

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ПІДВИЩЕНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ
ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ СВІТЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

Виконав(ла): студент 6 курсу, групи ЕТмз
спеціальності 141

«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Заболотний О.П.
(прізвище та ініціали)

Керівник (підпис) Філюк Я.О.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль (підпис) Мовчан Л.Т.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри (підпис) Тарасенко М.Г.
(прізвище та ініціали)

Рецензент (підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль 2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Тарасенко М. Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«13» листопад 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(НАЗВА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ)

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Заболотному Олегу Павловичу
(Прізвище, Ім'я, По Батькові)

1. Тема роботи Дослідження напівпровідникових перетворювачів з підвищеним коефіцієнтом потужності для світлодіодних джерел світла

Керівник роботи Філюк Ярослав Олександрович, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «10» листопада 2023 року № 4/7-1039

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень 2023 року

3. Вихідні дані до роботи Провести огляд та порівняння схем перетворювачів змінної напруги у постійну для світлодіодних джерел світла. Розробити нове схемотехнічних рішень перетворювачів напруги із збільшеним значенням коефіцієнта потужності. Розробити новий спосіб керування одиничними світлодіодами у джерелі світла для збільшення значення коефіцієнта потужності.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Розрахунково-дослідницький розділ

3. Проектно-конструкторський розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці. Безпека в надзвичайних ситуаціях	Гурик О. Я. к.т.н., доцент		
	Клепчик В.М., старший викладач		
Нормоконтроль	Мовчан Л.Т., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 13 листопада 2023 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	14.11.2023	
2	Аналітичний розділ	18.11.2023	
3	Розрахунково-дослідницький розділ	22.11.2023	
4	Проектно-конструкторський розділ	25.11.2023	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	29.11.2023	
6	Висновки	01.12.2023	
7	Оформлення пояснювальної записки	06.12.2023	
8	Оформлення графічної частини	12.12.2023	

Студент

(підпис)

Заболотний О.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Філюк Я.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Заболотний О.П. Дослідження напівпровідникових перетворювачів з підвищеним коефіцієнтом потужності для світлодіодних джерел світла.

Стор.70; рис.44; табл.1; креслень - ; джерел -15; додатків - 0.

Метою кваліфікаційної роботи було проведення дослідження напівпровідникових перетворювачів напруги з підвищеним значенням коефіцієнта потужності для світлодіодних джерел світла.

У першому розділі дається огляд літератури та теоретичної бази теми. Це також пояснює деякі концепції розуміння проблеми та деякі очікувані результати.

В другому розділі було представлено математичну модель напівпровідникового перетворювача змінної напруги в постійне. Також у цьому розділі представлені пристрої перетворення змінної напруги на постійне. Показано застосування розробленої математичної моделі при аналізі коректора коефіцієнта потужності з диністором, пристрої регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням та пристрої регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельним з'єднанням навантаження

У третьому розділі наведено опис макетів нових пристроїв перетворення змінної напруги у постійну з підвищеним коефіцієнтом потужності. Проведено порівняння теоретичних розрахунків із експериментом. Показано, що різниця становить не більше 5%,.

Ключові слова: коефіцієнта потужності, перетворювачів напруги, світлодіодні джерела світла.

ЗМІСТ

Реферат	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Перехідні процеси у нелінійних електричних колах.	8
1.2 Корекція коефіцієнта потужності	13
1.2.1 Активні ККП	13
Висновок до розділу	19
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	20
2.1. Математична модель напівпровідникового перетворювача змінної напруги в постійну	20
2.2 Розрахунок коефіцієнта потужності перетворювача з коректором коефіцієнта перетворення із диністором	27
2.3. Пристрій регулювання струму у світлодіодних джерелах світла послідовно з'єднаним навантаженням	35
2.3.1 Розрахунок коефіцієнта потужності пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням	38
2.4 Пристрій регулювання струму в світлодіодних джерелах світла послідовно-паралельно з'єднаним навантаженням	40
2.5 Висновки до розділу	43
3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	45
3.1. Дослідження і практична реалізація пристроя перетворення змінної напруги в постійне з підвищеним коефіцієнтом потужності	45
3.2 Експериментальне визначення коефіцієнта потужності перетворювача з ККП з диністором	45
3.2 Експериментальне визначення коефіцієнта потужності пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням	53

3.3	Експериментальне визначення коефіцієнта потужності пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельним з'єднанням навантаження	56
3.4	Висновки до розділу	61
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	62
4.1	Охорона праці	62
4.1.1	Безпека при виготовленні друкованих плат	62
4.1.2.	Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж	64
4.2.	БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	66
4.2.1.	Проведення планування заходів цивільного захисту на підприємстві у випадку надзвичайних ситуацій	66
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	69
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	70

ВСТУП

Актуальність теми роботи. Технічний прогрес та стрімке збільшення кількості споживачів енергії з живильної електричної мережі призводять до необхідності зменшення їх взаємного впливу та покращення їх якісних показників.

Одним із показників якості споживачів електричної енергії є коефіцієнт потужності, мінімальне допустиме значення якого нормується Міжнародною електротехнічною комісією (МЕК), Міждержавною радою зі стандартизації, метрології та сертифікації, а також національними вимогами для окремих груп споживачів з послідовним додаванням до нормування споживачів дедалі меншої потужності.

Обмеження за мінімальним значенням коефіцієнта потужності поширюються і в світлодіодних джерелах світла, включаючи лампи на світловипромінюючих діодах в типорозмірі ламп розжарювання.

Напівпровідникові світловипромінюючі діоди живляться постійним струмом, тому до складу світлодіодних джерел світла включають перетворювачі змінної напруги в постійний або пульсуючий струм, параметри яких визначають якість світлодіодних джерел світла як споживачів електричної енергії і, в тому числі, значення коефіцієнта потужності.

У зв'язку з цим розробка науково-технічних основ проектування та нових технічних рішень напівпровідникових перетворювачів змінної напруги в постійне з підвищеними значеннями коефіцієнта потужності є актуальною.

Мета і завдання роботи: є дослідження та розробка напівпровідникових перетворювачів напруги з підвищеним значенням коефіцієнта потужності для світлодіодних джерел світла.

Досягнення мети визначається вирішенням наступних завдань:

1. Розробка математичної моделі перетворювачів змінної напруги у постійне для світлодіодних джерел світла.
2. Розробка нових схемотехнічних рішень перетворювачів напруги із збільшеним значенням коефіцієнта потужності.

3. Розробка нового способу керування одиничними світловипромінюючими діодами у світлодіодному джерелі світла для збільшення значення коефіцієнта потужності.

Об'єкт дослідження: Напівпровідникові перетворювачі напруги з підвищеним коефіцієнтом потужності для світлодіодних джерел світла

Предмет дослідження: Техніко-енергетичні характеристики основних показників якості напівпровідникових перетворювачів напруги.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Математична модель напівпровідникового перетворювача змінної напруги в постійну, що дозволяє визначати миттєві значення напруги і струмів на елементах схеми, які протікають через них, і розраховувати значення коефіцієнта потужності.

2. Залежність значення коефіцієнта потужності пасивного ККП від напруги відкривання диністора, що дозволяє конструювати електричні перетворювачі напруги світлодіодних ламп різних потужностей.

2. Удосконалення способу регулювання струму світлодіодних джерел світла на одиничних світловипромінюючих діодах, що дозволяє збільшити значення коефіцієнта потужності пристрою.

Практична цінність результатів дослідження полягає в розробці та створенні перетворювачів змінної в постійну напругу для світлодіодних джерел світла, що дозволило підвищити коефіцієнт потужності цих пристроїв

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і її результати доповідалися на XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2023 р.)

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 розділів, висновків та переліку посилань.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

Equation Chapter 1 Section 1

1.1 Перехідні процеси у нелінійних електричних колах.

Для аналіз та розрахунок перехідних процесів, що протікають у нелінійних колах, застосовується наступна узагальнена класифікація:

1. за видом основних операцій, необхідні виконання інтегрування НДУ. В даному випадку застосовуються графічні (графоаналітичні) та аналітичні методи;

2. за характером величини, на яку проводиться розрахунок[1].

Графічними (графоаналітичними) методами називаються такі методи, головним завданням яких є графічні побудови залежностей величин (струмів, напружень) від часу. Дані побудови можливі із супроводом допоміжних числових розрахунків.

Головним завданням аналітичних методів є інтегрування ДУ кола застосування аналітичних виразів, що описують характеристики нелінійних елементів.

Відомі такі методи:

- метод інтегрованої нелінійної апроксимації;
- метод шматково-лінійної апроксимації;
- метод амплітуд, що повільно змінюються;
- метод малого параметра;
- метод інтегральних рівнянь.

Розрахунок методом інтегрованої нелінійної апроксимації

В даному методі відбувається заміна характеристики нелінійного елемента такою нелінійною функцією, яка має виконувати такі умови:

1) з високою точністю відображати його характеристику у передбачуваному інтервалі переміщення зображувальної точки по ній;

2) точно інтегрувати рівняння у функціях, які є відомими [2-4].

Перевагою методу є те, що після інтегрування досліджувана величина залежить як від часу, так і від інших параметрів схеми.

Даний метод застосовується до диференціального рівняння першого порядку та рівнянь, що зводяться до рівняння першого порядку за допомогою заміни змінних [5].

Розрахунок методом шматково-лінійної апроксимації

Даний метод використовує прямі лінії як заміну характеристик нелінійного елемента для миттєвих значень. Це дозволяє замінити нелінійні диференціальні рівняння лінійними рівняннями, які відрізняються один від одного лише значеннями коефіцієнтів.

Справедливі дані рівняння тільки для проміжку часу, в якому переміщається робоча точка в межах лінеаризованої ділянки.

Метод можна застосувати при аналізі ланцюгів, які містять джерело постійної та (або) синусоїдальної ЕРС[6]. Якщо ланцюги мають синусоїдальну ЕРС, то виникає складність у розрахунку, причиною якої є визначення постійних інтегрування. В такому випадку знаходять рішення з трансцендентних рівнянь, що вирішуються за допомогою ЕОМ [5-8].

Метод амплітуд, що повільно змінюються.

Одним з найбільш популярних методів розрахунку перехідних процесів в електротехніці є метод амплітуд, що повільно змінюються.[9].

Дізнатися, як працює даний метод можна з прикладу, де відбувається періодичний вплив збурюючої сили на нелінійний ланцюг другого порядку. Наприклад, рівняння кола має такий вигляд:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + f(x) \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = A \sin \omega t. \quad (1.1)$$

У схемі діє періодична сила з частотою ω , і внаслідок цього виникає вимушене коливання, де в першій гармоніки частота ω .

Потрібно вважати, що у разі слабо виражені вищі гармоніки.

Шукану функцію $x(t)$ можна так:

$$x = a \sin \omega t + b \cos \omega t, \quad (1.2)$$

де a і b – амплітуди шуканого коливання, які досить довго змінюються з часом (повільно змінюються).

Довга зміна a і b з часом пов'язана лише з тим, що похідні за часом виявляються величинами першого порядку малості порівняно з ωa та ωb :

$$\frac{da}{dt} \ll \omega a, \quad \frac{db}{dt} \ll \omega b. \quad (1.3)$$

З огляду на це немає необхідності вирішувати:

$$\frac{dx}{dt} = a\omega \cos \omega t - b\omega \sin \omega t + \sin \omega t \frac{da}{dt} + \cos \omega t \frac{db}{dt} \quad (1.4)$$

Коли з деяким наближенням можна прийняти:

$$\frac{dx}{dt} \approx a\omega \cos t - b\omega \sin \omega t. \quad (1.5)$$

Виходить наступне рівняння:

$$\frac{d^2x}{dt^2} \approx \omega^2 a \sin \omega t - \omega^2 b \cos \omega t + \omega \cos \omega t \frac{da}{dt} - \omega \sin \omega t \frac{db}{dt} + \frac{d^2a}{dt^2} \sin \omega t + \frac{d^2b}{dt^2} \cos \omega t + \omega \cos \omega t \frac{da}{dt} - \omega \sin \omega t \frac{db}{dt}$$

Враховуючи що $\frac{d^2a}{dt^2} \ll \omega \frac{da}{dt}$ і $\frac{d^2b}{dt^2} \ll \omega \frac{db}{dt}$, є можливість прибрати складові другого порядку малості, при цьому залишивши складові першого порядку малості. Виходить наступний результат:

$$\frac{d^2x}{dt^2} \approx -\left(\omega^2 a + 2\omega \frac{db}{dt}\right) \sin \omega t + \left(-\omega^2 b + 2\omega \frac{da}{dt}\right) \cos \omega t. \quad (1.6)$$

Варто зазначити, що $\frac{dx}{dt}$ немає необхідності враховувати доданки першого порядку, і має незначні втрати (амплітуда другого доданку лівої частини (1.1) відносно мала порівняно з амплітудами першого і третього доданків лівої частини (1.1)).

Якщо функції $f(x)$ замінити x на (1.2) і розкласти $f(x)$ в ряд Фур'є, після чого помножити даний ряд на $\frac{dx}{dt}$ (на праву частину 1.5) виходить:

$$f(x) \frac{dx}{dt} = F_0(a, b) + F_1(a, b) \sin \omega t + F_2(a, b) \cos \omega t + F_3(a, b) \sin 2\omega t + F_4(a, b) \cos 2\omega t + \dots. \quad (1.7)$$

Усі обчислення ведуться за першою гармонікою, а це означає, що вищі гармоніки ряду Фур'є $F_0(a, b)$, $F_3(a, b)$, $F_4(a, b)$, у майбутньому можна не враховувати.

Підставляючи (1.1) праву частину (1.6), виходять наступні рівняння:

$$-2\omega \frac{db}{dt} + F_1(a, b) + a(\omega_0^2 - \omega^2) = A; \quad (1.8)$$

$$-2\omega \frac{da}{dt} + F_2(a, b) + b(\omega_0^2 - \omega^2) = 0. \quad (1.9)$$

Обчислення методами малого параметра чи чисельного інтегрування можливо у загальному випадку. Окремий випадок, при якому зовнішня періодична сила дорівнює нулю ($A = 0$) і функція $F_1(a, b) = 0$, система має вигляд диференціального рівняння першого порядку:

$$\frac{da}{dt} = -\frac{F_2(a)}{2\omega}, \quad (b=0). \quad (1.10)$$

Варто відзначити, що метод амплітуд, що повільно змінюються, можна застосовувати і до рівнянь, які мають вищий порядок[5].

Метод малого параметра

Вирішувати НДУ можна за допомогою методу послідовних наближень, де шукана величина x представляється у вигляді ряду за ступенями коефіцієнта, що має назву малого параметра[5]:

$$x = x_0 + \mu x_1 + \mu^2 x_2 + \dots, \quad (1.11)$$

де x_0 - рішення рівняння нульового наближення; x_1 - вирішення рівняння першої поправки, що враховує вплив нелінійних членів у першому наближенні; x_2 - рішення рівняння другої поправки і т.д. [9].

У випадку, якщо вихідне рівняння буде диференціальним рівнянням, яке має порядок вище першого, а вимушений режим є коливальним процесом, у такому разі квадрат кутової частоти першої гармоніки ω^2 або перший ступінь ω можна розкласти у ряд по малому параметру:

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \mu f_1 + \mu^2 f_2, \quad (1.12)$$

де ω_0^2 - Квадрат кутової частоти в нульовому наближенні, коли відбувається зневага усіма нелінійними членами; μf_1 – поправка першого

наближення, спричинене нелінійними членами рівняння; $\mu^2 f_2$ - поправка другого наближення, тощо.[5].

Метод інтегральних рівнянь

Використовуючи форму інтеграла Дюамеля, можна перейти від НДУ до інтегрального рівняння. Необхідно розібрати докладніше цей перехід. Наприклад, рішення лінійного диференціального рівняння:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0x = f(t), \quad (1.13)$$

можна уявити як:

$$x(t) = f(t)g(0) + \int_0^t f(\tau)g'(t - \tau)d\tau. \quad (1.14)$$

Так $g(t)$ мають на увазі як перехідна провідність, чи перехідна функція. Це залежить від того, чим є x по відношенню до сили, що змушує $f(t)$; Подаємо $g(t)$ як рішення (1.13) при $f(t) = 1$.

Якщо вихідне рівняння нелінійне, наприклад:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0x + bx^2 = f(t),$$

то є можливість перенесення нелінійного члена bx^2 у праву частину і, в такому разі, розглядати його як внутрішню силу:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0x = f(t) - bx^2. \quad (1.15)$$

Тоді при використанні (1.14) рішення рівняння (1.15) буде записано в наступному вигляді:

$$x = [f(t) + bx^2(t)] + \int_0^t [f(\tau) - bx^2(\tau)]g'(t - \tau)d\tau. \quad (1.16)$$

У разі $g(t)$ перебуває у лінійній частині вихідного НДУ. Вираз (1.16) є інтегральним рівнянням на кшталт Вольтерра другого роду[6]. Дане рівняння вирішується методом послідовних наближень:

$$x_k(t) = [f(t) - x_{k-1}^2(t)]g(0) + \int_0^t [f(\tau) - bx_{k-1}^2(\tau)]g'(t - \tau)d\tau. \quad (1.17)$$

Використовувати метод інтегральних рівнянь доцільно в тому випадку, якщо процес послідовних наближень є схожим[5].

Для класу пристроїв перетворення змінної напруги в постійне найбільш підходящим є метод кусково-лінійної апроксимації. При розрахунку цим методом здійснюється заміна характеристики нелінійного елемента відрізками прямих ліній, що дозволяє перейти від нелінійного диференціального рівняння до кількох лінійних рівнянь, що відрізняються один від одного лише значеннями коефіцієнтів та використовувати методи аналізу перехідних процесів у лінійних електричних колах[4-9].

1.2 Корекція коефіцієнта потужності

1.2.1 Активні ККП

Активні ККП досить добре вивчені, їх реалізації розроблена спеціальна компонентна база. Вони здатні забезпечити значення коефіцієнта потужності 0,8-0,999[10-12].

Дані пристрої, переважно, реалізуються з урахуванням підвищує імпульсного перетворювача (рисунок 1.1).

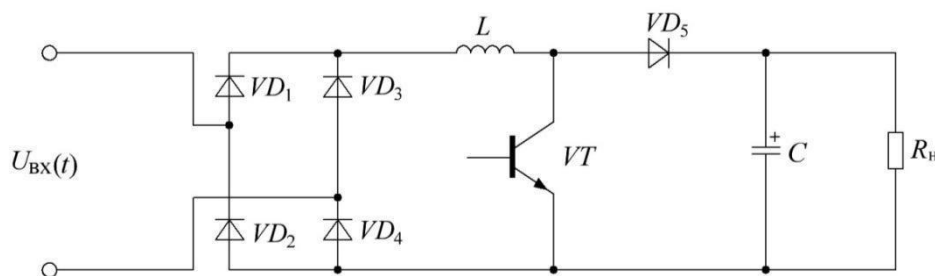


Рисунок 1.1 – Електрична схема підвищуючого імпульсного перетворювача

Умовно активні ККП можна поділити на ККП з комутацією ключів на мережній частоті та ККП з комутацією ключів на підвищеній частоті

В даний час АККП, що працюють на підвищеній частоті, забезпечують найкращі результати за коефіцієнтом потужності[10, 11]. Комутація ключів відбувається за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Водночас дані АККП мають різні способи корекції коефіцієнта потужності. Найбільш поширені такі методи:

метод граничного керування;

метод розривних струмів;

метод керування за піковим значенням струму;

метод керування за середнім значенням струму.

Всі перераховані вище методи мають свої переваги і недоліки[10].

Метод граничного керування

Даний метод пропонує реалізацію керування в граничній зоні між режимом безрозривних та режимом розривних струмів.

На рисунку 1.2 представлено функціональну схему, яка реалізує цей метод.

