі.

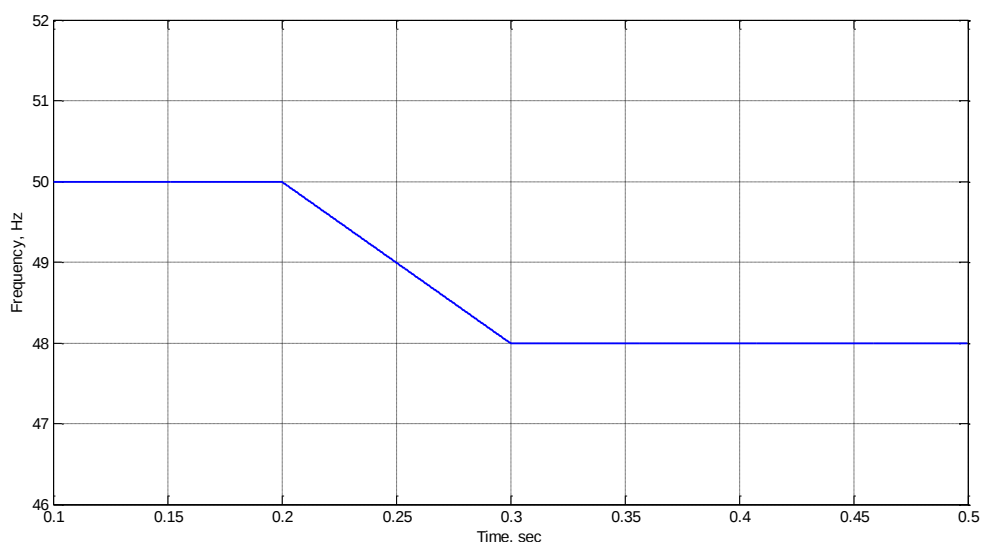


Рисунок 3.20 – Зміна частоти мережі

На рис.3.22 представлено графік вихідної напруги випрямляча при зміні частоти мережі.

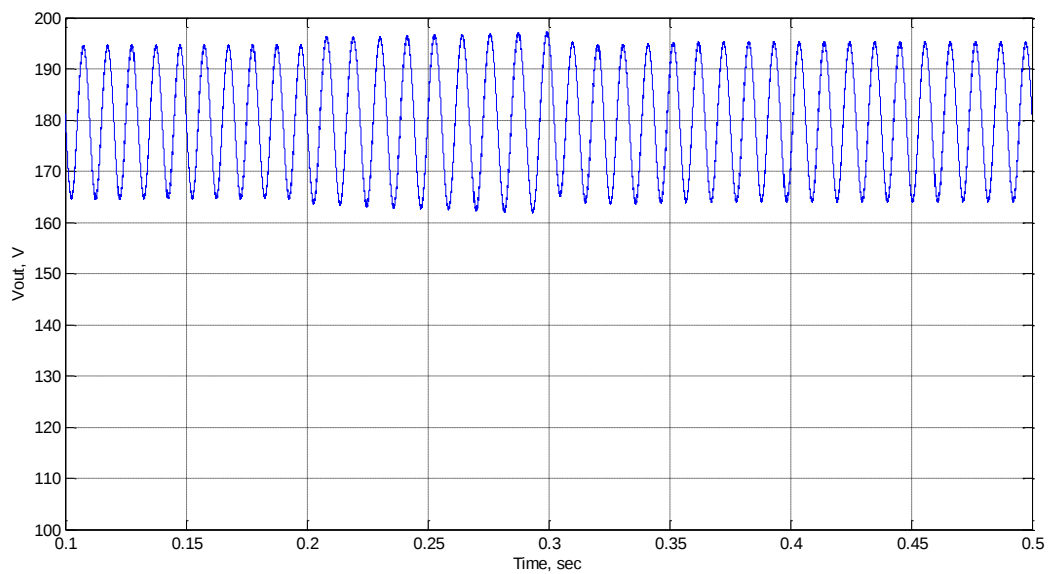


Рисунок 3.21 – Вихідна напруга випрямляча

На рис.3.22 представлено графік вхідного струму випрямляча.