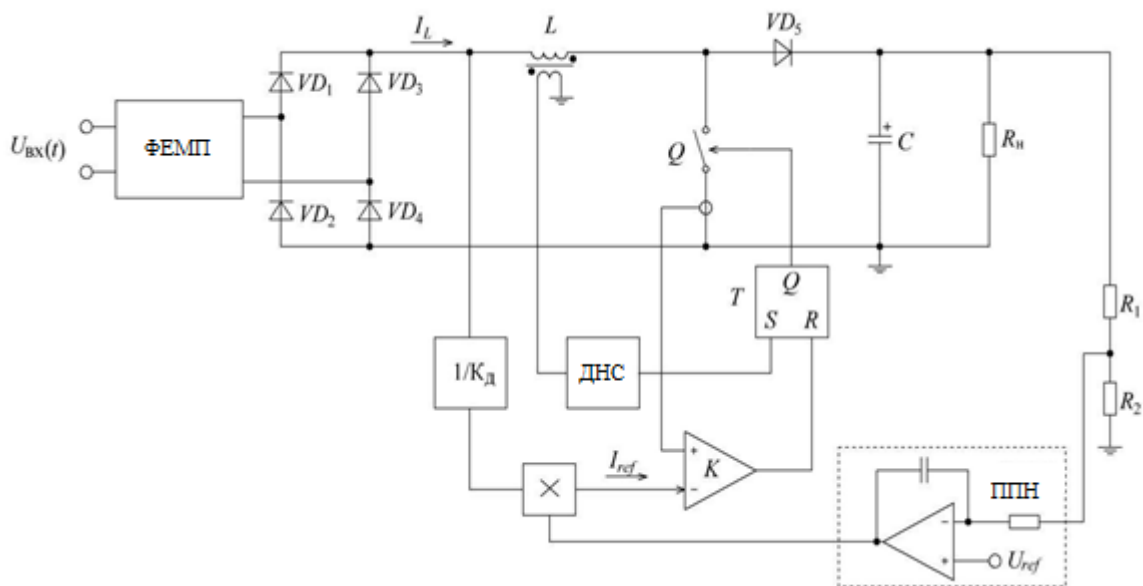


Рисунок 1.2 – Функціональна схема активного ККП, що працює за методом граничного керування

Схема, подана рисунку 1.2. працює наступним чином. На вхід схеми надходить вхідна змінна напруга. Через фільтр електромагнітних перешкод (ФЕМП), що служить для захисту від високочастотних перешкод, напруга надходить на випрямляч VD1-VD4. Далі випрямлену напругу через дільник з коефіцієнтом $1/K_d$ надходить на помножувач, тим самим формуючи еталонну напругу U_{ref} .

Визначення другого множника відбувається за допомогою сигналу підсилювача помилки напруги (ППН). ППН служить попередньої стабілізації вхідної напруги. Далі відбувається порівняння еталонної напруги в компараторі

з напругою реєструючого датчика струму в ланцюгу витoku ключа Q. Сигнал, що знімається компаратора і сигнал з датчика нульового струму відповідають за перемикання тригера ключем Q.

У початковий момент часу струм у дроселі дорівнює нулю, а за допомогою датчика нульового струму (ДНС) відбувається установка тригера одиничний стан, таким чином, відкриваючи ключ Q. Відбувається накопичення електричної енергії в дроселі L, тим самим збільшуючи лінійне зростання струму I_L . У той момент, коли напруга з датчика струму, яка пропорційна струму дроселя L, виявляється рівною напрузі U_{ref} , виконується закриття ключа Q. Та енергія, яка була запасена в дроселі L, передається в навантаження R_n через відкритий діод VD5. Далі струм у дроселі починає спадати, а напруга, яка знімається з вторинної обмотки дроселя L, використовується датчиком нульового струму (ДНС) фіксує зниження струму дроселя L до нуля. Далі відбувається відкриття ключа Q і процес повторюється[10].

На рисунку 1.3 представлена часова діаграма струмів, що пояснює процеси, що протікають методом граничного керування.

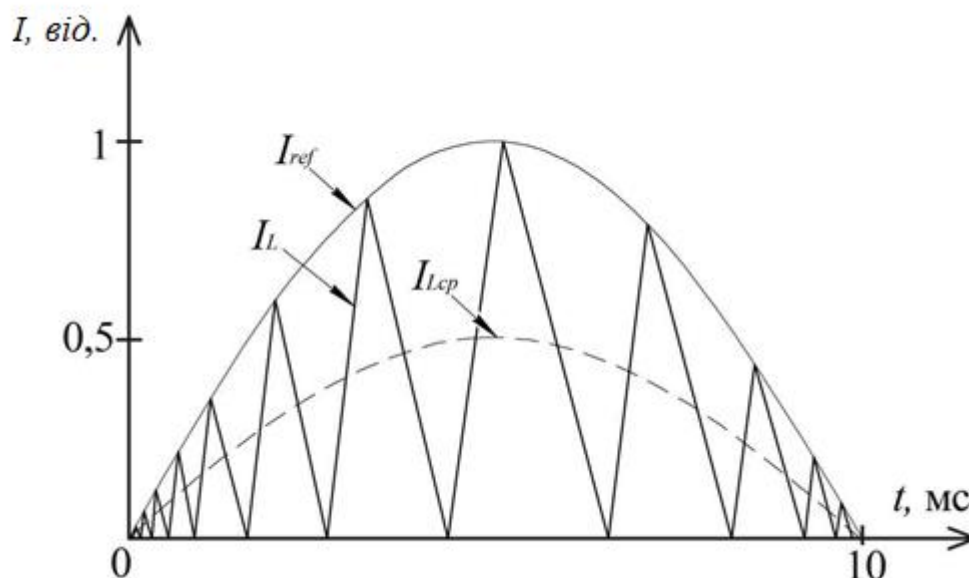


Рисунок 1.3 – Тимчасові діаграми струмів, які протікають в АККП методом граничного керування

Поданий метод має такі переваги:

- досить проста схема керування;

- здійснення «м'якого»[11]перемикання силового діода VD_5 ;

- невеликі динамічні втрати, що відбуваються під час відкриття ключа Q .

Недоліками методу граничного керування є: мінливість частоти перемикання протягом напівперіоду напруги живлення, а також залежність частоти від вхідної напруги і навантаження; велика маса та габарити вхідного фільтра, необхідного для компенсування кидків струму при виникненні режиму розривних струмів.

Метод розривних струмів з використанням ШІМ.

Даний метод має схожість з методом граничного керування, однак, є відмінність, що полягає в тому, що відкриття ключа Q здійснюється не досягнення нульового струму дроселя L , а по сигналу, що отримується від тактового генератора. При такому режимі в певний час струм дроселя L дорівнюватиме нулю, що і визначає метод розривних струмів[10].

Функціональна схема активного коректора коефіцієнта потужності, що реалізує даний метод, представлена на рисунку 1.4.

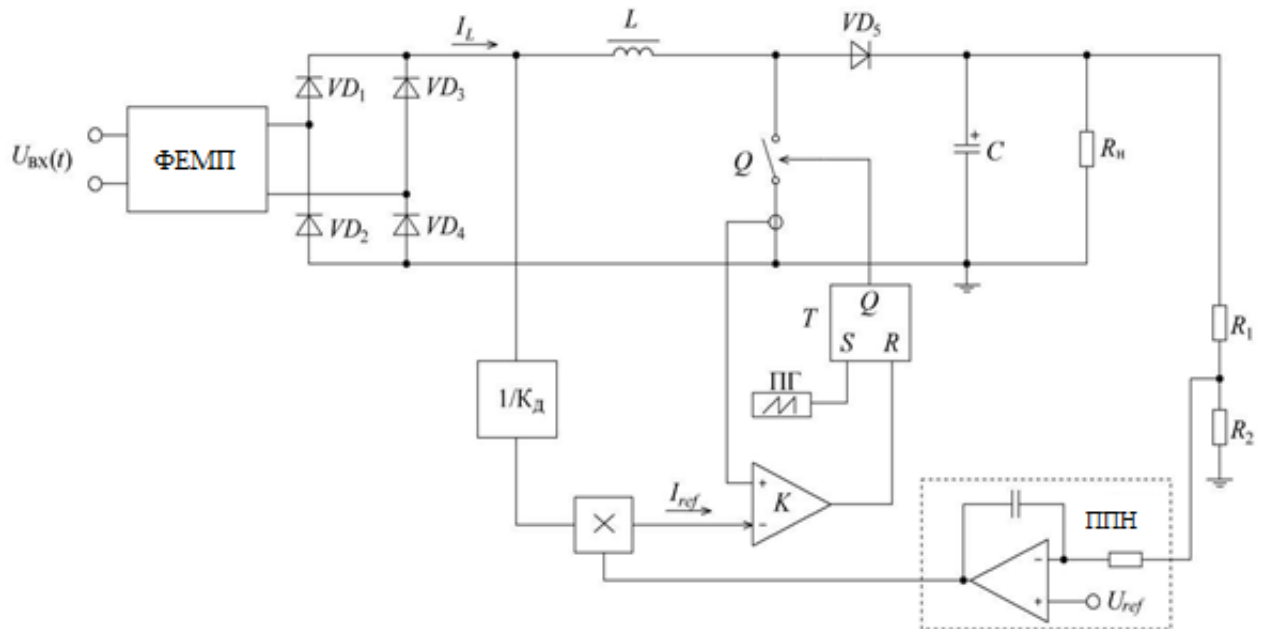


Рисунок 1.4 – Функціональна схема активного ККП, що реалізує метод розривних струмів

На рисунку 1.5 представлена часова діаграма струмів, що пояснює процеси, що протікають за методом розривних струмів

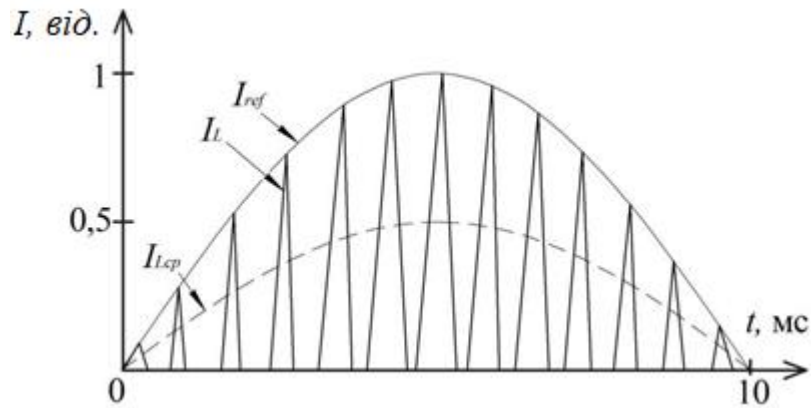


Рисунок 1.5 – Тимчасові діаграми струмів, які протікають в АККП методом розривних струмів

Переваги методу:

- сталість частоти перемикання ключа Q;
- досить проста схема, що виконує ШІМ-керування;
- здійснення «м'якого» перемикання силового діода VD5.
- Недоліки методу:
- великі викиди струму, пов'язані з режимом розривних струмів;
- велика маса та великі габарити фільтра електромагнітних перешкод.

Метод керування за піковим значенням струму

Цей метод реалізує функціональна схема активного ККП, представлена рисунку 1.6.

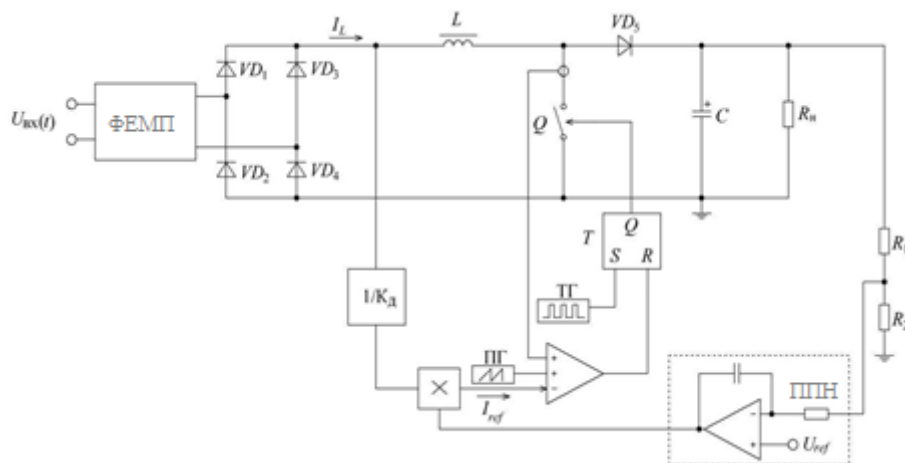


Рисунок 1.6 - Функціональна схема активного ККП, що працює за методом пікового керування

У цьому випадку у схемі, представлений на рисунку 1.6, відкривання ключа Q виконується за сигналом, отриманим від ТГ. Закривання ключа

відбувається завдяки сигналу, отриманому від перемноження миттєвого значення вхідної еталонної напруги, що детектується з випрямляча VD₁-VD₄, та напруги ППН. Даний сигнал проходить порівняння в компараторі К із сумою сигналів, що надходять із джерела пилоподібної напруги (ПГ) та датчика струму. Джерело пилоподібної напруги має ту саму частоту, що й у тактового генератора[10].

На рисунку 1.7 представлена часова діаграма струмів, що пояснює процеси, що протікають при реалізації методу керування піковим значенням струму.

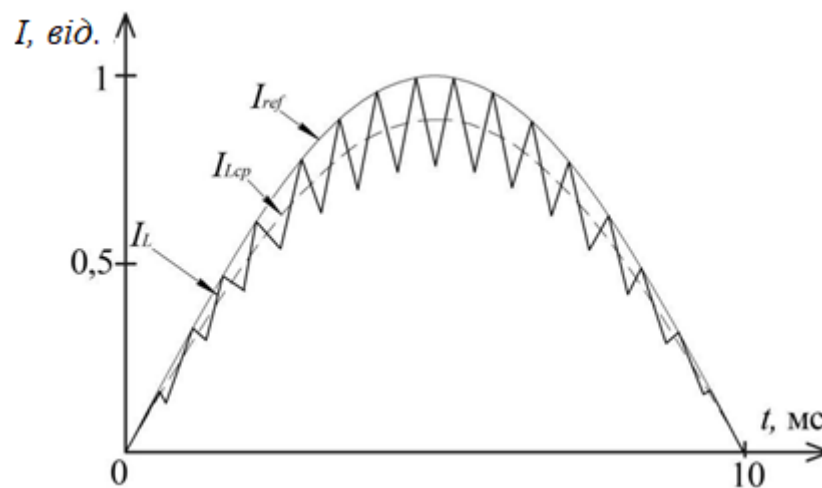


Рисунок 1.7 – Тимчасові діаграми струмів, що протікають в АККП під час пікового керування

Метод керування за піковим значенням струму має такі переваги:

- сталість частоти перемикання ключа Q;
- відносно невеликі викиди струму i , відповідно,
- щодо малі габарити вхідного фільтра;
- необхідність застосування тільки одного датчика струму, завданням якого є обмеження пікового значення струму дроселя L.

Недоліками є:

- спотворена форма вхідного струму, яка зростає зі збільшенням вхідної напруги та зменшення навантаження;
- підвищена чутливість до перешкод, що виникають під час комутації силового ключа Q;

- досить жорсткий режим закривання діода VD5 що призводить до підвищених динамічних втрат i , відповідно, до підвищеного рівня високочастотних перешкод.

Висновок до розділу

У цьому розділі проведено аналітичний огляд існуючих відомих методів аналізу нелінійних електричних кіл та методів аналізу перехідних процесів, що протікають у цих колах. Проведено огляд активних коректорів коефіцієнта потужності, що застосовуються в електротехніці та світлотехніці. Виявлено тенденції в галузі розвитку існуючих та розробки нових перетворювачів з підвищеним коефіцієнтом потужності для світлодіодних ламп.

[Equation Section \(Next\)](#)[Equation Chapter \(Next\)](#) **Section 2**

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Математична модель напівпровідникового перетворювача змінної напруги в постійну

Математична модель аналізованого кола будується в наступній послідовності:

- Процеси, що протікають у колі, поділяються на повторювані групи тимчасових інтервалів, межі яких визначаються зміною стану діодів (з відкритого до закритого і навпаки).

- Для кожного з інтервалів складається еквівалентна схема заміщення, що описує роботу всього пристрою для конкретного інтервалу. На цьому конкретному інтервалі дана схема заміщення аналізується методами лінійних електричних кіл: операторним методом та класичним методом аналізу перехідних процесів.

- У результаті визначаються форми споживаного струму, напруги на навантаженні, що дозволяють розрахувати чисельне значення коефіцієнта потужності, пульсацій вихідної напруги та ін.

Математична модель розроблена з урахуванням наступних спрощень, обмежень та припущень.

- Не враховуються процеси розсмоктування об'ємного заряду неосновних носіїв у сфері бази та розряду бар'єрної ємності випрямляючих діодів. Це тим, що процес розсмоктування об'ємного заряду триває частки мікросекунд, що має вкрай низький вплив на точність математичної моделі в цілому. Однак при розробці математичних моделей ККП, що працюють на частотах вище 1 кГц цей показник має значний вплив і має бути врахованим.

- Значення опорів діодів під час протікання прямого струму прийняті постійними.

Нелінійна вольт-амперна характеристика (ВАХ) випрямного діода, отримана на основі вимірювань партії діодів 1N4007 у кількості 8 штук, наведена на рисунку 2.1.

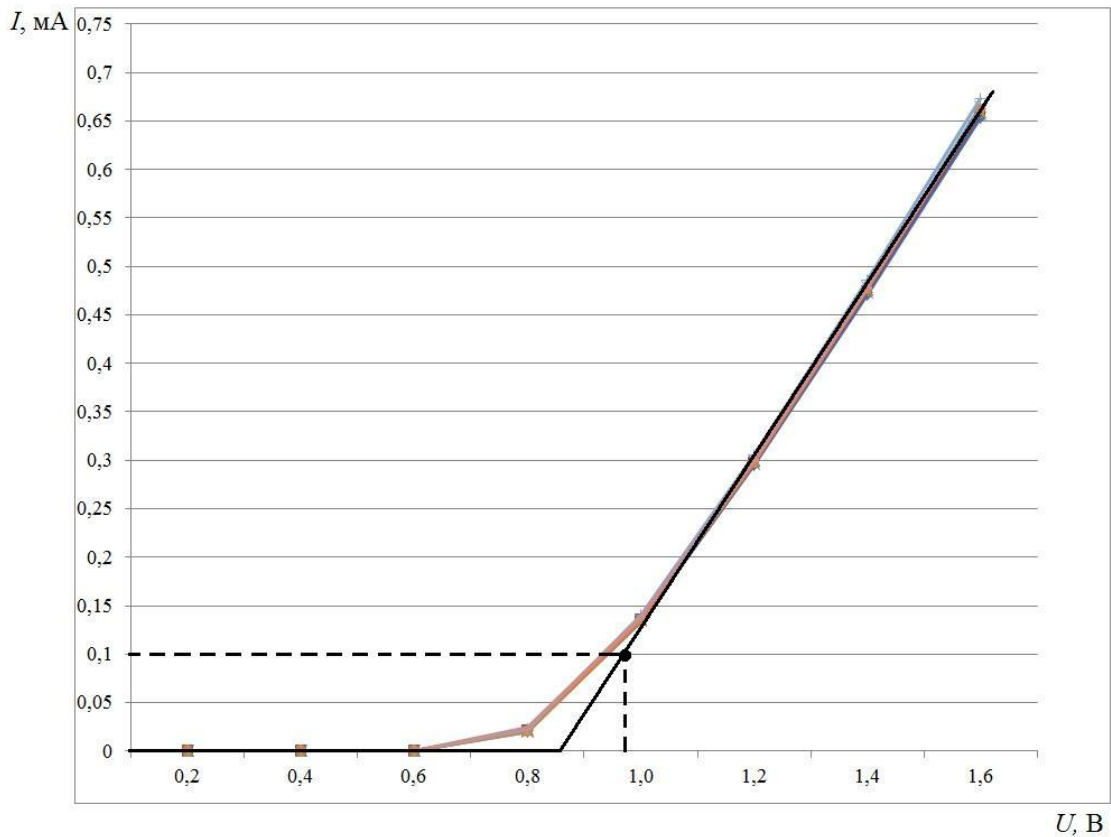


Рисунок 2.1 – Вольт-амперна характеристика випрямного діода 1N4007

Шматково-лінійне уявлення нелінійної ВАХ здійснюється двома відрізками: першим відрізком з нульовим значенням струму в діапазоні робочої напруги від 0 до 0,85 В і другим похилим відрізком, що характеризує диференціальний опір діода R_d :

2.2.3 Контактна різниця потенціалів діодів та некерованих тиристорів прийнято рівною нулю. Продемонструємо застосування запропонованої математичної моделі для широко використовуваної схеми випрямляча напруги з конденсатором, що фільтрує, і для схеми з діодно-ємнісним ККП.

$$R_d = \frac{dU}{dI} = \frac{0,97-0,85}{0,1} = 1,2 \approx 1 \text{ (Ом)}.$$

Схема складається з обмежувального резистора R , діодного випрямного мосту VD_1 - VD_4 , що згладжує конденсатора і навантаження R_H . Під навантаженням розуміються різні варіанти схмотехнічних рішень: послідовно включених світлодіодів, перетворювачі струму та напруги, імпульсні прямоходові, зворотноходові та ін.

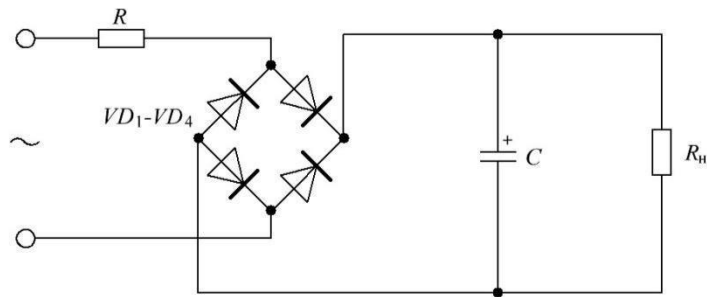


Рисунок 2.2 – Перетворювач змінної напруги з конденсатором, що фільтрує.