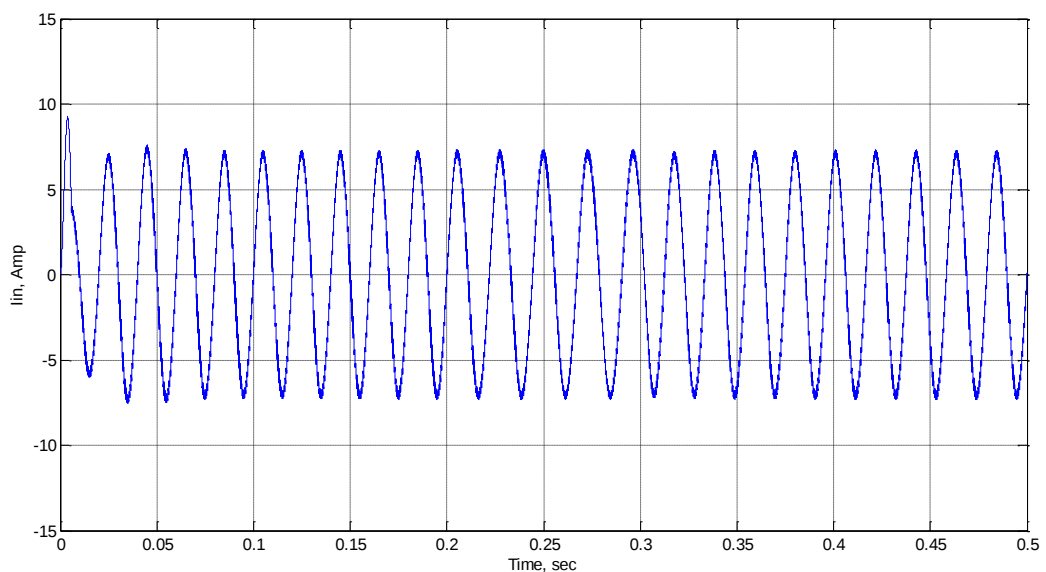


Рисунок 3.22 – Вхідний струм випрямляча

Можна зробити висновок, що споживаний струм не змінюється при зміні частоти мережі. Також спостерігається збільшення амплітуди вихідної напруги випрямляча.

3.3. Висновки до розділу 3

1. Основними впливаючими діями на транзисторний випрямляч який працює в складі судової мережі являються провали напруги живлячої мережі, зміна частоти мережі та зміна навантаження на випрямляч.

2. При збільшенні ємності вихідного фільтра амплітуда пульсацій випрямленої напруги зменшується. У розімкнутій системі при збільшенні навантаження спостерігається зменшення середнього значення випрямленої напруги. Якщо випрямляч працює в режимі генерації або споживання реактивної потужності, то відбувається зменшення середнього значення випрямленої напруги. Зміна частоти живлячої напруги слабо впливає на вихідну напругу випрямляча.

3. Використання ПІ-регулятора дозволяє усунути статичну похибку. Для заданих параметрів регулятора перехідні процеси проходять за 0,1 секунду. При збільшенні навантаження спостерігається збільшення пульсацій випрямленої напруги. При провалі частоти провалу напруги не спостерігається але при цьому під час перехідного процесу збільшуються пульсації випрямленої напруги.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Донченко В. В.	<i>ВВ</i>		Охорона праці	Літ.	Арк.	Аркушів
Консультант		Тубальцев А. М.					62	
Н. контр.		Добрінова Л. П.	<i>ЛП</i>			НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Рябенський В. М.	<i>ВМ</i>					
Зав. каф.		Рябенський В. М.	<i>ВМ</i>					

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці. Терміни та визначення. Повністю нешкідливих та безпечних виробництв не існує. це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Питання, які вирішує охорона праці: звести до мінімуму можливість захворювання або ураження працівника з одночасним забезпеченням комфорту при максимальному рівні праці. Реальні виробничі умови характеризуються наявністю шкідливих та небезпечних виробничих факторів.