Схема працює в такий спосіб. На діодний міст VD_1-VD_4 через обмежувальний резистор R подається вхідна змінна напруга. З діодного моста випрямлена пульсуюча напруга надходить на конденсатор C де відбувається згладжування напруги. З конденсатора C згладжена напруга живить навантаження. Значення опору мережі живлення прийнято рівним нулю.

Споживання струму відбувається короткими імпульсами синхронно за часом з максимальним значенням напруги мережі живлення. Енергія імпульсу струму витрачається на живлення навантаження і відновлення заряду конденсатора C , витраченого на живлення навантаження за частину періоду, що залишилася, коли немає струму споживання від мережі.

На діоди VD_1-VD_4 подається змінна вхідна напруга:

$$U_{вх}(t) = U_m \cdot \sin(\omega t), \quad (2.1)$$

де U_m - амплітудне значення вхідної напруги;

$\omega = 2\pi f$ – кругова частота мережі живлення.

Для подальшого розрахунку прийнято амплітудне значення напруги U_m , рівне 311 В, значення частоти напруги $f = 50$ Гц.

Процеси, що протікають у ланцюзі можна розділити на групи, що повторюються, з двох тимчасових інтервалів. Прив'язка меж інтервалів до форми напруги на навантаженні в режимі функціонування, що встановився,

ілюструється на рисунку 2.3: перший – від t_1 до t_2 , другий - від t_2 до $t_1+T/2$, де $T=1/f$ - період змінної напруги живильної електричної мережі.

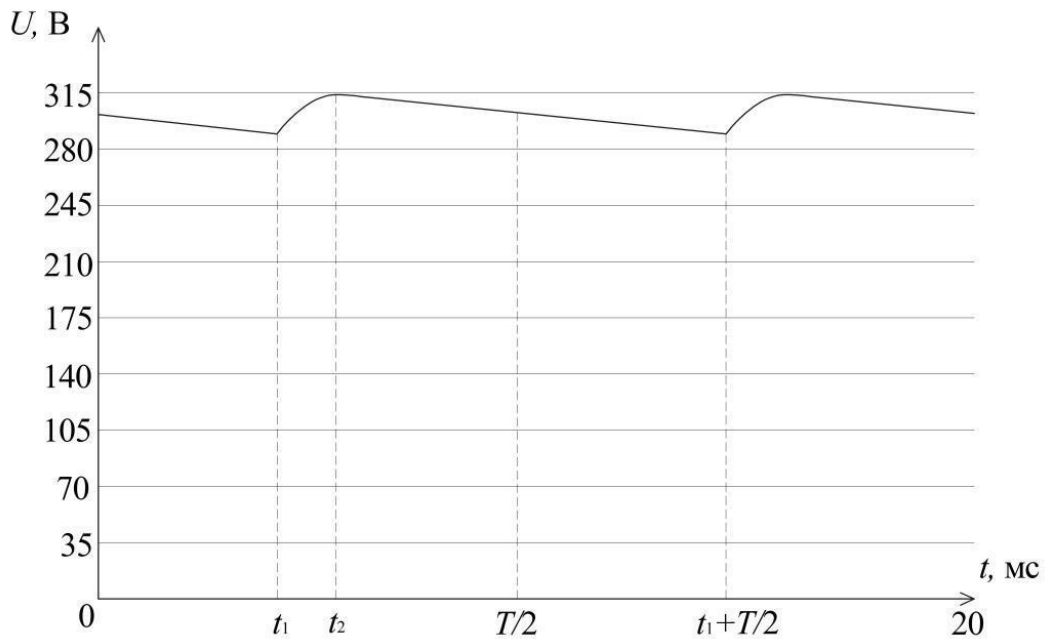


Рисунок 2.3 – Форма напруги на навантаженні перетворювача змінної напруги з конденсатором, що фільтрує

Починається перший інтервал з перевищення миттєвого значення модуля вхідної змінної напруги залишкового потенціалу на конденсаторі C , а закінчується досягненням максимального миттєвого значення напруги на навантаженні. Еквівалентна схема ланцюга, що пояснює процеси у випрямлячі з конденсатором для першого інтервалу, наведено на рисунку 2.4.

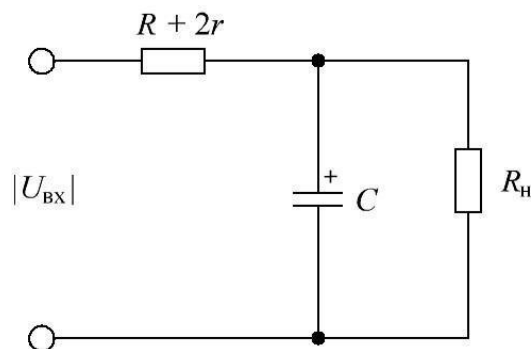


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема ланцюга для першого інтервалу від t_1 до t_2 перетворювача змінної напруги з конденсатором, що фільтрує

Одночасно протікають два процеси: струм мережі живлення протікає через навантаження, при цьому форма струму, що протікає, повторює форму напруги;

Струм протікає через конденсатор С, заряджаючи його.

Таким чином, модуль значення струму, що споживається від електричної мережі на першому інтервалі $|i_I(t)|$, дорівнює сумі струмів, протікають через i_n навантаження та конденсатор i_c

$$|i_1(t)| = i_n(t) + i_c(t). \quad (2.2)$$

Миттєве значення напруги на навантаженні $U_n(t)$ визначається модулем миттєвого значення вхідної напруги:

$$U_n(t) = U_{m1} \cdot |\sin(\omega t + \varphi_1)|, \quad t = t_1, \dots, t_2. \quad (2.3)$$

Чисельні значення амплітуди U_{m1} , фази φ_1 і струму, що протікає через навантаження, знаходяться операторним методом аналізу та розраховуються за формулами:

$$i_n(t) = \frac{U_{m1}}{R_n} \cdot |\sin(\omega t + \varphi_1)|, \quad t = t_1, \dots, t_2, \quad (2.4)$$

$$U_{m1} = U_m |W_1(p)|, \quad (2.5)$$

де W_1 – передатна функція від вхідних затискачів до навантаження.

Чисельне значення фази φ_1 визначається за формулою:

$$\varphi_1 = \text{Arg}(W_1(p)), \quad (2.6)$$

Значення передавальної функції W_1 визначається за формулою:

$$W_1(p) = \frac{Y}{Y + R + 2r}, \quad (2.7)$$

де Y – еквівалентний комплексний опір паралельно включених опору навантаження та конденсатора С. Значення Y визначається за формулами:

$$Y = \frac{R_n \cdot Z}{R_n + Z}, \quad (2.8)$$

$$Z = \frac{1}{p \cdot C}. \quad (2.9)$$

Напруга на конденсаторі знаходиться як:

$$U_C(t) = U_{m1} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1), \quad t = t_1, \dots, t_2. \quad (2.10)$$

Тимчасова залежність струму через конденсатор С визначається виразом:

$$i_C(t) = C \frac{dU_C(t)}{dt}, \quad t = t_1, \dots, t_2. \quad (2.11)$$

Після виконання обчислень за формулами (2.4)-(2.11) та підстановки $i_C(t)$ в (2.2) визначається значення споживаного струму на першому інтервалі.

На другому інтервалі від t_2 до $t_1+T/2$ конденсатор С розряджається через навантаження R_H . Струм, що споживається від мережі, на даному інтервалі часу відсутній. Еквівалентна схема кола, що пояснює процеси у випрямлячі з конденсатором для другого інтервалу, наведено на рисунку 2.5.

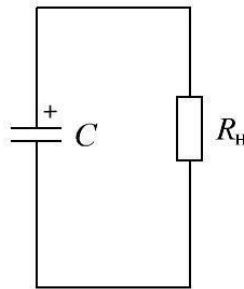


Рисунок 2.5 – Еквівалентна схема ланцюга другого інтервалу від t_2 до $t_1+T/2$ перетворювача змінної напруги з конденсатором, що фільтрує

Напруга на конденсаторі С експоненційно зменшується щодо початкового значення в момент часу t_2 :

$$U_H(t) = U_C(t_2)e^{-t/\tau_1}, \quad t = t_2, \dots, t_1 + T/2, \quad (2.12)$$

$$\tau_1 = CR_H.$$

Момент часу t_1 знаходиться при вирішенні трансцендентного рівняння:

$$\sin(\omega t_1 + \varphi_1) = e^{-\frac{t_1}{\tau_1}} \cdot \sin(\omega t_2 + \varphi_1). \quad (2.13)$$

Чисельне значення t_2 з урахуванням (2.6) визначається за такою формулою:

$$t_2 = \frac{T}{4} + \frac{T}{2\pi} \cdot \varphi_1. \quad (2.14)$$

Знаючи чисельні значення моментів часу t_1 і t_2 можна побудувати форму напруги на навантаженні (рисунок 2.3) і форму струму, що споживається (рисунок 2.6).

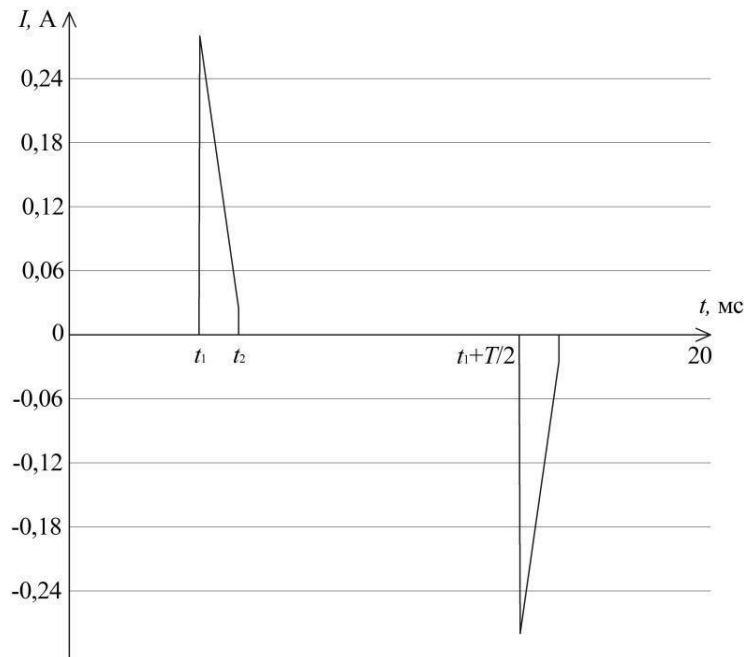


Рисунок 2.6 – Форма споживаного струму на навантаженні перетворювача змінної напруги з конденсатором.

Для аналізу гармонійного складу струму необхідно функцію, що описує форму споживаного струму (рисунок 2.6), розкласти до ряду Фур'є, згідно з формулою:

$$I(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos(k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cdot \sin(k\omega t), \quad (2.15)$$

де a_k, b_k - Коефіцієнти розкладання в ряд Фур'є.

Коефіцієнт потужності K_p знаходиться згідно з формулою:

$$K_p = \frac{P}{S}, \quad (2.16)$$

де P - активна споживана потужність; S – повна споживана потужність.

Значення активної повної споживаної потужності визначаються співвідношеннями:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{вх}}(t) \cdot (a_1 \cdot \cos(\omega t) + b_1 \cdot \sin(\omega t)), \quad (2.17)$$

$$S = U_m \cdot \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_k \cdot \cos(k\omega t) + b_k \cdot \sin(k\omega t) \right]^2}. \quad (2.18)$$

Проводячи обчислення за формулами (2.2)-(2.18) для значень елементів схеми $R=47$ Ом, $C=4,7$ мкФ, $R_H=24$ кОм, що відповідає потужності навантаження 4 Вт, $r=1$ Ом отримано значення коефіцієнта потужності, що дорівнює 0,46.

Таким чином, запропонований у підрозділі 2.1 алгоритм дозволяє розрахувати форму споживаного струму, форму напруги на навантаженні і значення коефіцієнта потужності перетворювача напруги з конденсатором.

2.2 Розрахунок коефіцієнта потужності перетворювача з коректором коефіцієнта перетворення із диністором

Пристрій перетворювача змінної напруги в постійне містить обмежувальний резистор R , двонапівперіодний випрямляч на діодах VD_1 - VD_4 , що згладжує конденсатор C , діод VD_5 , некерований тиристор (диністор) VD_6 та навантаження R_H (Рисунок 2.7).

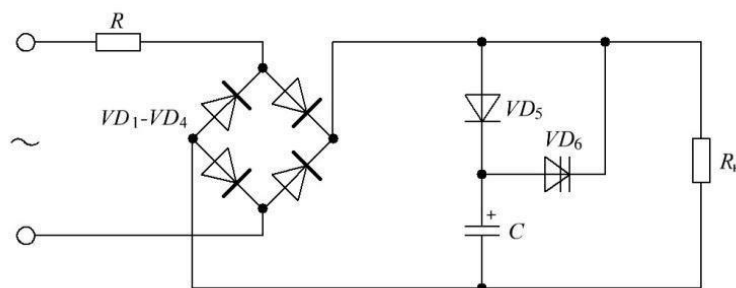


Рисунок 2.7 – Схема перетворювача з пасивним ККП із диністором

Перетворювач з ККП з диністором працює наступним чином. На діоди VD_1 - VD_4 подається змінна входна напруга. На інтервалі часу від t_1 до t_2 (Рисунок 2.8) конденсатор C через відкритий діод VD_5 заряджається, напруга на ньому зростає відповідно до напруги мережі живлення.

При переході миттєвого значення випрямленої напруги максимального значення (t_2 на рисунку 2.8) діод VD_5 замикається, на конденсаторі C зберігається напруга, що дорівнює максимальному значенню випрямленої напруги в момент часу t_2 . Навантаження R_H живиться напругою з виходу діодного випрямляча.

Подальше зменшення миттєвої напруги на позитивному виведенні діодного випрямляча призводить до збільшення різниці потенціалів на виводах диністора VD_6 .

При досягненні значення напруги відкриття диністора в момент часу t_3 диністор відкривається і конденсатор C виявляється підключеним до навантаження. Діодний випрямляч закривається та навантаження R_H живиться від конденсатора C , розряджаючи його. Напруга на конденсаторі C зменшується. Цей процес триває до моменту перевищення миттєвого значення вхідної напруги на позитивному виведенні діодного випрямляча залишкової різниці потенціалів конденсатора C (момент $t_1 + T/2$ рисунку 2.8). Потім описаний процес періодично повторюється.

Для подальшого розрахунку прийнято амплітудне значення напруги U_m , рівне 311 В, значення частоти напруги $f = 50$ Гц. Значення опору мережі живлення прийнято рівним нулю.

Процеси, що протікають у ланцюгу (рисунок 2.8), розділені на групи, що повторюються, з трьох часових інтервалів. Прив'язка меж інтервалів до форми напруги на навантаженні в режимі функціонування перетворювача, що встановився, наведено на рисунку 2.8: перший – від t_1 до t_2 , другий - від t_2 до t_3 третій від t_3 до $t_1 + T/2$, де $T = 1/f$ – період змінної напруги живильної електричної мережі[13].

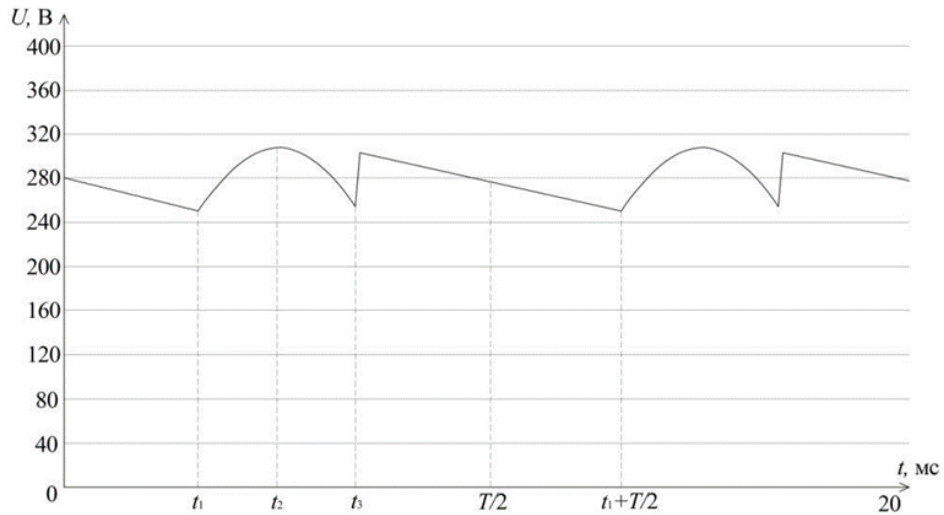


Рисунок 2.8 – Форма напруги на навантаженні перетворювача з пасивним ККП з диністором

На першому інтервалі від t_1 до t_2 (рисунок 2.8) діод VD_5 прямозміщений, а диністор VD_6 закритий, конденсатор C_1 заряджається до максимального миттєвого значення вхідної напруги. Момент часу t_2 відповідає максимальному значенню миттєвої напруги на навантаженні. Еквівалентна схема кола, що пояснює процеси у перетворювачі для першого інтервалу, наведена на рисунку 2.9.

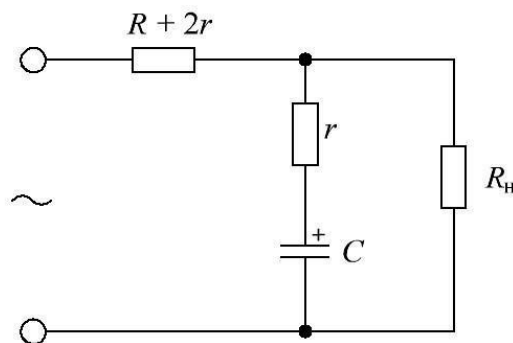


Рисунок 2.9 – Еквівалентна схема кола для першого інтервалу від t_1 до t_2 перетворювача з пасивним ККП з диністором

Одночасно протікають два процеси:

- струм мережі живлення протікає через навантаження, при цьому форма струму, що протікає, повторює форму напруги;

- струм протікає через конденсатор, заряджаючи його.

Таким чином, модуль значення струму, що споживається від електричної мережі на першому інтервалі $|i_1(t)|$, дорівнює сумі струму, протікає через навантаження та струму конденсатора $i_C(t)$:

$$|i_1(t)| = i_H(t) + i_C(t). \quad (2.19)$$

Миттєве значення напруги на навантаженні $U_H(t)$ визначається за формулою:

$$U_H(t) = U_{m1} \cdot |\sin(\omega t + \varphi_1)|, \quad t = t_1, \dots, t_2. \quad (2.20)$$

де U_{m1} - Амплітуда напруги на навантаженні на першому інтервалі;

φ_1 - Зсув фази напруги на навантаженні щодо $U_{вх}$ на першому інтервалі.

Чисельні значення амплітуди U_{m1} і струму, що протікає через навантаження на першому інтервалі, знаходяться операторним методом аналізу та розраховуються за формулами:

$$i_H(t) = \frac{U_{m1}}{R_H} \cdot |\sin(\omega t + \varphi_1)|, \quad t = t_1, \dots, t_2, \quad (2.21)$$

$$U_{m1} = U_m |W_1(p)|, \quad (2.22)$$

де W_1 – передатна функція від вхідних затискачів до навантаження

Чисельне значення фази φ_1 визначається за формулою:

$$\varphi_1 = \text{Arg}(W_1(p)), \quad (2.23)$$

Значення передавальної функції W_1 визначається за формулою:

$$W_1(p) = \frac{Y}{Y + 2r + R}, \quad (2.24)$$

де Y – еквівалентний комплексний опір паралельно включених опору навантаження та кола із послідовно з'єднаних r та C .

Значення Y визначається за формулами:

$$Y = \frac{R_H \cdot Z}{R_H + Z}, \quad (2.25)$$

$$Z = r + \frac{1}{p \cdot C}. \quad (2.26)$$

В момент часу, що безпосередньо передує t_1 конденсатор C_1 має залишковий заряд, тому зміна напруги на ньому на першому інтервалі $U_C(t)$ визначається класичним методом аналізу перехідних процесів у вигляді суми, що встановилася U_{C_V} та вільною $U_{C_{CB}}$ складових:

$$U_C(t) = U_{C_V}(t) + U_{C_{CB}}(t). \quad (2.27)$$

Напруга, що встановилася на конденсаторі дорівнює:

$$U_{C_V}(t) = U_{m1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(\omega \tau_1)^2}} \cdot |\sin(\omega t + \varphi_1 + \varphi_2)|, \quad (2.28)$$

де $\varphi_2 = -\arctg(\omega \tau_1)$ – зсув фази між напругою, що встановилася на конденсаторі C та $U_H(t)$;

$\tau_1 = rC$ - постійна часу кола rC .

Вільна складова напруги на конденсаторі визначається за формулою:

$$U_{C_{CB}}(t) = A_1 e^{-t/\tau_2}, \quad (2.29)$$

де A_1 - постійна інтегрування;

τ_2 - постійна часу, значення якої визначається за формулою:

$$\tau_2 = C \cdot \left(r + \frac{(R+2r) \cdot R_H}{(R+2r)+R_H} \right). \quad (2.30)$$

Підставляючи (2.28) і (2.29) в (2.27), отримана формула для розрахунку перехідної напруги на конденсаторі:

$$U_C(t) = \frac{U_{m1}}{\sqrt{1+(\omega \tau_1)^2}} \sin(\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) + A_1 e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (2.31)$$

Вважаючи, що значення напруги на конденсаторі перед початком перехідного процесу рівне напрузі в початку перехідного процесу $U_C(-t_1) = U_C(t_1)$, значення постійної інтегрування визначається за формулою:

$$A_1 = U_C(t_1) - \frac{U_{m1}}{\sqrt{1+(\omega \tau_1)^2}} \cdot \sin(\omega t_1 + \varphi_1 + \varphi_2). \quad (2.32)$$

Тимчасова залежність напруги на конденсаторі C першому інтервалі записується як:

$$U_C(t) = \frac{U_{m1}}{\sqrt{1+(\omega \tau_1)^2}} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) + \left(U_C(t_1) - \frac{U_{m1}}{\sqrt{1+(\omega \tau_1)^2}} \cdot \sin(\omega t_1 + \varphi_1 + \varphi_2) \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}, t = t_1, \dots, t_2. \quad (2.33)$$

Тимчасова залежність струму, що протікає через конденсатор С визначається виразом:

$$i_C(t) = C \frac{dU_C(t)}{dt}, \quad t = t_1, \dots, t_2. \quad (2.34)$$

Після обчислень за формулами (2.20)-(2.34) та підстановки визначається значення споживаного струму на першому інтервалі. На другому інтервалі від t_2 до t_3 (рисунок 2.8) діод VD5 та диністор VD6 закриті. Починається другий інтервал з моменту часу, при якому миттєве значення модуля напруги на навантаженні стає менше залишкового потенціалу на конденсаторі С, а закінчується моментом перевищення різниці миттєвого значення модуля напруги на навантаженні і залишкового потенціалу на конденсаторі С напруги відкриття диністора.

Еквівалентна схема кола, що пояснює процеси у випрямлячі з пасивним ККП другого інтервалу, наведено рисунку 2.10.

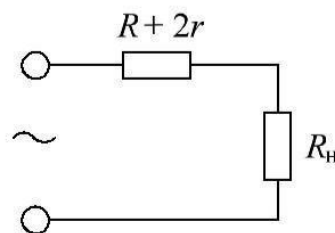


Рисунок 2.10 – Еквівалентна схема кола другого інтервалу від t_2 до t_3 перетворювача з пасивним ККП з диністором

Струм, що споживається від електричної мережі на другому інтервалі $i_2(t)$ визначається струмом, що протікає через навантаження i_{H_2} . Конденсатор С має напругу, значення якого на другому інтервалі не змінюється.

Струм, що протікає через навантаження i_{H_2} , знаходиться операторним методом аналізу та розраховується за формулами:

$$i_{H_2}(t) = \frac{U_{m_2}}{R_H} \cdot \sin(\omega t), t = t_2, \dots, t_3, \quad (2.35)$$

де U_{m_2} - Амплітуда напруги на навантаженні на другому інтервалі.

Значення амплітуди напруги на навантаженні другому інтервалі визначається за формулою:

$$U_{m_2} = U_m K, \quad (2.36)$$

де K - Коефіцієнт передачі кола від вхідних затискачів до навантаження.

Значення K розраховується за формулою:

$$K = \frac{R_H}{R_H + 2r + R}. \quad (2.37)$$

На третьому інтервалі від t_3 до $t_1 + T/2$ діод VD_5 закритий, диністор VD_6 відкритий. Конденсатор C через відкритий диністор VD_6 розряджається через навантаження (рисунок 2.11).

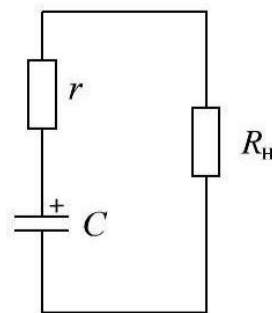


Рисунок 2.11 – Еквівалентна схема кола для третього інтервалу від t_3 до $t_1 + T/2$ перетворювача з пасивним ККП з диністором

Напруга на конденсаторі C експоненційно зменшується щодо початкового значення в момент часу t_3 :

$$U_C(t) = U_{m_2} e^{-t/\tau_3}, t = t_3, \dots, t_1 + T/2, \quad (2.38)$$

де U_{m_2} - початкове значення напруги на конденсаторі, рівне амплітудному значення напруги на навантаженні на другому інтервалі;

τ_3 - постійна часу кола.

Значення τ_3 визначається за формулою:

$$\tau_3 = C(r + R_H), \quad (2.39)$$

а напруга на навантаженні за формулою:

$$U_H(t) = U_C(t) \frac{R_H}{R_H + r}. \quad (2.40)$$

Струм, що споживається від мережі, на даному інтервалі часу відсутній. Для побудови тимчасової залежності напруги та струмів на третьому інтервалі, необхідно знайти чисельні значення t_1 і t_3 .

Чисельне значення t_3 знаходиться з рівняння:

$$U_{m_1} - U_H(t_3) = U_{0VD_6}, \quad (2.41)$$

де U_{0VD_6} – напруга відкриття диністора VD6.

Момент часу t_1 знаходиться при вирішенні трансцендентного рівняння:

$$U_{m_2} \cdot \sin(\omega t_1) = U_{m_2} \cdot e^{-\frac{t_1 + \frac{T}{2} - t_3}{\tau_3}}. \quad (2.42)$$

Знаючи чисельні значення моментів часу t_1 , t_2 і t_3 можна побудувати форму споживаного струму (Рисунок 2.12).

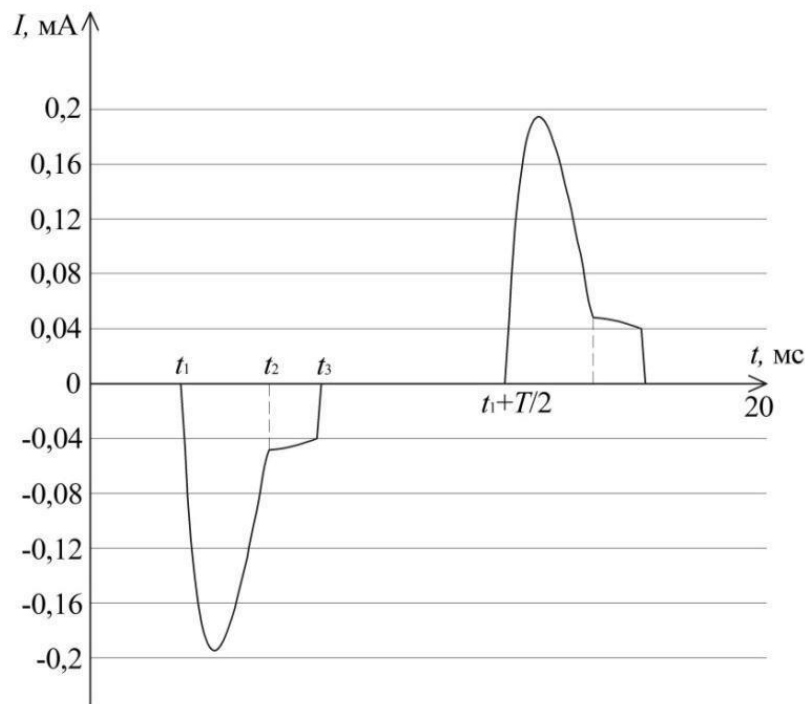


Рисунок 2.12 – Форма споживаного струму перетворювача з пасивним ККП з диністором

Для аналізу гармонійного складу струму необхідно функцію, що описує форму споживаного струму (рисунок 2.12), розкласти до ряду Фур'є.

Розрахункове значення коефіцієнта потужності становить 0,718.

Збільшення коефіцієнта потужності у пристрої перетворювача з пасивним ККП з диністором порівняно з пристроєм з конденсатором, що фільтрує, пояснюється тим, що струм з електричного кола споживає більшу частину періоду вхідної змінної напруги.

2.3. Пристрій регулювання струму у світлодіодних джерелах світла послідовно з'єднаним навантаженням

Миттєве значення випрямленої вхідної змінної напруги змінюється по синусоїді в інтервалі від нуля до максимального позитивного значення. Враховуючи розвиток мікропроцесорної та швидкодіючої комутуючої техніки, є можливість комутувати світлодіоди синхронно з миттєвим значенням напруги мережі.

Наприклад, поки напруга зростає від нуля до чотирьох вольт, включений один світлодіод. У діапазоні від чотирьох до восьми вольт включені два світлодіоди послідовно, в діапазоні від восьми до 12 В три світлодіоди послідовно і т.д., поки значення миттєвої вхідної напруги не досягне максимального, рівного 312 В при діючій напрузі мережі живлення 220 В. Потім у міру зменшення миттєвого значення напруги світлодіоди послідовно відключаються.

Таким чином, якщо розділити миттєве значення випрямленої напруги на конкретне значення напруги роботи одного світлодіода, то можна визначити їх кількість, яку потрібно послідовно включити. При робочій напрузі світлодіода, що дорівнює чотири вольти і максимальної миттєвої амплітудної напруги 312 їх кількість дорівнює 78.

Запропонована ідея комутації світлодіодів реалізована у пристрої регулювання струму у світлодіодних джерелах світла, яке містить

мікроконтролер 1 з двома аналогово-цифровими перетворювачами (АЦП) 2 і 3, діодний випрямляч 4, керовані ключі 5.1, 5.2, 5.n-1 та 5. , світловипромінюючі діоди (СД) 6.1, 6.2, 6.3, 6.n та резистори 7, 8 та 9 (рисунок 2.13).

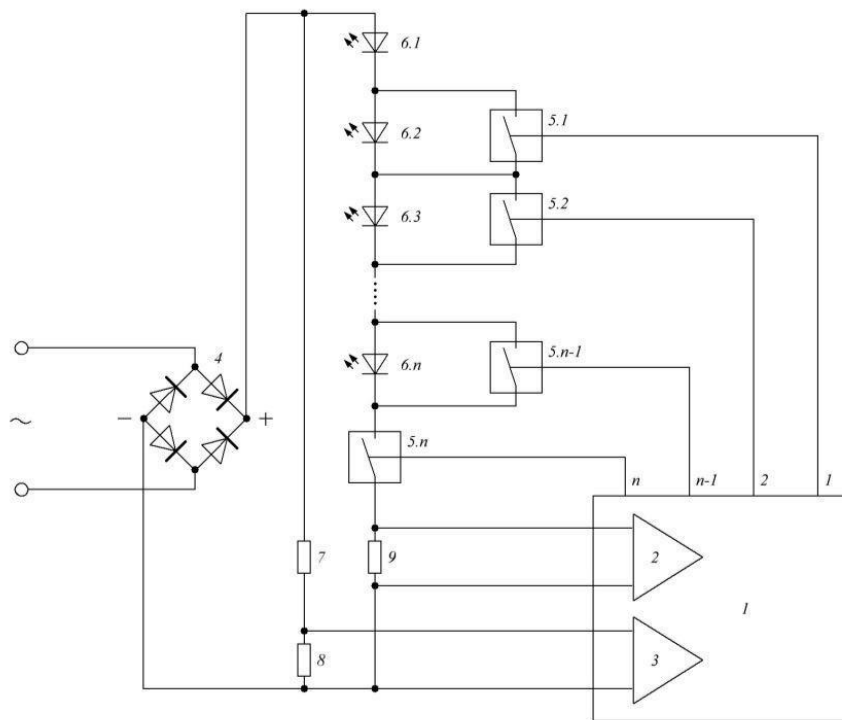


Рисунок 2.13 – Функціональна схема пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла із послідовно з'єднаним навантаженням

Пристрій, зображений рисунку 2.13, працює в такий спосіб. У вимкненому стані ключі 5.1, ..., 5.n розімкнені, що запобігає виходу СД з ладу при включенні пристрою. На діодний випрямляч 4 подається вхідна змінна напруга. При включенні пристрою мікроконтролер 1 за допомогою АЦП 3 визначає момент переходу пульсуючої напруги на виході діодного випрямляча через 4 нуль і подає логічні сигнали на керуючі входи керованих ключів 5.1, 5.2, ... 5.n таким чином, щоб керовані ключі перейшли в замкнутий стан. До вихідних клем діодного випрямляча 4 підключена ланцюг з послідовно з'єднаних СД 6.1, замкнутого ключа 5.n і резистора 9.

Світиться СД 6.1. зі збільшенням значення напруги на вихідних клеммах діодного випрямляча 4 зростає значення струму, що протікає по ланцюгу послідовно з'єднаних СД 6.1 - замкнутий ключ 5.n - резистор 7. Струм в колі контролюється мікроконтролером 1 за допомогою АЦП 2 падіння напруги на

резисторі 9. При досягненні струму в колі максимального значення для обраного типу СД мікроконтролер 1 змінює логічний сигнал на вході керованого керованого ключа 5.1 таким чином, щоб керований ключ 5.1 перейшов в розімкнений стан. Тепер до вихідних клем діодного випрямляча 4 підключено коло із послідовно з'єднаних СД 6.1, 6.2, замкнутого ключа 5.n і резистора 9. Світяться СД 6.1 і 6.2.

При подальшому збільшенні напруги на вихідних клеммах діодного випрямляча 4 контролер послідовно розмикає ключі 5.2; 5.3 тощо, по черзі підключаючи світлодіоди 6.3, 6.4 і т.д.

Після досягнення напруги на вихідних клеммах діодного випрямляча 4 максимального миттєвого значення напруги і відповідно струму, що протікає по ланцюгу СД 6.1; 6.2; ... 6.n-1, замкнений ключ 5.n, резистор 9, напруга та струм зменшуються.

При досягненні струму в колі мінімального значення для вибраного типу СД мікроконтролер 1 змінює логічний сигнал на вході керованого керованого ключа 5.n-1 таким чином, щоб керований ключ 5.n-1 перейшов у замкнений стан. При подальшому зменшенні напруги на вихідних клеммах діодного випрямляча мікроконтролер 4 послідовно замикає ключі 5.n-2; 5.n-3 і т.д., по черзі вимикаючи світлодіоди 6.n-2; 6.n-3 і т.д.

У результаті за половину періоду змінної напруги живлення з максимальною яскравістю світяться один, два, три, ..., n-1, n, n-1, ..., три, два, один СД, забезпечуючи максимальне значення світлового потоку. Струм у ланцюгу СД змінюється від мінімального до максимального значення з частотою в 4-n разів більшої частоти живильної змінної напруги. Додаткова перевага представленого пристрою полягає в підвищеній надійності, оскільки в конструкції пристрою відсутні електролітичні конденсатори, що згладжують, які, як правило, визначають термін служби пристрою. Також надійність пристрою збільшує мікроконтролер, який може бути запрограмований таким чином, що при перевищенні струму через СД максимального робочого значення розмикається ключ 5.n, відключаючи СД від діодного випрямляча 4

до моменту переходу напруги пульсуючого на виході діодного випрямляча 4 через нуль.

2.3.1 Розрахунок коефіцієнта потужності пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням

Покажемо застосування розробленої в розділі 2.1 математичної моделі для розрахунку коефіцієнта потужності пристрою регулювання струму світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням.

Розглянемо приклад, в якому максимальне значення вхідної амплітудної напруги дорівнює 16.

Кількість світлодіодів, які потрібно в подальшому комутувати, визначається розподілом амплітудного значення на конкретне значення напруги роботи одного світлодіода. Для цього необхідно побудувати його вольт-амперну характеристику та дізнатися напругу роботи даного світлодіода.

Скористаємося для цього модифікованою функцією гіперболічного тангенсу для апроксимації ВАХ СД.

$$I(U) = U(A_1 e^{B_1 U} + A_2 e^{-B_2 U})$$

де A_1 , A_2 , B_1 , B_2 - чисельні коефіцієнти.

Знаючи модель світлодіода та його числові коефіцієнти (наприклад, OSPW511P) можна побудувати його ВАХ (рисунок 2.14).

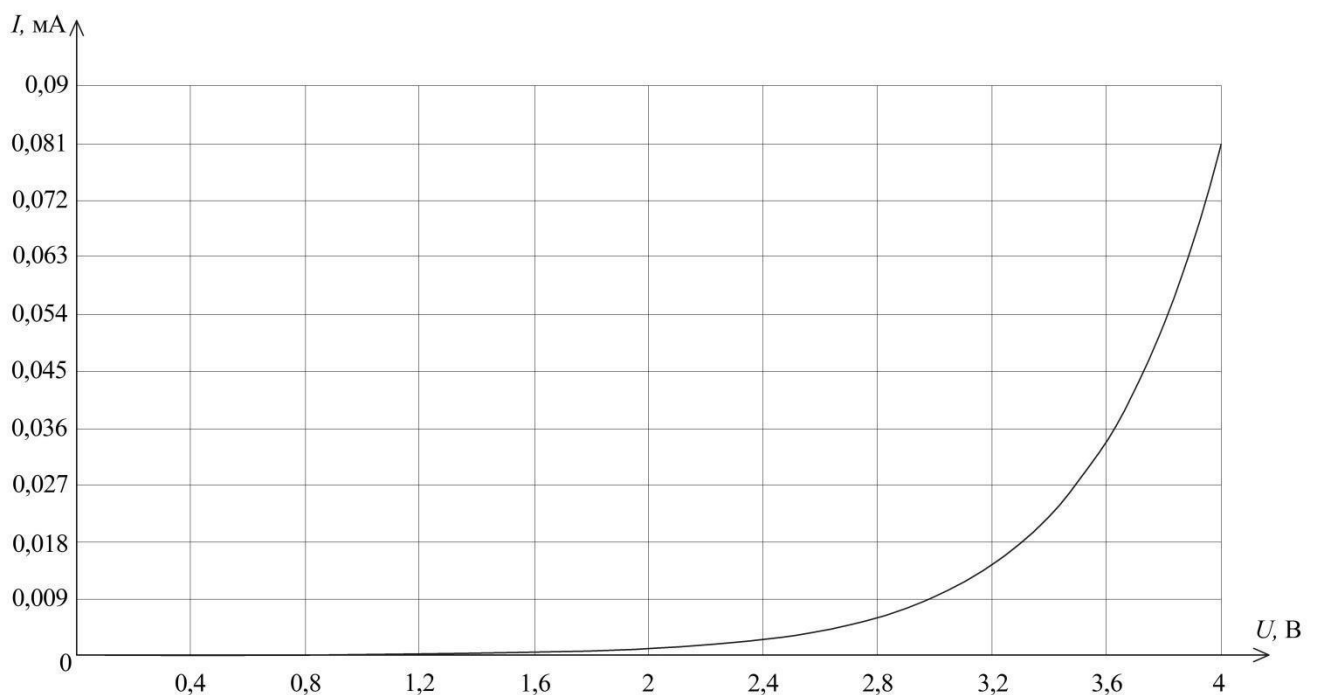


Рисунок 2.14 – ВАХ світлодіода OSPW5111P

Як видно з рисунка 2.14, при граничному струмі світлодіода 80 мА напруга дорівнює чотирьом вольтам.

Відповідно, при максимальному амплітудному значенні вхідної змінної напруги дорівнює 16, необхідно комутувати 4 світлодіоди OSPW5111P.

Весь інтервал напруги необхідно розбити на конкретні відрізки від 0 до t_1 , від t_1 до t_2 , від t_2 до t_3 , від t_3 до t_4 , від t_4 до t_5 і від t_5 до t_6 . Кількість відрізків залежить від кількості увімкнених світлодіодів у схему пристрою.

Час t_1 відповідає миттєвому значенню напруги, що дорівнює 4 В, t_2 відповідає 8, t_3 відповідає 12, t_4 відповідає 12 після переходу через амплітудне значення 16, t_5 відповідає 8 і t_6 відповідає 4 В. Побудована форма струму представлена рисунку 2.15.