Небезпечний виробничий фактор (НВФ) – це фактор, наявність якого за визначених умов призводить до травми або іншому погіршенню стану здоров'я. Наприклад неізольовані струмопровідні частини, системи під тиском, елементи систем та механізмів які рухаються.

Шкідливий виробничий фактор (ШВФ) – це фактор, вплив якого за визначених умов призводить до професійного захворювання або втраті працездатності. Наприклад: випромінювання, шум, вібрація, шкідливі речовини.

Дисципліна охорони праці комплексна та складається з чотирьох розділів:

- Законодавство з охорони праці;
- Виробнича санітарія;
- Техніка безпеки;
- Пожежна безпека.

Законодавством “ Про охорону праці ” ст.9, “ Про відпустки ” ст.7,8, “ Про пенсії ” ст.13 передбачено пільги і компенсації за важкі та шкідливі умови праці. Згідно Закону України від 14.10.92 р. № 44 ст. 669 “ Про охорону праці ” кожний громадянин має право на охорону праці.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		63

Стаття 6. Права громадян на охорону праці при укладенні трудового договору.

Стаття 7. Права працівників на охорону праці під час роботи на підприємстві.

Стаття 8. Соціальне страхування від нещасних випадків і професійних захворювань

Стаття 9. Право працівників на пільги і компенсації за важкі та шкідливі умови праці.

Стаття 11. Відшкодування власником шкоди працівникам у разі ушкодження їх здоров'я.

Стаття 12. Відшкодування моральної шкоди.

Стаття 14. Охорона праці жінок.

Стаття 15. Охорона праці неповнолітніх.

Стаття 16. Охорона праці інвалідів.

4.1. Потенційно небезпечні та шкідливі виробничі фактори

На людину в процесі її трудової діяльності можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори. *Небезпечні фактори* – це такі, внаслідок яких з працюючою людиною може трапитись нещасний випадок і різке погіршення здоров'я. *Шкідливі фактори* – це такі, які можуть викликати професійне захворювання. Між шкідливими і небезпечними виробничими факторами спостерігається деякий взаємозв'язок. У багатьох випадках наявність шкідливих факторів сприяє проявленню травмонебезпечних факторів. Наприклад, надмірна вологість у виробничому приміщенні та наявність струмопровідного пилу (шкідливі фактори) підвищують небезпеку поразки людини електричним струмом (небезпечний фактор).

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Задачею охорони праці є зведення до мінімуму ймовірності ураження або захворювання працюючої людини з одночасним забезпеченням її комфорту при максимальній продуктивності праці.

Оператори ЕОМ, оператори з підготовки даних, програмісти та інші працівники, робота яких тісно пов'язана з використанням комп'ютерної техніки, зіштовхуються з впливом таких фізично небезпечних і шкідливих виробничих факторів, як підвищений рівень шуму, підвищена температура навколишнього середовища, відсутність або недостатня освітленість робочої зони, електричний струм, статична електрика й т. ін. Велика кількість професійних користувачів ПК на своєму робочому місці також піддаються впливу таких психофізичних факторів, як розумова перенапруга, перенапруга зорових та слухових аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження. Вплив зазначених несприятливих факторів призводить до зниження працездатності, викликаного стомленням, що розвивається. Поява і розвиток стомлення пов'язані зі змінами, що виникають під час роботи в центральній нервовій системі, з гальмовими процесами в корі головного мозку. Тривале перебування людини в зоні комбінованого впливу різних несприятливих факторів може привести до професійного захворювання.

Виробниче освітлення. Одним з основних питань охорони праці є організація раціонального освітлення виробничих приміщень та робочих місць.

Правильно спроектоване та виконане виробниче освітлення покращує умови зорової праці, знижує втомлюваність, сприяє підвищенню продуктивності праці, благотворно впливає на виробниче середовище, здійснюючи позитивний психологічний вплив на працюючого, підвищує безпеку праці й знижує виробничий травматизм.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

В умовах сучасного виробництва важливим фактором покращення умов праці в цілому є оптимізація кількісних та якісних характеристик освітлення робочих місць. В сучасному виробництві радіотехнічного та електронного профілю оптимізація зорової праці набуває особливого значення в зв'язку з інтенсифікацією праці та прогресуючою тенденцією до мікромініатюризації радіоелектронної апаратури. Значна частина технологічних процесів у цих виробництвах пов'язана з роботами найвищої точності і, отже, характеризується високим ступенем напруженості зорової роботи. Втомлюваність органів зору залежить від ступеню напруженості процесів, супроводжуваних зорове сприйняття.