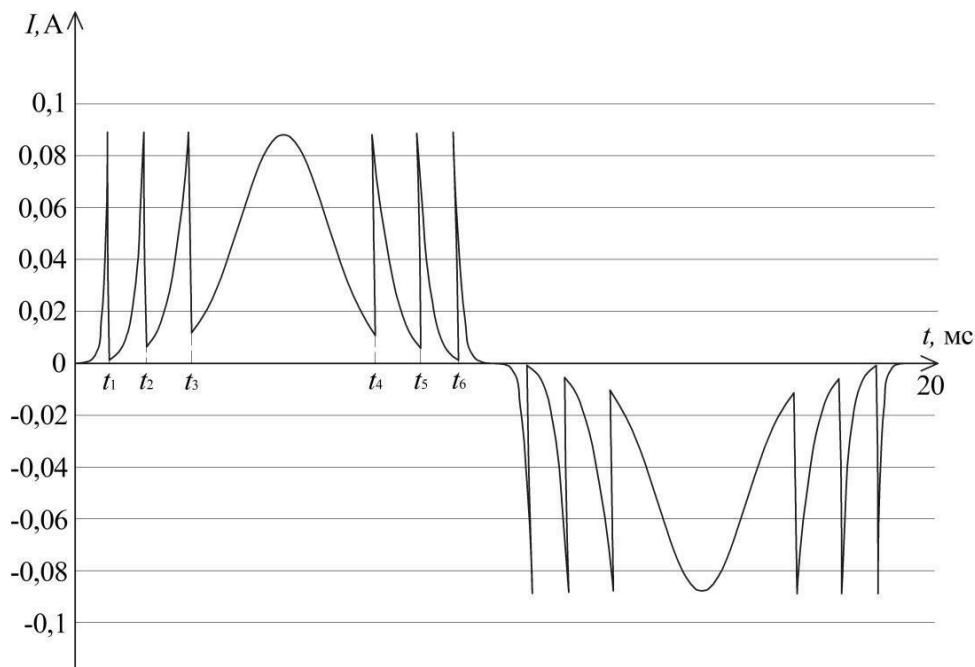


Рисунок 2.15 – Форма струму пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла із послідовно з'єднаним навантаженням

Для аналізу гармонійного складу струму необхідно функцію, що описує форму споживаного струму (рисунок 2.15), розкласти до ряду Фур'є.

Значення активної та повної споживаної потужності та значення коефіцієнта потужності визначаються за формулами (2.16)-(2.18) Розрахункове значення коефіцієнта потужності дорівнює 0,94.

Таке значення коефіцієнта потужності пояснюється тим, що пристрій споживає струм на весь період вхідної напруги, а також тим, що в схемі пристрою відсутні реактивні елементи, що додають фазові зсуви при роботі пристрою.

2.4 Пристрій регулювання струму в світлодіодних джерелах світла послідовно-паралельно з'єднаним навантаженням

Враховуючи, що миттєве значення випрямленої вхідної змінної напруги змінюється синусоїдою в інтервалі від нуля до максимального позитивного значення, є можливість комутувати світлодіоди синхронно з миттєвим значенням напруги мережі в послідовно-паралельні групи.

Наприклад, поки напруга зростає від нуля до чотирьох вольт, включена група з n паралельно з'єднаних світлодіодів. У діапазоні від чотирьох до восьми вольт включені дві паралельні групи з $n/2$ послідовно з'єднаних світлодіодів. У діапазоні від восьми до 12 В три паралельні групи з $n/3$ послідовно з'єднаних світлодіодів і т.д., поки значення миттєвої вхідної напруги не досягне максимальної, рівної 312 В при діючому значенні напруги мережі живлення 220 В. В цей момент всі світлодіоди будуть з'єднані послідовно. Потім у міру зменшення миттєвого значення напруги світлодіоди перемикаються в послідовно-паралельні групи у зворотному порядку, поки всі знову не будуть з'єднані паралельно.

Таким чином, якщо розділити миттєве значення випрямленої напруги на конкретне значення напруги роботи одного світлодіода, можна буде визначити кількість світлодіодів у пристрої, який буде потрібно послідовно-паралельно підключити.

Запропонована ідея комутації світлодіодів реалізована у пристрої регулювання струму у світлодіодних джерелах світла, яке містить мікроконтролер 1 з двома аналогово-цифровими перетворювачами 2 і 3,

діодний випрямляч 4, керовані нормально розімкнені ключі 5.1, 5.2, ..., 5.n, світло. 6.2, 6.3... 6.n, керовані ключі, що працюють на перемикання схеми 7.1, 7.2, ..., 7.n-1, перший резистор 8, другий та третій резистори 9 та 10 (рисунок 2.16).

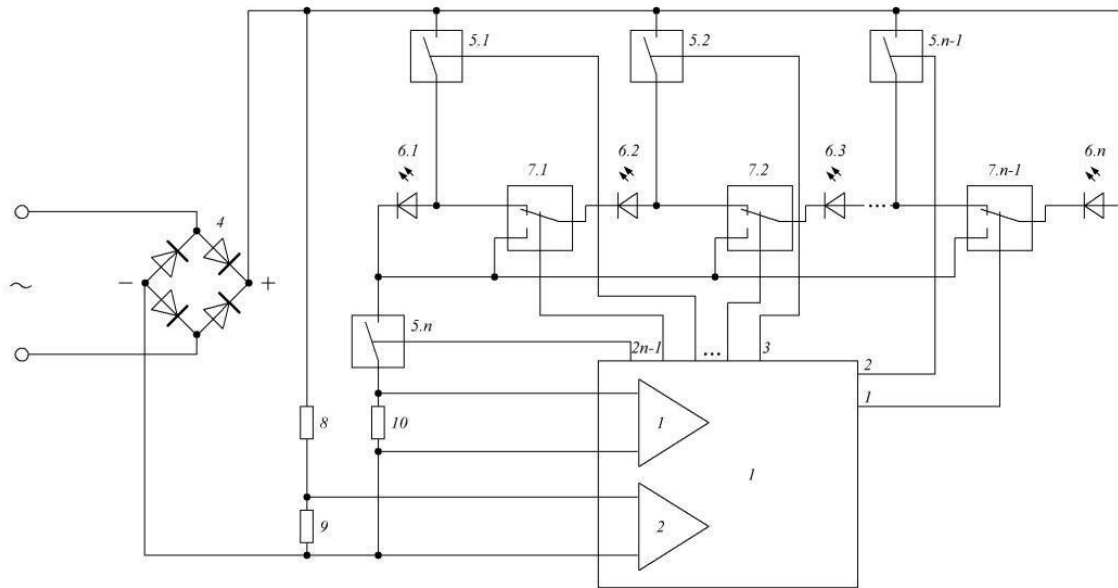


Рисунок 2.16 – Функціональна схема пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельно з'єднаним навантаженням

Пристрій, зображений на рисунку 3.16, працює в такий спосіб. У вимкненому стані ключі 5.1, ..., 5.n розімкнені, ключі 7.1, ..., 7.n-1 нормально замкнуті, що запобігає виходу СД з ладу при включенні пристрою. При включенні пристрою контролер 1 за допомогою АЦП 2 визначає момент переходу пульсуючої напруги на виході діодного випрямляча 4 через нуль і подає логічні сигнали на входи управляючі керованих ключів таким чином, щоб керовані ключі 5.1, 5.2, ..., 5.n перейшли в замкнутий стан, а ключі 7.1, 7.2, ..., 7.n-1 переключилися на нормально розімкнений контакт. Аноди СД 6.1, 6.2, ..., 6.n-1 через замкнуті ключі 5.1, ..., 5.n-1 підключаються до анода СД 6.n та плюсової вихідної клеми діодного випрямляча. В результаті до вихідних клем діодного випрямляча 4 послідовно підключаються ключ 5.n, резистор 8 та паралельно з'єднані СД 6.1, 6.2, ..., 6.n. Світяться СД 6.1, 6.2, ..., 6.n. Загальний світловий потік у n разів більший за світловий потік одного СД.

Із збільшенням значення напруги на вихідних клемх діодного випрямляча значення 4 значення зростає. Струм в колі контролюється контролером 1 за допомогою АЦП 3 падіння напруги на резисторі 8. При досягненні струмом в колі максимального значення для обраного типу СД контролер 1 змінює логічні сигнали на входах керованих керованих ключів таким чином, щоб керовані ключі з непарними номерами 5.1, 5.3, ... переключилися в розімкнений стан, а ключі 7.2, 7.4, ... з парними номерами переключилися на нормально розімкнений контакт. До вихідних клем діодного випрямляча через 4 замкнутий ключ 5.n і резистор 8 виявляється підключеним ланцюг із паралельно включених груп по два послідовно з'єднаних СД у групі. Світяться СД 6.1, 6.2, ..., 6.n, якщо n – парне, або 6.1, 6.2, ..., 6.n-1, якщо n – непарне. Загальний світловий потік у n або (n-1) разів більший за світловий потік одного СД.

При подальшому збільшенні напруги на вихідних клемх діодного випрямляча 4 контролер по черзі підключає ланцюг паралельно включених груп по три, чотири, ... послідовно з'єднаних СД в групі. Після досягнення напруги на вихідних клемх діодного випрямляча 4 максимального миттєвого значення напруги і відповідно струму, що протікає по ланцюгу СД 6.1; 6.2; ... 6.n, замкнутий ключ 5.n, резистор 10, напруга та струм зменшуються. При досягненні струму в колі мінімального значення для обраного типу СД контролер 1 змінює логічні сигнали на входах керованих керованих ключів таким чином, щоб керований ключ 5.n-1 перейшов у замкнутий стан. При подальшому зменшенні напруги на вихідних клемх діодного випрямляча 4 контролер по черзі підключає ланцюг із паралельно включених груп по ... чотири, три, два, один ... послідовно з'єднаних СД у групі.

У результаті в кожен інтервал часу між перемиканнями ключів за період змінної напруги живлення світяться всі n або майже всі СД, забезпечуючи сталість світлового потоку.

Позитивною якістю представленого пристрою є підвищена надійність, оскільки в конструкції пристрою відсутні електролітичні конденсатори, що згладжують, які, як правило, визначають термін служби пристрою.

Також надійність пристрою збільшує мікроконтролер, який може бути запрограмований таким чином, що при перевищенні струму через СД максимального робочого значення розмикається ключ 5.n, відключаючи СД від діодного випрямляча 4 до моменту переходу напруги пульсуючого на виході діодного випрямляча 4 через нуль.

Додатковою перевагою є те, що представлений пристрій може працювати при напрузі від 4 до n кількості вольт при змінній та постійній напрузі, що робить його універсальним у використанні.

2.5 Висновки до розділу

Таким чином, розроблена математична модель дозволяє визначати форми споживаного струму, напруги на навантаженні та розраховувати чисельні значення коефіцієнта потужності перетворювачів змінної напруги в постійне.

Алгоритм моделі полягає в наступному.

Процеси, що протікають в колі, поділяються на повторювані групи часових інтервалів, для кожного з яких складається еквівалентна схема заміщення, що описує роботу всього пристрою для конкретного інтервалу. Далі схема аналізується методами лінійних електричних ланцюгів: операторним методом і класичним методом аналізу перехідних процесів. У результаті визначаються форми споживаного струму, напруги на навантаженні, що дозволяють розрахувати чисельне значення коефіцієнта потужності. На відміну від відомих результатів запропонована математична модель дозволяє як якісно, так і кількісно розрахувати форму споживаного струму, що підтверджує перевагу запропонованого алгоритму над відомими. Універсальність математичної моделі доведена її застосуванням для розрахунку значення коефіцієнта потужності перетворювача напруги з конденсаторним фільтром.

Також у цьому розділі представлені нові пристрої перетворення змінної напруги на постійне. Показано застосування розробленої математичної моделі при аналізі коректора коефіцієнта потужності з диністором, пристрої регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним

навантаженням та пристрої регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно- паралельним з'єднанням навантаження.

3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1. Дослідження і практична реалізація пристроя перетворення змінної напруги в постійне з підвищеним коефіцієнтом потужності

У цьому розділі представлені макети нових пристроїв перетворення змінної напруги в постійне з підвищеним коефіцієнтом потужності: коректор коефіцієнта потужності з диністором, пристрій регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням та пристрій регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельно з'єднаним навантаженням.

Показано порівняння експериментальних даних з результатами розрахунків з математичної моделі перерахованих вище пристроїв, представлених у розділі 2.

3.2 Експериментальне визначення коефіцієнта потужності перетворювача з ККП з диністором

Для проведення експериментальних досліджень розроблено та виготовлено макет перетворювача з ККП з диністором (рисунок 3.1) за схемою, представленою на рисунку 2.7.

Макет складається з діодного випрямляча, що складається з чотирьох діодів (VD_1 - VD_4) типу 1N4007, діода VD_5 1N4007, конденсатора С К50-35 зі значенням ємності 4,7 мкФ 400 В. Як диністора використовувалися диністори типу К1182КП1БП з напругою відкриття 23,5, 43, 50 і 65 В. Опір навантаження R_H складає 6,2 кОм.

Вибір такого опору навантаження обумовлений тим, що при живленні перетворювача від мережі змінної напруги 220 В потужність навантаження становить 12 Вт - типове значення світлодіодних джерел світла у форм-факторі ламп розжарювання.

Фотографія макета перетворювача з ККП з диністором представлена на рисунку 3.1.

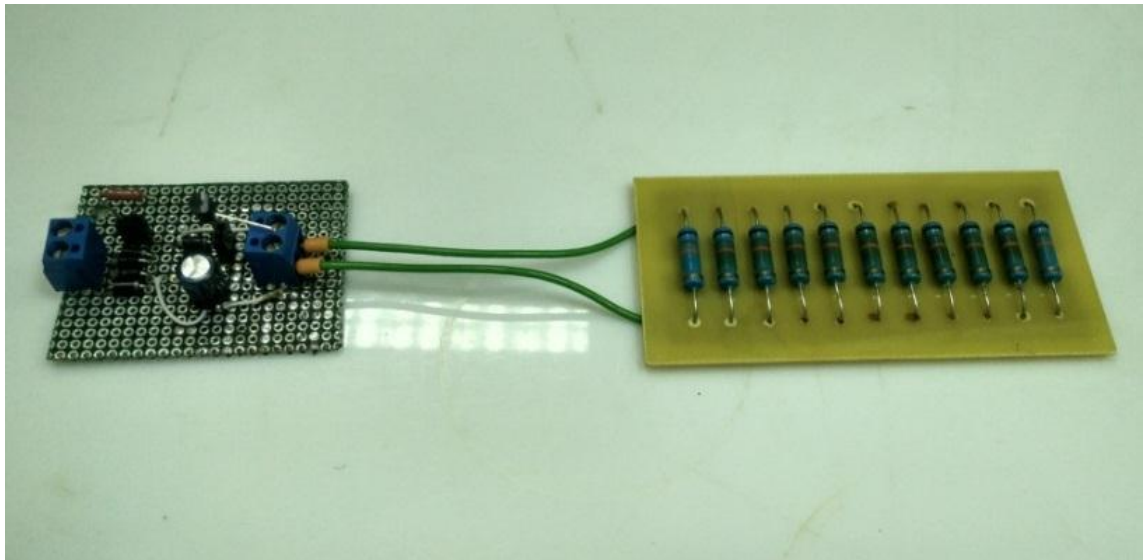


Рисунок 3.1 – Фото макета перетворювача з ККП із диністором

Для визначення форми струму, напруги та вимірювання коефіцієнта потужності використана вимірювальна установка, схема якої представлена на рисунку 3.2

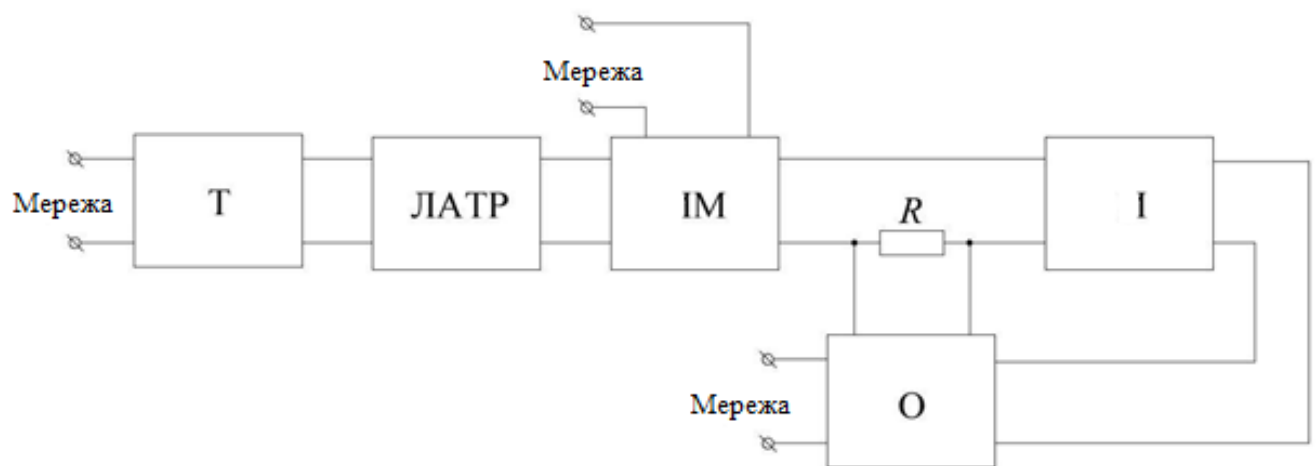


Рисунок 1 – Схема установки для визначення форми струму, напруги та вимірювання коефіцієнта потужності: Т – трансформатор, для гальванічної розв'язки мережі; ЛАТР – лабораторний автотрансформатор регульований; ІМ – вимірювач потужності; R - резистор 15 Ом $\pm 0,5\%$; О – осцилограф; І – вимірюваний пристрій

Вимірювання форми струму та напруги здійснювалися за допомогою осцилографа Fluke 190-062, що має відносну похибку $\pm 2,1\%$. Зображення екрана осцилографа та розрахункові форми струму та напруги наведені на рисунках нижче.

На рисунку 3.3 представлена розрахункова модель форми споживаного струму і напруги на навантаженні перетворювача напруги з ККП з динистором, що має напругу включення 23,5 В.

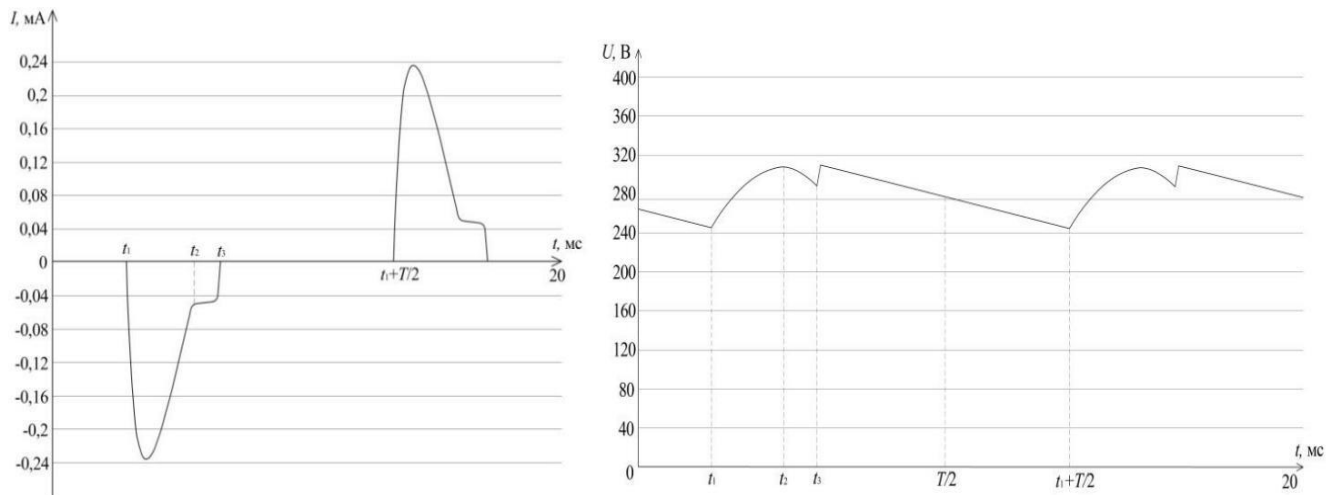


Рисунок 3.3 – Розрахункова форма споживаного струму та напруги на навантаженні перетворювача напруги з ККП з динистором, що має напруга включення 23,5 В

У результаті математичних розрахунків значення коефіцієнта потужності становило 0,674.

Вимірювання форми споживаного струму і вхідної напруги макета перетворювача напруги з ККП з динистором, що має напругу включення 23,5 представлені на рисунку 3.4.