Вирішення питання раціонального освітлення виробничих приміщень і робочих місць покращує умови зорової роботи, послаблює зорове та нервово-мозкове стомлення, сприяє підвищенню уваги й покращенню координаційної діяльності. Медичні дослідження показали, що хороше освітлення також покращує діяльність дихальних органів, сприяючи покращенню поглинання кисню.

Напружена зорова робота внаслідок нераціонального освітлення може явитися причиною функціональних порушень в зоровому аналізаторі й привести до розладу зору, а в тяжких випадках – до повної його втрати.

Рівномірне розподілення яскравості в полі зору людини також має важливе значення для підтримки її працездатності. Якщо в полі зору постійно знаходяться поверхні, які значно відрізняються за яскравістю (освітленістю), то при переведенні погляду з сильно- на слабкоосвітлену поверхню око повинне переадаптовуватися. Часта переадаптація веде до розвитку втоми органів зору й ускладнює виконання виробничих операцій.

Виробничий шум. Одним із шкідливих факторів при роботі з ЕОМ виступає шум. *Шумом* є всякий небажаний для людини звук. Рівень шуму

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

вимірюється в одиницях, що виражають ступінь звукового тиску – децибелах (дБ). В залежності від рівня та характеру шуму, його тривалості, а також від індивідуальних особливостей людини, шум може по-різному впливати на неї. Шум у 20-30 дБ практично нешкідливий для людини і являє собою природний звуковий фон, без якого неможливе життя. Шум з верхньою межею приблизно 80 дБ сприймається як голосний. Шум у 130 дБ уже викликає в людини болюче відчуття, а, досягши 150 дБ, стає для неї нестерпним.

Шум, навіть коли він невеликий, створює значне навантаження на нервову систему людини, роблячи на нього психологічний вплив. Це особливо часто спостерігається в людей, зайнятих розумовою діяльністю. Слабкий шум по-різному впливає на людей. Визначальними факторами можуть бути: вік людини, стан здоров'я, вид праці. Вплив шуму залежить також від індивідуального відношення до нього. Так, шум, вироблений самою людиною, не турбує її, у той час як навіть невеликий сторонній шум може викликати сильний дратівний ефект.

Сильний шум викликає труднощі з розпізнанням кольірних сигналів, знижує швидкість сприйняття кольору, гостроту зору, зорову адаптацію, порушує сприйняття візуальної інформації. Довгий час людина скаржиться на нездужання. Симптоми – головний біль, запаморочення, нудота, надмірна дратівливість. Медичні обстеження показали, що, окрім зниження продуктивності праці, високі рівні шуму призводять до погіршення слуху. Тривалий вплив шуму з рівнем звукового тиску 85-90 дБ сприяє збільшенню числа помилок у роботі, знижує продуктивність праці на 30-60% й погіршує її якість. Шуми високих рівнів можуть явитися підґрунтям для розвитку стійкого безсоння, неврозів і склерозу.

При високих рівнях шуму слухова чутливість падає вже через 1-2 роки, при середніх виявляється набагато пізніше, через 5-10 років, тобто зниження слуху відбувається повільно, хвороба розвивається поступово. Тому особливо

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

важливо заздалегідь уживати відповідних заходів захисту від шуму. В даний час майже кожна людина, що піддається на роботі впливові шуму, ризикує стати глухою.

Акустичні роздратування поволі накопичуються в організмі, усе сильніше гнітючи нервову систему. Змінюється сила, урівноваженість і рухливість нервових процесів – тим більше, чим інтенсивнішим є шум. Реакція на шум нерідко виражається в підвищеній збудливості і дратівливості, що охоплюють усю сферу почуттєвих сприйнятів. Люди, що піддаються постійному впливові шуму, часто стають важкими в спілкуванні.