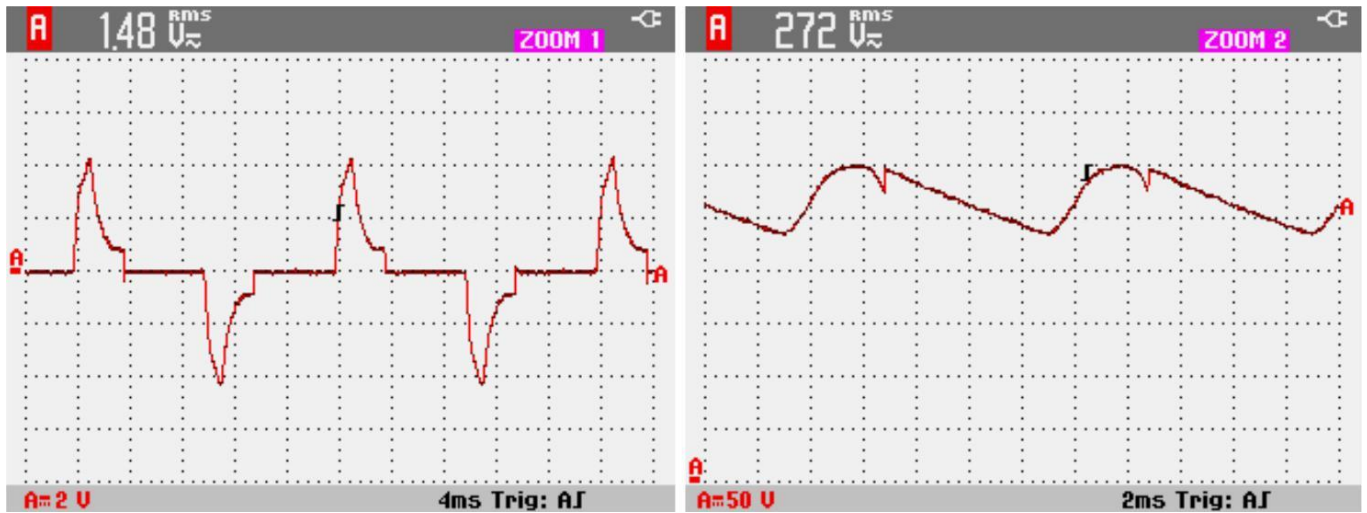


Рисунок 3.4 – Зображення екрану осцилографа з формою споживаного струму (ліворуч) та формою напруги на навантаженні (праворуч) перетворювача напруги з ККП з диністором, що має напругу включення 23,5 В

Експериментальний вимір коефіцієнта потужності становив 0,705. Різниця між розрахунковим та вимірним значенням коефіцієнта потужності складає 4,6%.

На рисунку 3.5 представлена розрахункова модель форми споживаного струму та напруги на навантаженні перетворювача напруги з ККП з диністором, що має напругу включення, що дорівнює 43 В.

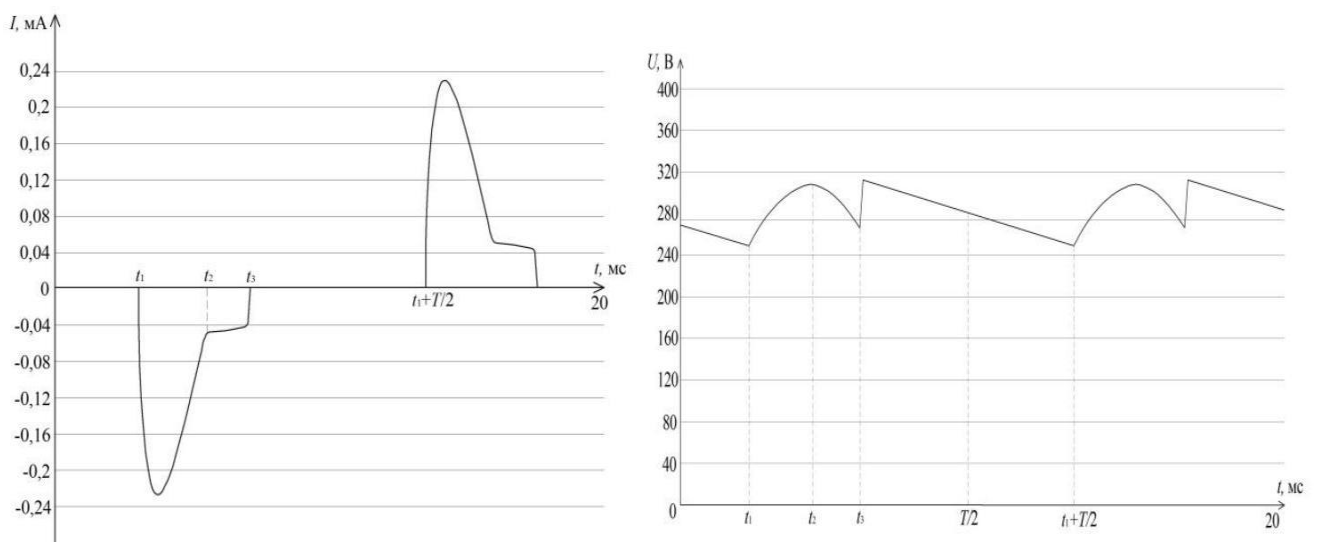


Рисунок 3.5 – Розрахункова форма споживаного струму та напруги на навантаженні перетворювача напруги з ККП з диністором, що має напругу включення 43 В

Розрахункове значення коефіцієнта потужності перетворювача напруги з ККП з динистором, що має напругу включення 43, склало 0,698.

Нижче на рисунку 3.6 зображені виміряні форми споживаного струму і напруги на навантаженні макета перетворювача напруги з ККП з динистором, що має напругу включення 43 В.

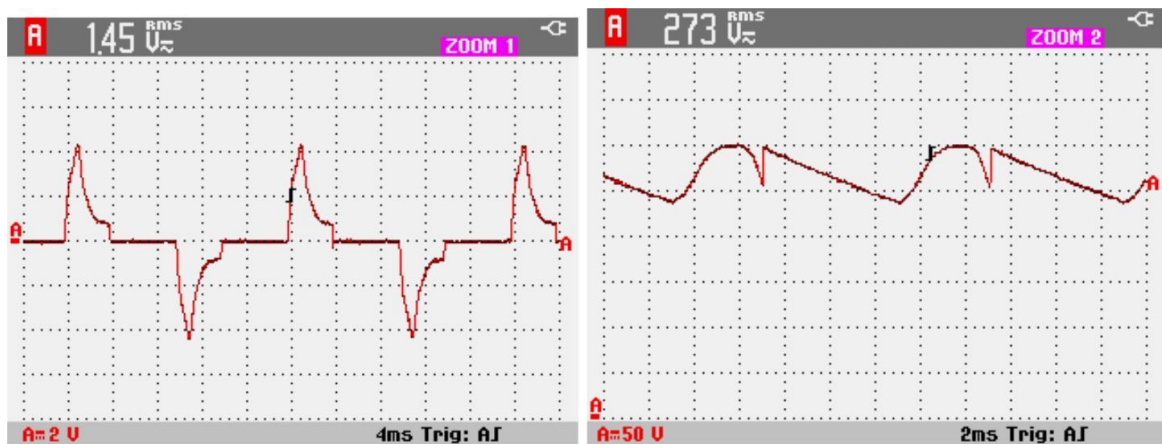


Рисунок 3.6 – Зображення екрана осцилографа з формою споживаного струму (ліворуч) та формою напруги на навантаженні (праворуч) перетворювача напруги з ККП з динистором, що має напругу включення 43 В

Експериментально виміряне значення коефіцієнта потужності становило 0,718. Різниця між розрахунковим та вимірним значенням коефіцієнта потужності становить 2,87 %. На рисунку 3.7 представлена розрахункова модель форми споживаного струму та напруги на навантаженні перетворювача напруги з ККП з динистором, що має напругу включення 50 В.

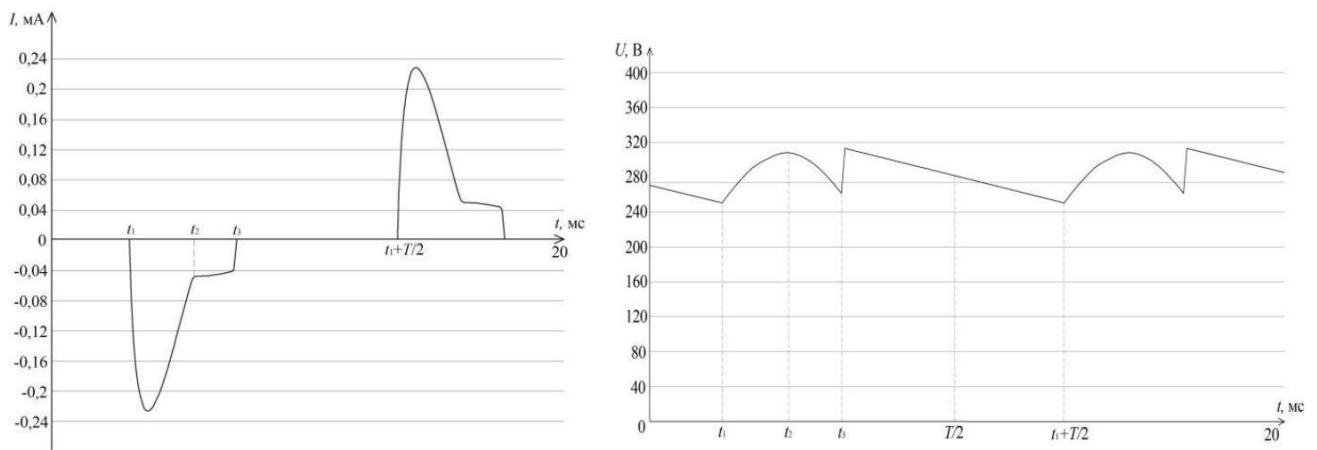


Рисунок 3.7 – Розрахункова форма споживаного струму та напруги на навантаженні перетворювача напруги з ККП з динистором, що має напруга включення 50 В

Розрахункове значення коефіцієнта потужності перетворювача напруги з ККП з динистором, що має напругу включення 50, склало 0,707.

На рисунку 3.8 представлені виміряні форми споживаного струму та напруги на навантаженні макета перетворювача напруги з ККП з динистором, що має напругу включення 50 В

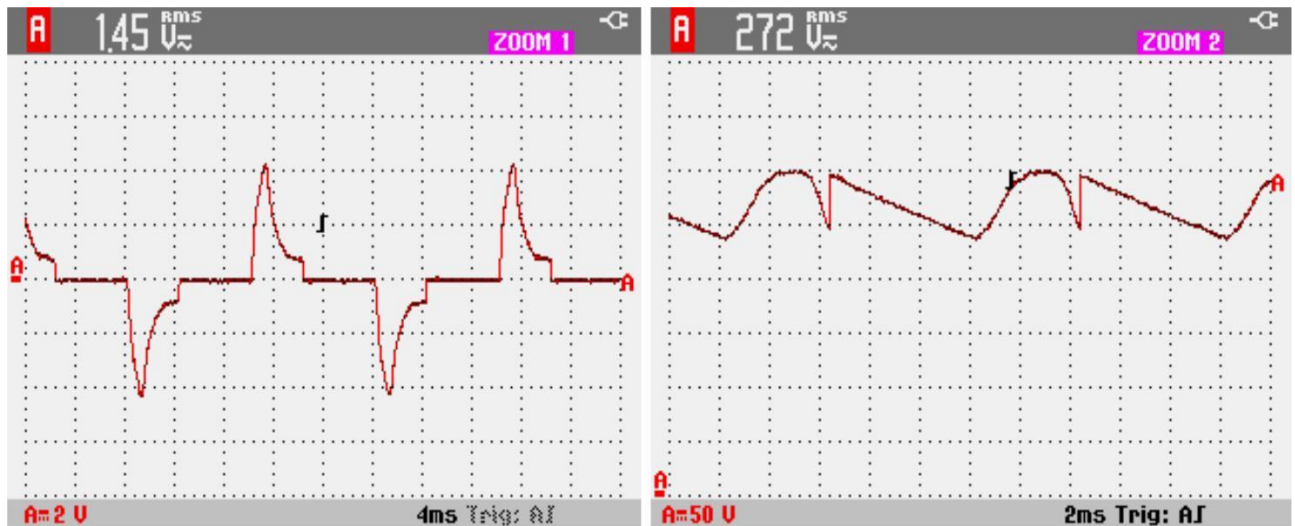


Рисунок 3.8 – Зображення екрана осцилографа з формою споживаного струму (ліворуч) та формою напруги на навантаженні (праворуч) перетворювача напруги з ККП з динистором, що має напругу включення 50 В

Експериментальний вимір коефіцієнта потужності становив 0,741. Різниця між розрахунковим та вимірним значенням коефіцієнта потужності складає 4,81%.

На рисунку 3.9 зображено розрахункову модель форми споживаного струму і напруги на навантаженні перетворювача напруги з ККП з динистором, що має напругу включення 65 В.

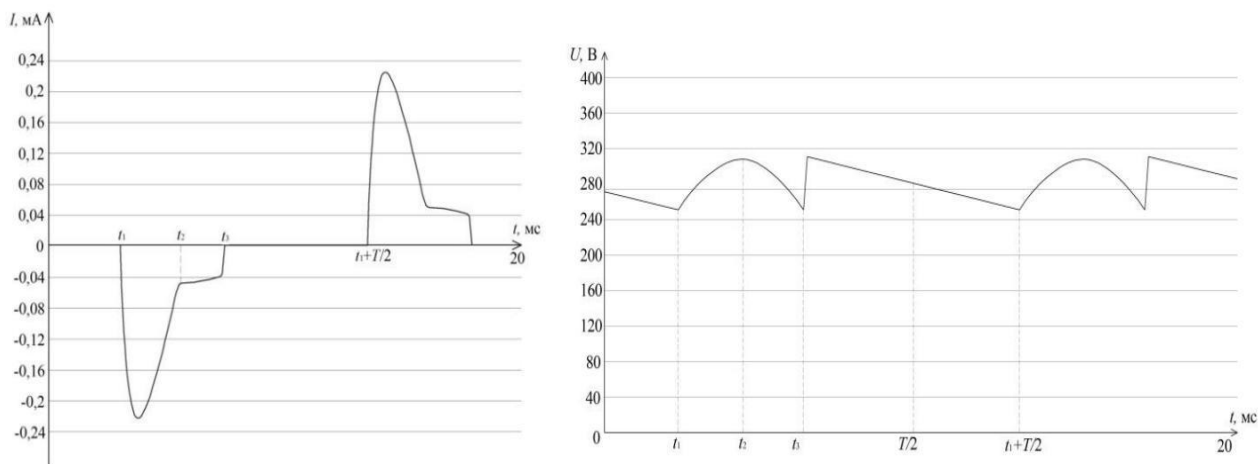


Рисунок 3.9 – Розрахункова форма споживаного струму та напруги на навантаженні перетворювача напруги з ККП з диністором, що має напруга включення 65 В

Розрахункове значення коефіцієнта потужності перетворювача напруги з ККП з диністором, що має напругу включення 65, склало 0,718.

На рисунку 3.10 представлені експериментально виміряні форми споживаного струму та напруги на навантаженні макета перетворювача напруги з ККП з диністором, що має напругу включення 65 В.

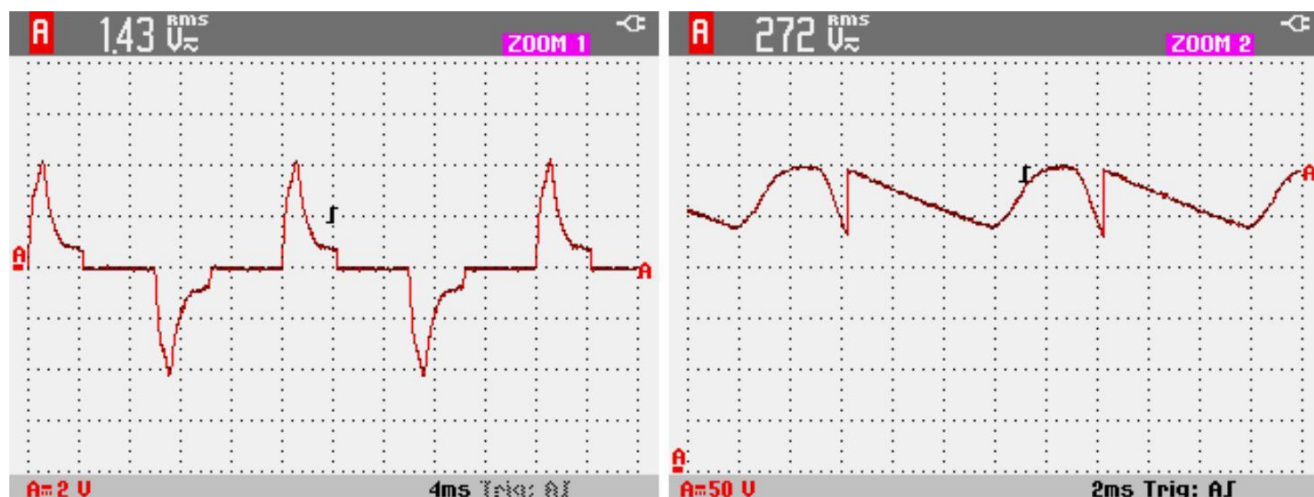


Рисунок 3.10 – Зображення екрана осцилографа з формою споживаного струму (ліворуч) та формою напруги на навантаженні (праворуч) перетворювача напруги з ККП з диністором, що має напругу включення 65 В

Експериментальний вимір коефіцієнта потужності становив 0,749. Різниця між розрахунковим та вимірним значенням коефіцієнта потужності складає 4,32%.

Вимірювання коефіцієнта потужності здійснювалися з допомогою вимірювача потужності GPM-8212-Gwinstek, що має відносну похибку $\pm 0,2\%$.

Отримані розрахункові та експериментально виміряні дані значення коефіцієнта потужності перетворювача напруги з ККП з диністором, що має напругу включення 23,5, 43, 50 і 65, зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Розрахункові та експериментально виміряні дані коефіцієнта потужності перетворювача напруги з ККП з диністором, що має напругу включення 23,5, 43, 50 і 65 Ст.

Напруга відкриття диністора, В	Коефіцієнт потужності, розрахункове значення	Коефіцієнт потужності, вимірне значення	Розбіжність, %
23,5	0,674	0,705	4,6
43	0,698	0,718	2,87
50	0,707	0,741	4,81
65	0,718	0,749	4,32

Таким чином, згідно з таблицею 3.1, розбіжність між розрахунковими та експериментально вимірними значеннями коефіцієнта потужності становить не більше 5 %, що підтверджує точність та універсальність запропонованої в розділі 2 математичної моделі. Встановлена зростаюча залежність значення коефіцієнта потужності в діапазоні від 0,7 до 0,75 від напруги відкриття диністора в діапазоні значень від 23,5 до 65 В.

3.3 Експериментальне визначення коефіцієнта потужності пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням

Для проведення експериментальних досліджень згідно з схемою електричної принципової (рисунок 3.11) розроблено та виготовлено макет пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням (рисунок 3.12).

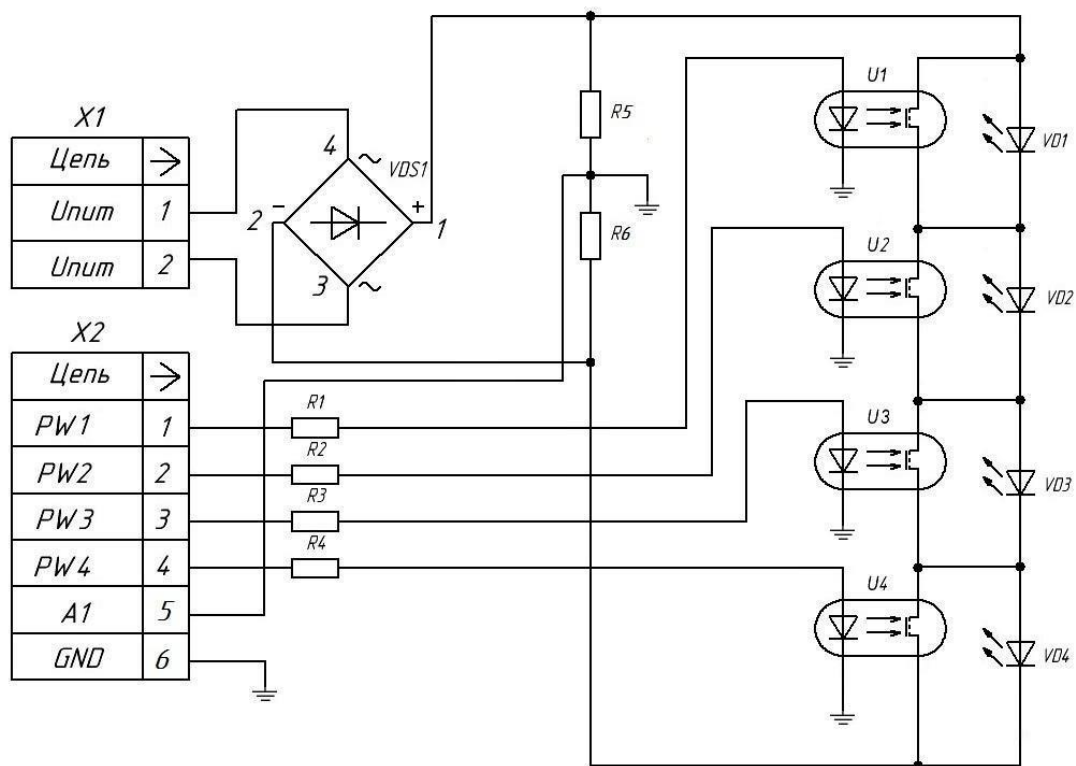


Рисунок 3.11 – Схема електрична принципова пристрої регулювання струму у світлодіодних джерелах світла із послідовно з'єднаним навантаженням

Макет (Рисунок 3.12) складається з діодного випрямляча VDS1, що складається з 4 діодів типу 1N4007, двох резисторів R₅ та R₆ номіналами 680±5% Ом та 150±5% Ом, чотирьох світлодіодів OSPW511P, мікроконтролера типу ATmega8. В якості ключів використовувалися чотири оптопари типу КР293КП1А. Для обмеження протікання струму через

світлодіоди використовувалися чотири резистори R_1 - R_4 номіналом $100 \pm 5\%$ Ом [79].