Електронебезпека. Аналіз травматизму серед працівників, професійна діяльність яких пов'язана з експлуатацією комп'ютерної та оргтехніки, показує, що значне місце посідають нещасні випадки, які пов'язані з впливом електричного струму. Електричні установки, до яких відноситься практично все устаткування ЕОМ, представляють для людини велику потенційну небезпеку, адже в процесі експлуатації або проведенні профілактичних робіт людина може торкнутися частин, що знаходяться під напругою. Специфічною небезпекою електроустановок є і те, що струмоведучі провідники, корпуси стійок ЕОМ та іншого устаткування, що опинилося під напругою в результаті ушкодження (пробою) ізоляції, не подають ніяких сигналів, котрі б попереджали людину про небезпеки. Реакція людини на електричний струм виникає лише при протіканні останнього через тіло людини.

Проходячи через тіло людини, електричний струм виконує наступні дії:

- *термічну* – полягає в нанесенні опіків на окремі ділянки тіла, нагріванні кровоносних судин, крові, нервів;
- *електролітичну* – розкладання крові та інших органічних рідин;

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- *біологічну* – подразнення живих тканин організму, що супроводжується мимовільними судорожними скороченнями м'язів, у тому числі м'язів серця і легень.

Внаслідок цього можуть виникнути різні порушення в організмі – до повної зупинки роботи серця і легень.

Поразки електричним струмом класифікують на: електричні травми та електричні удари.

Електрична травма – це чітко виражене місцеве ушкодження тканин організму, викликане впливом електричного струму або дуги. Зазвичай це поразка шкіри, зв'язок та кісток. У більшості випадків електричні травми виліковуються повністю або частково. В окремих випадках може наступити смерть. Розрізняють наступні електричні травми: електричний опік, електричні знаки, металізація шкіри і механічні ушкодження.

Електричний опік – найбільш розповсюджена електрична травма. Опіки бувають двох видів: струмовий і дуговий. Струмовий опік виникає при проходженні струму через тіло; при цьому спостерігаються опіки. Дуговий опік є результатом впливу на тіло електричної дуги; тут спостерігається висока температура – до 3500°C.

Електричні знаки – це мітки сірого кольору на тілі, що утворюються внаслідок проходження електричного струму.

Металізація шкіри – проникнення в шкіру дрібних часток металу, розплавлених електричною дугою.

Електричний удар – це порушення живих тканин при проходженні електричного струму. Їх буває чотири ступені в міру тяжкості.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Клінічна (мнима) смерть – перехідний період від життя до смерті, що настає з моменту припинення роботи серця і легень. У людини, що знаходиться в стані клінічної смерті, відсутні всі ознаки життя, однак її організм ще не загинув, продовжуються обмінні процеси.

Фібриляція – це хаотичні швидкі серцеві скорочення.

Причина смерті від поразки електричним струмом – припинення роботи серця, легень, електричний шок.

Основні фактори, що впливають на результат поразки струмом:

• *величина струму*, який проходить через тіло людини, є основним чинником, що обумовлює результат поразки:

- людина починає відчувати проходження змінного струму промислової частоти (50 Гц) величини 0,6-1,5 мА;
- змінний струм величиною 10-15 мА при частоті 50 Гц або постійний 50-60 мА є граничним невідпускаючим струмом, при якому біль стає нестерпним, а судороги – такими, що людин не може їх перебороти без сторонньої допомоги;
- струм 25-50 мА (50 Гц) впливає на м'язи не тільки рук, але й тулуба, у тому числі на м'язи грудної клітки, рух якої сильно ускладнюється. Тривалий вплив цього струму може викликати припинення дихання, після чого може наступити смерть від ядухи;
- струм від 100 мА до 5 А змінного струму і від 300 мА до 5 А постійного струму викликає через 1-2 секунди фібриляцію серця. При цьому припиняється кровообіг, в організмі виникає нестача кисню, що, у свою чергу, призводить до припинення дихання, тобто настає смерть;
- Струми більш 5 А фібриляцію серця не викликають. При таких струмах відбувається негайна зупинка серця, минаючи стан

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

фібриляції. Якщо дія струму виявилась короткочасною (1-2 секунди) й не викликала ушкоджень серця, то після відключення струму, як правило, серце самостійне продовжує свою діяльність. Змінний струм більш небезпечний, але в частотному діапазоні від 0 до 50 Гц. Подальше підвищення частоти, незважаючи на зростання струму, супроводжується зниженням небезпеки, яка цілком зникає при 450-500 кГц. Але ці струми зберігають небезпеку опіків;

- *тривалість проходження струму* через тіло людини впливає на результат поразки: чим триваліша дія струму, тим більша ймовірність важкої смертельної поразки;
- *шлях струму* в тілі потерпілого відіграє істотну роль на результаті поразки. Так, якщо на шляху струму розташовані життєво важливі органи –серце, легені, головний мозок – то небезпека поразки досить велика;
- *рід струму і частота*. Постійний струм менш небезпечний, ніж змінний, приблизно в чотири рази, однак це справедливо до 250-300 В. Збільшення частоти веде до збільшення небезпеки.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

4.2. Заходи з техніки безпеки

У виробничому приміщенні повинні підтримуватись відповідні параметри температури, освітлення, чистоти повітря, забезпечення ізоляції від виробничих шумів і т.п.

Методи і засоби захисту від шуму. Захист від шуму досягається розробкою шумобезпечної техніки, застосуванням методів та засобів індивідуального й колективного захисту, будівельно-акустичними методами, активною формою захисту.

Засоби колективного захисту діляться стосовно джерела шуму:

- знижуючі шум у джерелі виникнення (найбільше ефективно);
- знижуючі шум на шляхах його поширення.

Засоби індивідуального захисту: навушники, вушні вкладки, шлемофони, каски.

За способом реалізації способи захисту від шуму поділяються на:

- *акустичні способи* – ґрунтуючись на акустичному вимірі приміщення, підбираються засоби звукоізоляції, звукопоглинання, віброізоляції, демпфірування, застосування глушителів шуму;

- *будівельно-акустичні* – застосовують: екрани, звукоізоляцію, кабінки спостереження, дистанційне керування, кожухи, ущільнення і т.д. Найбільше ефективні звукоізолюючі матеріали: трипласт (композиційний матеріал); пластобетони з наповненням з опилок деревини, соломи і т. д. Звукопоглинаючі матеріали: мармур, бетон, граніт, цеглина, ДВП, ДСП, войлок, мінераловата, матеріали з щільною перфорацією;

- *архітектурно-планувальні* – раціональне розміщення робочих місць; раціональний режим праці і відпочинку.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Активна форма захисту – генерація шуму в протифазі до джерела.

Не менш важливим для зниження шуму в процесі експлуатації є питання правильного і своєчасного регулювання, змашування і заміни механічних вузлів шумливого устаткування.

Міри захисту від ураження електричним струмом. Винятково важливе значення для запобігання електротравматизму має правильна організація обслуговування діючих електроустановок, проведення ремонтних, монтажних і профілактичних робіт.

При цьому під правильною організацією розуміється строге виконання ряду організаційних і технічних заходів і засобів, установлених діючими “Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів”, “Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів” (ПТЕ і ПТБ споживачів) і “Правилами установки електроустановок” (ПУЕ).

Основними мірами захисту від поразки електричним струмом є:

- забезпечення неприступності струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, з метою виключення випадкового дотику зі струмоведучими частинами або наближення до них на небезпечну відстань, усунення небезпеки поразки з появою напруг на корпусах, кожухах;
- захисне заземлення, занулення, захисне відключення;
- використання низьких напруг;
- застосування подвійної ізоляції.

Захисне заземлення. *Захисне заземлення* – це навмисне з’єднання з землею металевих частин електроустаткування, що нормально не знаходяться під напругою, але можуть виявитися під напругою при випадковому з’єднанні зі струмоведучими частинами.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Заземлюючі пристрої – це сукупність заземлювача та металевих провідників. Заземлювачі бувають *штучні* й *природні*. Заземлюючі провідники зазвичай виготовляються з листової сталі.