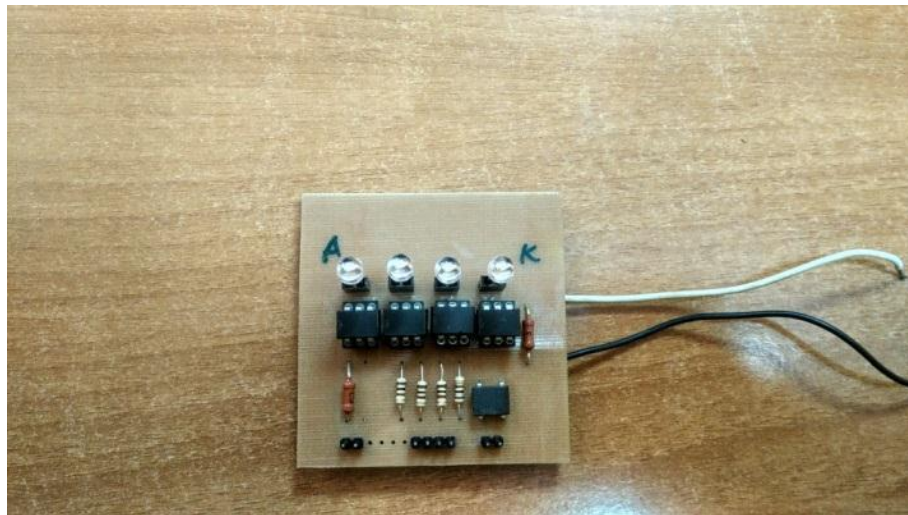


Рисунок 3.12 – Макет пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла із послідовно з'єднаним навантаженням

На рисунку 3.13 представлена розрахункова модель форми споживаного струму пристрою регулювання струму світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням.

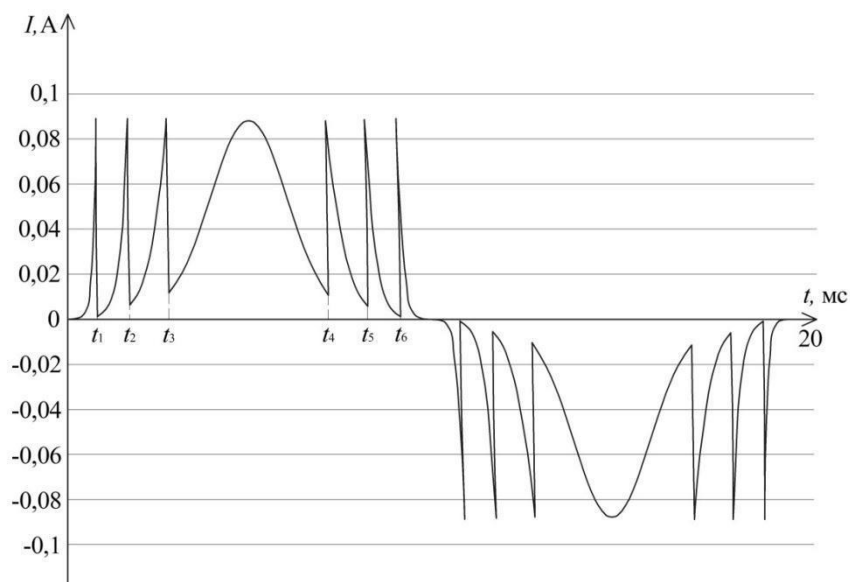


Рисунок 3.13 – Розрахункова форма споживаного струму пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла із послідовно з'єднаним навантаженням

Для визначення форми споживаного струму та вимірювання коефіцієнта потужності пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням була використана вимірювальна установка, представлена на рисунку 3.2.

Вимірювання форми струму та напруги здійснювалися за допомогою осцилографа Teledyne Lecroy WaveAce 2034, що має відносну похибку $\pm 2\%$.

На рисунку 3.14 представлена експериментально виміряна форма споживаного струму та вхідної напруги.

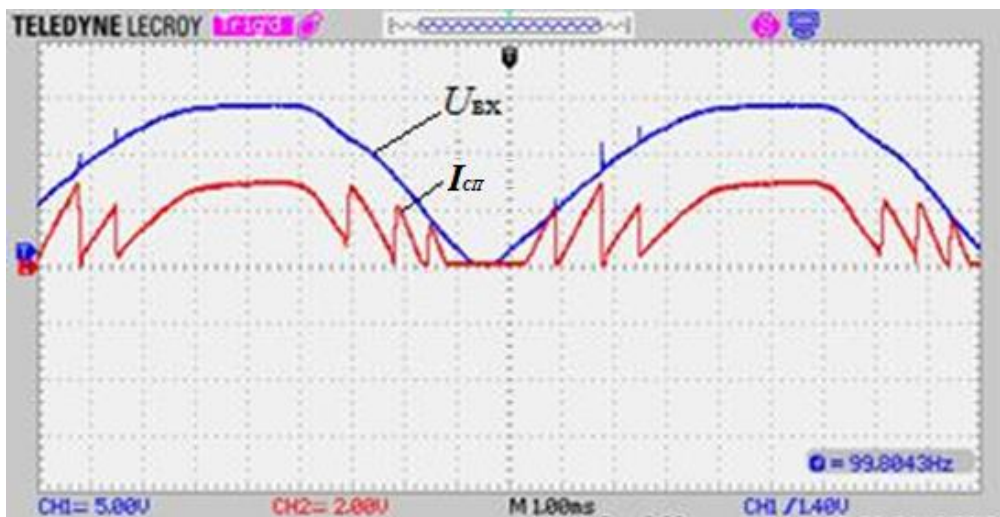


Рисунок 3.14 – Зображення екрана осцилографа з формою вхідної напруги $U_{вх}$ і з формою споживаного струму $I_{сп}$ пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла із послідовно з'єднаним навантаженням

Вимірювання коефіцієнта потужності здійснювалися за допомогою вимірювача потужності GPM-8212-Gwinstek. Експериментально виміряне значення коефіцієнта потужності макета дорівнює 0,96. Різниця між експериментальними та розрахунковими значеннями становить не більше 2,13%.

Таким чином, експериментально виміряні значення споживаного струму, напруги на навантаженні та коефіцієнта потужності підтверджують точність та універсальність запропонованої в розділі 2 математичної моделі.

Недоліком запропонованого пристрою є великий коефіцієнт пульсацій світлового потоку, який пояснюється тим, що кількість включених світлодіодів

(відповідно та світловий потік) змінюється в залежності від миттєвого значення напруги.

3.4 Експериментальне визначення коефіцієнта потужності пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельним з'єднанням навантаження

Для проведення експериментальних досліджень згідно з схемою електричної принципової (рисунок 3.15) розроблено та виготовлено макет пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельно з'єднаним навантаженням (рисунок 3.16).

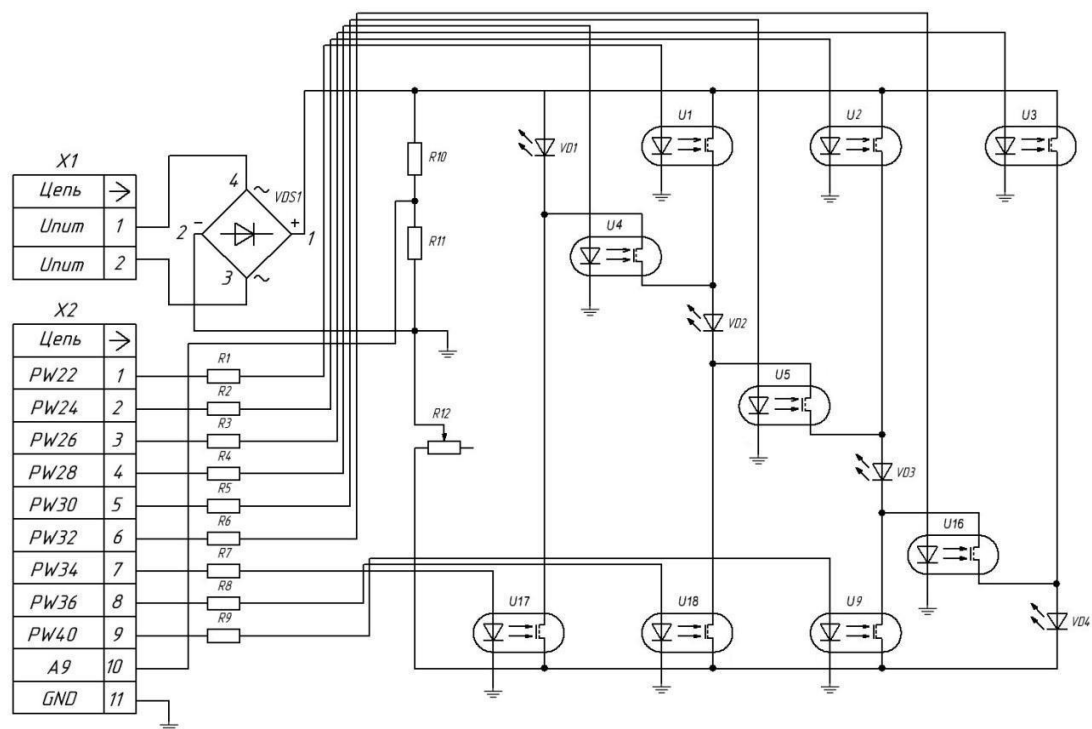


Рисунок 3.15 – Схема електрична принципова пристрої регулювання струму у світлодіодних джерелах світла із послідовно-паралельним з'єднанням навантаження

Макет (Рисунок 3.16) складається з діодного випрямляча VDS₁, що складається з 4 діодів типу 1N4007, трьох резисторів R₁₀, R₁₁ та R₁₂ номіналами 330±5% Ом, 680±5% Ом та 150±5% Ом відповідно, чотирьох світлодіодів OSPW5111P, мікроконтролера типу ATmega8. В якості ключів використовувалося дев'ять оптопар типу КР293КП1А. Для обмеження

протікання струму через світлодіоди використовувалось дев'ять резисторів R1-R9 номіналом $100 \pm 5\%$ Ом.

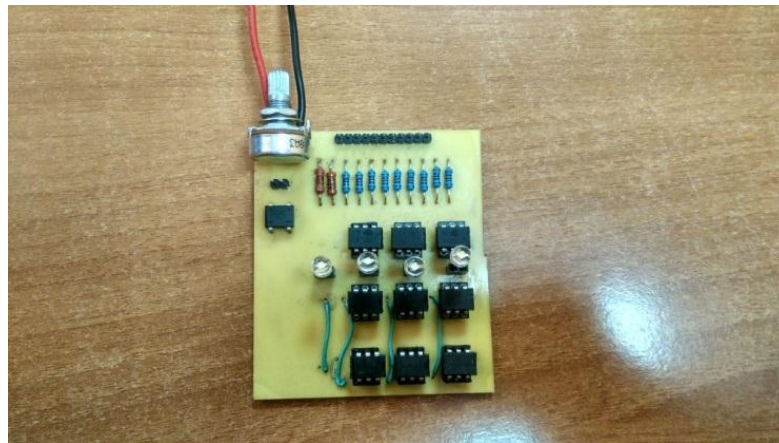


Рисунок 3.16 – Макет пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельним з'єднанням навантаження

Для визначення форми споживаного струму та вимірювання коефіцієнта потужності пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельно з'єднаним навантаженням була використана вимірювальна установка, представлена на рисунку 3.1.

Розрахункова форма споживаного струму пристрою регулювання струму світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельним з'єднанням навантаження представлена на рисунку 3.13. Вимірювання форми струму та напруги здійснювалися за допомогою осцилографа Teledyne Lecroy WaveAce 2034. На рисунку 3.17 представлена експериментально виміряна форма споживаного струму та вхідної напруги.

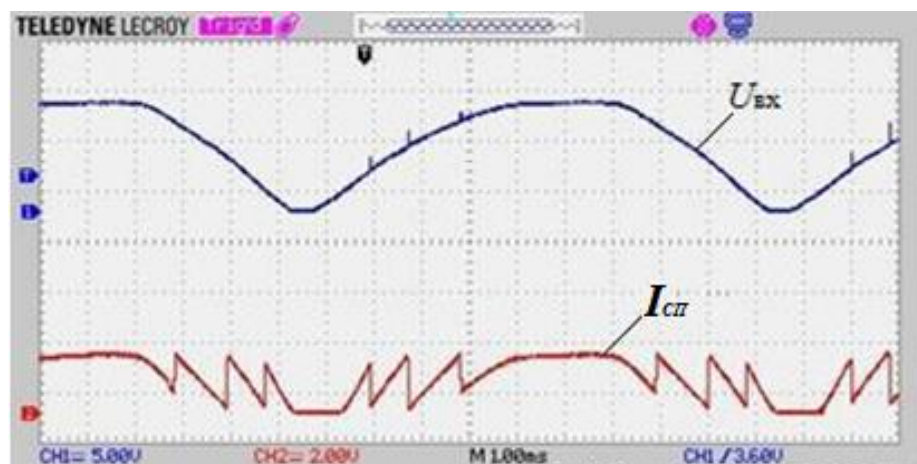


Рисунок 3.17 – Зображення екрана осцилографа з формою вхідної напруги $U_{вх}$ із формою споживаного струму $I_{сп}$ пристрою регулювання струму

у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельно з'єднаним навантаженням

Вимірювання коефіцієнта потужності здійснювалися за допомогою вимірювача потужності GPM-8212-Gwinstek. Експериментально виміряне значення коефіцієнта потужності макета дорівнює 0,978. Різниця між експериментальними та розрахунковими значеннями становить не більше 1,88 %.

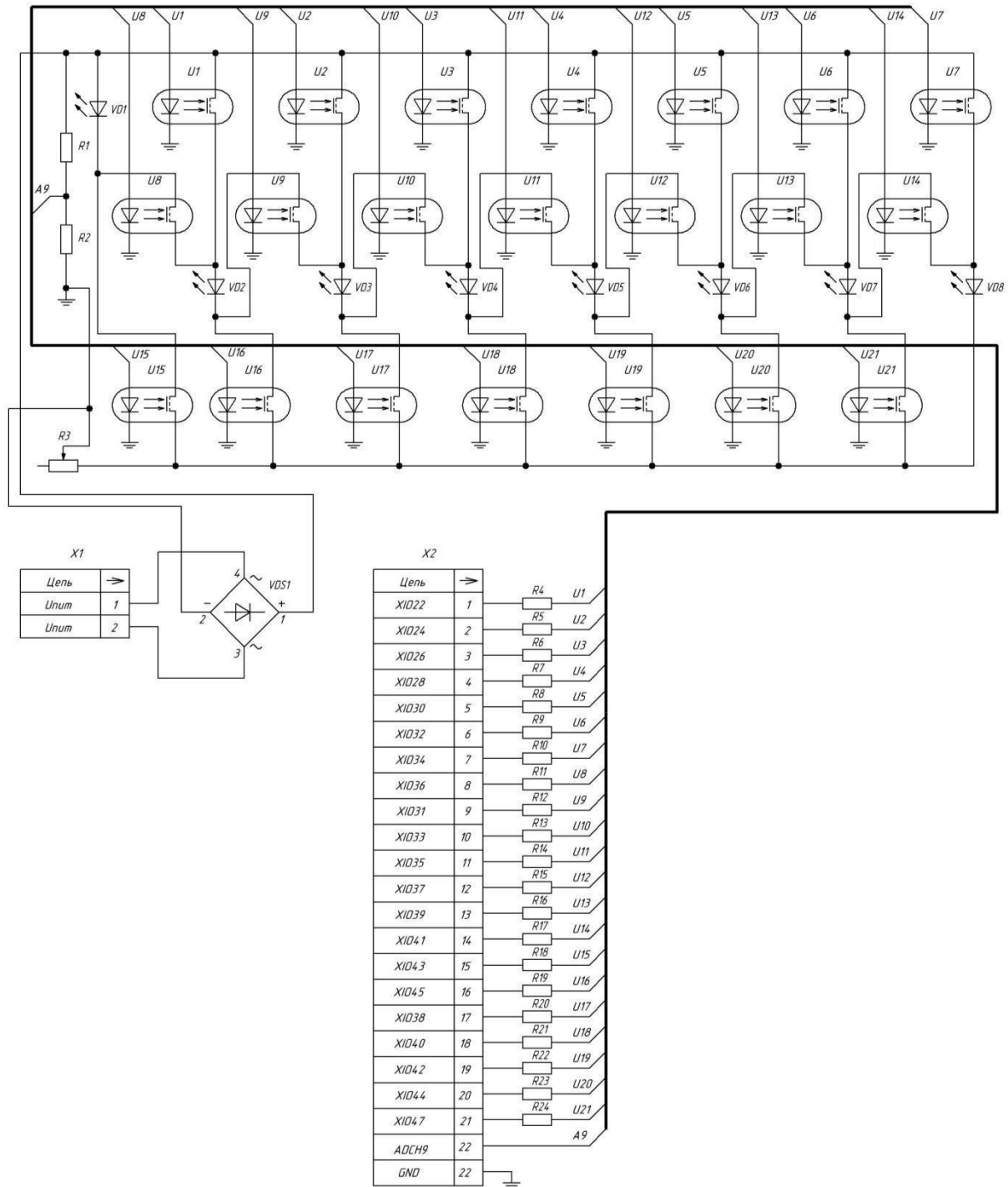


Рисунок 3.18 – Схема електрична принципова пристрої регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельним з'єднанням навантаження

Також додатково для підтвердження універсальності математичної моделі, представленої в розділі 2 згідно з схемою електричної принципової (рисунок 3.18) був розроблений та виготовлений ще один макет пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельно з'єднаним навантаженням (рисунок 3.19).

Макет (Рисунок 3.19) складається з діодного випрямляча VDS1, Що складається з 4 діодів типу 1N4007, трьох резисторів R10, R11 та R12 номіналами $330 \pm 5\%$ Ом, $680 \pm 5\%$ Ом та $150 \pm 5\%$ Ом відповідно, дев'яти світлодіодів OSPW5111P, мікроконтролера типу ATmega256. В якості ключів використовувалася 21 оптопара типу KP293KP1A. Для обмеження протікання струму через світлодіоди використовувався 21 резистор R24 номіналом $100 \pm 5\%$ Ом.

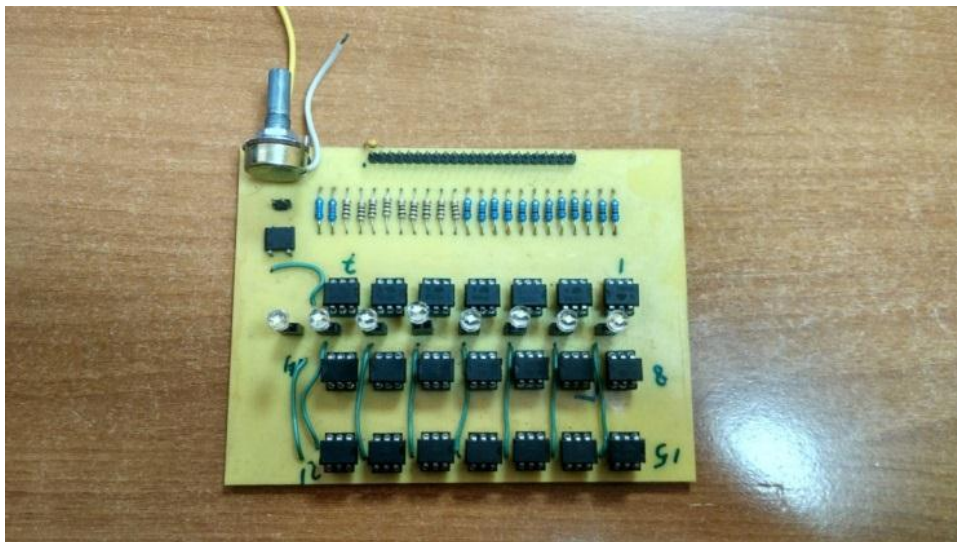


Рисунок 3.19 – Макет пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельним з'єднанням навантаження

На рисунку 3.20 представлена розрахункова модель форми споживаного струму пристрою регулювання струму світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням.