Устаткування, що підлягає заземленню, – це металеві неструмовідні металеві частини електроустаткування, при цьому в приміщеннях з підвищеною небезпекою або особливо небезпечних заземлюють установки вище 12 В змінного або 110 В постійного струму.

Задача захисного заземлення полягає в усуненні небезпеки поразки людини струмом у випадку дотику до корпусу, що опинився під напругою. Область застосування захисного заземлення – трифазні мережі живлення до 1000 В з ізольованою централлю. Принцип дії захисного заземлення – зняття напруги між корпусом, що виявився під напругою, до безпечного значення. Так, різниця при захисному заземленні і без нього по струму буде приблизно в 150 разів.

4.3. Висновки до розділу 4

У розділі розглянуті питання, пов’язані з аналізом шкідливих та небезпечних виробничих факторів, впливові яких піддаються оператори ЕОМ, котрі задіяні при супроводженні розробленої системи керування транзисторним випрямлячем. Визначені шляхи вирішення цих проблем для покращення та створення безпечності умов праці обслуговуючого персоналу. Виконаний розрахунок загального освітлення виробничого приміщення.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі досліджено особливості роботи транзисторного випрямляча в судновій електроенергетичній мережі, розроблено систему керування та проведено її моделювання.

У розділі 1 проаналізовано випрямлення змінної напруги, зокрема роботу діодних, тиристорних та транзисторних випрямлячів. Встановлено, що нелінійність діодних і тиристорних випрямлячів призводить до спотворення струму та появи гармонік у мережі, що негативно впливає на якість електроенергії. Транзисторні випрямлячі, на відміну від них, забезпечують синусоїдальну форму споживаного струму, можуть компенсувати реактивну потужність і працювати в режимі рекуперації. Для боротьби з гармоніками розглянуто пасивні та активні фільтри, а також основні показники якості електроенергії (THD, пік-фактор, коефіцієнт потужності).

Розділ 2 присвячений синтезу системи керування транзисторним випрямлячем. Запропоновано структуру підпорядкованого регулювання, де внутрішній контур керує струмом, а зовнішній – напругою. Досліджено різні методи ШІМ, зокрема біполярну, уніполярну та гістерезисну модуляцію. Обґрунтовано вибір ПІД-регулятора для забезпечення стабільності системи. Також розроблено цифрову реалізацію керування на базі FPGA, що дозволяє ефективно інтегрувати аналогові та цифрові інтерфейси.

У розділі 3 проведено моделювання роботи транзисторного випрямляча в різних режимах. Досліджено вплив ємності фільтра, навантаження, реактивної потужності та змін частоти мережі на вихідні параметри. Показано, що замкнута система з ПІ-регулятором швидко компенсує збурення (провали напруги, зміни навантаження) і забезпечує стабільність вихідної напруги.

Загалом, робота доводить ефективність транзисторного випрямляча в судових енергосистемах. Він забезпечує високу якість електроенергії, зменшує вплив гармонік і може адаптуватися до змінних умов роботи.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Висновки	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Запропонована система керування на FPGA демонструє надійність і гнучкість, що робить її перспективною для подальшого впровадження.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Висновки	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Посібник з пристрою електроустановок 2009. Технічні рішення "Шнейдер Електрик".
2. Алукер Ш.М. Електротехніка у малюнках та кресленнях. Ч.2. Електричні машини, пристрої та установки. Л. «Державне енергетичне видавництво», 1951. – 130 с.
3. Густав Ольссон, Джангуїно Піані. Цифрові системи автоматизації та управління. – СПб.: Невський діалект, 2001. – 557 с.: іл.
4. Напівпровідникові перетворювачі. Переклад з латиської. М. «ЕНЕРГІЯ», 1967
5. Алексєва Н.Н. Тиристорні регульовані електроприводи постійного струму. М., «Енергія», 1970. – 136 с.

					172.4397ст.3.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		