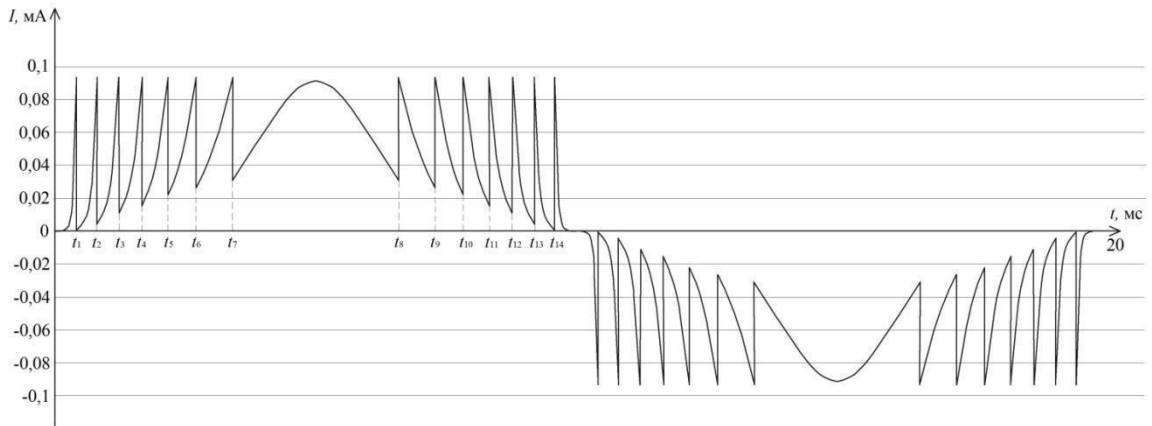


Рисунок 3.20 – Розрахункова форма споживаного струму пристрою регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням

Розрахункове значення коефіцієнта потужності становило 0,97. Вимірювання форми струму та напруги здійснювалися за допомогою осцилографа Teledyne Lecroy WaveAce 2034.

На рисунку 3.21 представлена експериментально виміряна форма споживаного струму та вхідної напруги.

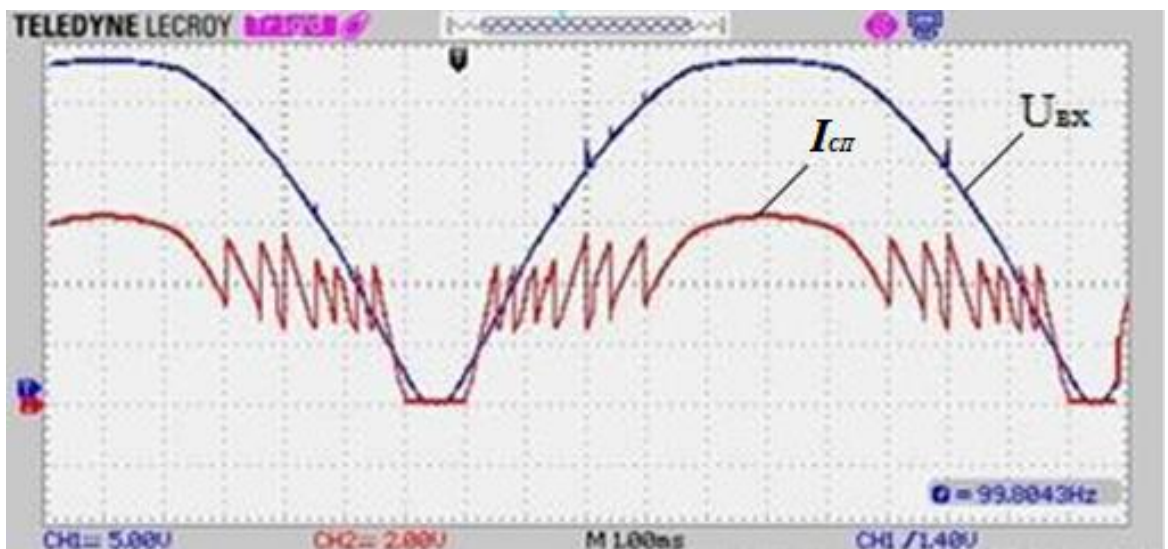


Рисунок 3.21 – Зображення екрана осцилографа з формою вхідної напруги U_{ex} з формою споживаного струму $I_{сп}$ пристрої регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно-паралельним з'єднанням навантаження

Вимірювання коефіцієнта потужності здійснювалися за допомогою вимірювача потужності GPM-8212-Gwinstek. Експериментально виміряне значення коефіцієнта потужності макета дорівнює 0,993. Різниця між експериментальними та розрахунковими значеннями становить не більше 2,37 %. Таким чином, експериментально виміряні значення споживаного струму, напруги на навантаженні та коефіцієнта потужності підтверджують точність та універсальність запропонованої в розділі 2 математичної моделі.

3.5 Висновки до розділу

Таким чином у цьому розділі наведено опис макетів нових пристроїв перетворення змінної напруги на постійне з підвищеним коефіцієнтом потужності. Проведено порівняння теоретичних розрахунків із експериментом.

Показано, що різниця становить не більше 5%, що ще раз свідчить про адекватність і точності запропонованої математичної моделі.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

4.1.1 Безпека при виготовленні друкованих плат

При розробці системи автоматичного повороту фотоелектричних модулів першим етапом виготовлення пристрою є витравлювання друкованих плат.

Сучасна технологія виготовлення друкованих плат складається з великої кількості різних механічних, фотохімічних і хімічних операцій.

При виконанні технологічних процесів виготовлення друкованих плат можуть виникнути наступні небезпеки і шкідливості: ураження електричним струмом, вибухо- і пожежонебезпека, термічний опіки, хімічний опік, небезпека травмування механічними пристроями, ураження шкірних покривів і отруєння, шум, вібрація, світловий вплив газорозрядних ламп.

Більшість матеріалів і речовин, що застосовуються при виготовленні друкованих плат, є небезпечними для здоров'я і життя людини. Шкідливі речовини та їх пари можуть проникати в організм людини через органи дихання, шкіру і травний тракт.

Вдихання хімічних речовин у будь-якому агрегатному стані (газ, пари, пил) призводить до ураження верхніх дихальних шляхів і до загальнотоксичного ефекту при всмоктуванні речовин в кров. У травний тракт шкідливі речовини потрапляють при вживанні води, їжі та курінні на ділянках виготовлення друкованих плат.

Нагрівання розчинів веде до інтенсивного паротворення і виділенню газів, що несуть з собою частинки розчину, а це призводить до збільшення забруднення атмосфери виробничих приміщень. Так, хлоровані вуглеводні (трихлоретилен, тетрахлоретан) при дії на них сонячного світла або відкритих джерел полум'я утворюють нову речовину – газ фосген (надзвичайно небезпечний), а при реагентному методі очищення відпрацьованих вод від сполук ціану може утворитися хлорціан. Попадання кислоти в лужний ціаністий електроліт, змішування кислих і ціаністих стоків або вентиляційних викидів може призвести до утворення ціаністого водню. Процеси знежирення,

травлення, електрохімічної обробки і хімічного фрезерування супроводжуються виділенням парів кислот і лугів і надходженням їх в зону дихання.

Багато шкідливих речовини потрапляють в організм через шкіру, особливо небезпечні хромові композиції, концентровані кислоти, луги та розчинники.

У відділеннях приготування електролітів завжди має місце висока концентрація пилу і парів токсичних речовин, особливо під час розтарування матеріалів, дозування, приготування розчинів, змішування сипучих компонентів і транспортних операцій.

При ціаністому мідненні і срібленні утворюється ціанистий водень, який надходить в атмосферу, в цих випадках відчувається запах мигдалю. Поява ціанідів у повітрі над ваннами – результат виносу дрібних крапельок електроліту бульбашками газів (водню і кисню), що виділяються на електродах при електролітичній дисоціації, а також випаровування розчинів. Ціанистий водень утворюється в результаті контакту ціанистого розчину з вуглекислою. У ванн оксидування виявляються пари лугу, у ванн декапірування – пари соляної кислоти, у ванн освітлення алюмінію азотною кислотою – оксиди азоту, у ванн кадміювання – оксиди кадмію; при нікелювання – ціанистий водень, при хромуванні – хромовий ангідрид, при очищенні свинцевих анодів – пил свинцю.

Однією з умов забезпечення безпеки праці є потоковість виробництва у відповідності з технологічною послідовністю окремих операцій, передбачаючи автоматизацію і механізацію процесів, а також централізація приготування електроліту. Пульти оператора автоматичних ліній з програмним керуванням повинні бути віддалені від ванн на певну відстань, що виключає вплив на працюючих небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

При неможливості автоматизації процесів повинна бути забезпечена комплексна механізація окремих операцій – підготовчих, транспортних, фінішних, зокрема, завантаження плат у ванни та їх вивантаження.

Особлива увага приділяється заміні токсичних речовин менш токсичними або нетоксичними, заміні шкідливих операцій менш шкідливими. Всі робочі місця обладнуються витяжною вентиляцією, а працюючі застосовувати засоби індивідуального захисту органів дихання, очей і шкірних покривів.

4.1.2. Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж

До обслуговування електрообладнання допускаються особи не молодше 18 років, які не мають медичних протипоказань, що заважають виконанню робіт, що отримали вступний і первинний інструктажі на робочому місці, виробниче навчання, перевірку знань.

Електромонтер повинен знати схему електропостачання об'єктів виробництва, повинен мати навички прийомів технічних методів обслуговування електроустановок. Він забезпечується усіма засобами індивідуального захисту та спецодягом. Інструменти і засоби захисту повинні бути випробувані, справні та використовуються за призначенням.

При експлуатації діючих електроустановок застосовують електрозахисті засоби та запобіжні пристосування. Ручне включення і відключення устаткування напругою понад 1000 В необхідно виконувати в діелектричних рукавичках, колошах або на килимку. Відключення виконують таким чином: відключають роз'єднувачі, знімають плавкі вставки запобіжників, від'єднують привод мережі. Після вивішування плаката перевіряють відсутність напруги на відключеній ділянці мережі. В оперативному журналі роблять запис про відключення. Включення проводять тільки після відмітки в журналі про закінчення робіт із зазначенням відповідальної особи.

Безпека виконання забезпечується також організаційними заходами. До них відноситься оформлення роботи нарядів, оформлення допуску до роботи, нагляд під час виконання роботи.

Наряд є письмовим дозволом на роботу в електроустановках, що визначає місце, час, початок і закінчення робіт; умови безпечного його проведення, склад бригади та осіб, відповідальних за безпеку. Без наряду по усному чи письмовому розпорядженню, але з обов'язковим записом в журналі можуть виконуватися такі роботи, як прибирання приміщень до огороження електрообладнання, чистка кожухів, доливка масла в підшипники, догляд за колекторами, контактними кільцями, щітками, заміна запобіжників. При роботі з електроустановками напругою до 1000 В без зняття напруги необхідно:

захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмовідні частини, що знаходяться під напругою, до яких можливий випадковий дотик; працювати в діелектричних калошах або стоячи на ізолюючій підставці, або на діелектричному килимі; застосовувати інструмент з ізолюючими рукоятками (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень), за відсутності такого інструменту користуватися діелектричними рукавичками.

При виконанні робіт без зняття напруги на струмовідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукоятки до обмежувального кільця; розташовувати ізолюючі частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмоведучими частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

При виявленні порушення лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними має бути негайно припинене.

Щозмінні огляди електрообладнання та мереж повинен проводити черговий електрик. При огляді слід звертати увагу на наступне: відсутність змін стану електрообладнання при його функціонуванні; ступінь корозії, фарбування труб, кріпильних елементів; справність введів проводів та кабелів в електроустановку; справність заземлюючих пристроїв; наявність попереджувальних плакатів та знаків маркування на вибухонебезпечному електрообладнанні; наявність всіх передбачених конструкцією болтів, що кріплять елементи оболонки (вони повинні бути добре затягнуті); потрапляння на електрообладнання бризок, крапель і пилу.

При виявленні ненормальної роботи силового трансформатора черговий електрик повинен вивести його з роботи з обов'язковим дотриманням усіх заходів особистої безпеки, використовуючи необхідні засоби індивідуального захисту. Таке відключення проводиться при: сильному нерівномірному шумі і потрiскуванні всередині трансформатора; ненормальному і постійно зростаючому нагріванні трансформатора при

номінальному навантаженні і роботі пристроїв охолодження; викид масла з розширювача або розриві діафрагми вихлопної труби; течі масла з пониженням його рівня нижче мінімально допустимого.

При цьому робиться запис в оперативному журналі і повідомляється відповідальному за електрогосподарство.

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів і правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів вимагають проводити регулярні огляди та ремонт електромереж, а також вимірювання опору та ізоляції.

4.2. БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.2.1. Проведення планування заходів цивільного захисту на підприємстві у випадку надзвичайних ситуацій

Екологічна обстановка у світі останніми роками погіршилась і вважається несприятливою. Засоби масової інформації майже щодня повідомляють про надзвичайні ситуації, що відбуваються у світі: лісові пожежі, повені, цунамі, землетруси, обвали, зсуви, селеві потоки, виверження вулканів, урагани, смерчі, снігові й пилові бурі та інші стихійні лиха, аварії і катастрофи на підприємствах і транспорті, що супроводжуються загибеллю людей, руйнуванням населених пунктів і об'єктів господарювання, у тому числі й у сільському господарстві, а часто забрудненням і зараженням довкілля.

Щорічно в нашій країні виникають надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру, що призводить до загибелі багатьох людей і значних матеріальних збитків.

Масштаби, характер руйнувань і кількість постраждалих людей залежать від типу, масштабу і місця аварії, катастрофи або стихійного лиха, від швидкості розвитку надзвичайної ситуації, особливостей регіону, об'єктів господарювання і населених пунктів, що опинилися в районі надзвичайної ситуації. Таку ситуацію можна порівнювати з воєнними діями. Для проведення рятувальних робіт потрібне залучення великої кількості людей і матеріальних

ресурсів, а несподіваний розвиток подій скорочує час на підготовку і проведення таких заходів.

Зниження масштабів людських втрат та матеріальних збитків, запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного і природного характеру, ліквідація їх наслідків є важливою загальнодержавною проблемою і одним з найважливіших завдань органів виконавчої влади, всіх органів керування цивільної оборони, керування всіх рівнів, спеціалістів і населення. Кардинальне вирішення проблем захисту населення і територій України від НС, зменшення їх соціально-економічних і екологічних наслідків можливе лише шляхом проведення цілого комплексу заходів.

У значній мірі досягнення цієї мети залежить від уміння керівників усіх рівнів (від об'єктового до урядового), спрогнозувати усі можливі наслідки НС, чітко спланувати заходи щодо їх запобігання та ліквідації, організувати керування під час їх виконання, високого стану готовності до дій у НС органів керування, сил і населення [Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 №5403-VI, ст. 130]. Виконання всіх умінь, завдань, перш за все, буде залежати від якості планування та повноти виконання запланованих заходів на об'єктовому рівні.

Суть планування заходів ЦЗ, на випадок НС полягає в аналізі стану ЦЗ;

- оцінка обстановки, яка може скластися при виникненні аварій, катастроф і стихійних лих та застосування противником сучасних засобів ураження;
- розробка заходів, спрямованих на захист населення та підвищення стійкості функціонування в мирний час та в особливий період;
- установлення послідовності, строків, способів здійснення намічених заходів і виконавців та визначенні необхідних ресурсів для їх проведення.

Головною метою планування заходів ЦЗ є створення умов для:

- організованого і своєчасного проведення заходів захисту робітників, службовців, їх сімей і населення, яке мешкає в зоні можливого ураження;
- забезпечення успішного проведення рятувальних і невідкладних робіт (РіНР) при ліквідації наслідків НС техногенного та природного характеру;
- участі в територіальній обороні та антитерористичній діяльності в особливий період.

Планування має бути також спрямоване на те, щоб запобігти або максимально знизити людські та матеріальні втрати, а також забезпечити життєдіяльність галузі, регіону підпорядкованих їм об'єктів і населення у разі виникнення вищезазначених ситуацій.

При плануванні заходів ЦЗ на особливий період повинно забезпечуватися взаємне узгодження і ув'язка їх із заходами мобілізаційного розгортання народного господарства та заходами, які проводять військове командування та органи керування ЦЗ.

Планування повинно бути реальним, цілеспрямованим, конкретним, точним, гнучким, перспективним, базуватися на глибоко продуманих рішеннях, обґрунтованих розрахунках та враховувати специфіку і особливості діяльності. Воно повинно здійснюватися завчасно та забезпечувати своєчасний ввід планів ЦЗ в дію, особливо під час раптового виникнення НС техногенного та природного характеру і в особливий період.

Документами для планування є укази Президента України, законодавчі акти ВРУ, постанови та розпорядження КМУ, «План реагування на НС державного рівня», витяги з рішення начальника ЦЗ області, району по організації та веденню ЦЗ на території області або району, витяг з «Плану організації евакозаходів та визначення місць розміщення евакуйованого населення».

На об'єктах господарювання повинні бути розроблені два плани, а саме:

- дій з попередження та ліквідування НС (на мирний час);
- цивільного захисту (на воєнний час).

Головна мета цих планів – максимальне зниження людських та матеріальних втрат у будь-яких умовах обстановки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

З проведених досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Розроблено математичну модель напівпровідникового перетворювача змінної напруги в постійне, що дозволяє визначати миттєві значення напруги на елементах схеми і струмів, що протікають через них, і розрахувати значення коефіцієнта потужності.

2. Представлений новий спосіб регулювання струму в світлодіодних джерелах світла, що полягає в синхронній з частотою мережі живлення комутацією одиночних світлодіодів, з кількістю одиночних світлодіодів у послідовних колах, пропорційним миттєвому значенню напруги мережі живлення, що дозволяє збільшити значення коефіцієнта потужності пристрою. Представлені пристрої мають підвищену надійність, оскільки в конструкції пристрою відсутні електролітичні конденсатори, які, як правило, визначають термін служби пристрою. Також додатковий позитивний ефект полягає в тому, що представлений пристрій має низький коефіцієнт пульсацій і може працювати при напрузі від 4 до n кількості вольт при змінній та постійній напрузі, що робить його універсальним у використанні.

3. Розроблено нову методику визначення напруги відкривання диністора, що визначає значення коефіцієнта потужності перетворювачів змінної напруги в постійну для світлодіодних ламп потужністю від 2 ватів і більше. Введення диністора (некерованого тиристора) у схему перетворювача змінної напруги в постійне дозволяє збільшити коефіцієнт потужності пристрою. Встановлено певну зростаючу залежність значення коефіцієнта потужності в діапазоні від 0,5 до 0,78 від напруги відкривання диністора в діапазоні значень від 23,5 до 65 В.

4. Розроблені макети перетворювача змінної напруги з фільтруючим конденсатором, перетворювача з діодно-ємнісним пасивним ККП, перетворювача з пасивним ККП із диністором, пристрої регулювання струму у світлодіодних джерелах світла з послідовно з'єднаним навантаженням і пристрої регулювання струму у світлодіодних.

Проведено порівняння теоретичних розрахунків розробленої математичної моделі з експериментом. Відмінність становить трохи більше 5%, що свідчить про адекватність математичної моделі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1] Chen Zhao, Xiaogao Xie, and Shirong Liu. Multioutput led drivers with precise passive current balancing. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(3):1438–1448, 2013.

[2] Андрійчук, В. А.; Філюк, Я. О. Акумуляючі пристрої для систем автономного живлення світлотехнічних установок. *Технічна електродинаміка*, 2017.

[3] Xinke Wu, Junming Zhang, and Zhaoming Qian. A simple two-channel led driver with automatic precise current sharing. *IEEE transactions on industrial electronics*, 58(10):4783–4788, 2011.

[4] Sungjin Choi and Taehoon Kim. Symmetric current-balancing circuit for led backlight with dimming. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(4):1698–1707, 2012.

[5] ANDRIYCHUK, V. A.; FILYUK, Y. O. Система автономного живлення зовнішнього освітлення. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 2017, 1: 17-22.

[6] Sungjin Choi and Taehoon Kim. Symmetric current-balancing circuit for led backlight with dimming. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(4):1698–1707, 2012.

[7] Junming Zhang, Lianghai Xu, Xinke Wu, and Zhaoming Qian. A precise passive current balancing method for multioutput led drivers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(8):2149–2159, 2011.

[8] Qingcong Hu and Regan Zane. Minimizing required energy storage in off-line led drivers based on series-input converter modules. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(10):2887–2895, 2011.

[9] Андрійчук В.А. Дослідження світлодіодних джерел світла у випадку імпульсного живлення / Андрійчук В.А., Наконечний М.С., Осадца Я.М., Філюк Я.О. // *Технічна електродинаміка*, 2021. – №1. – Стор. 68-72. <https://doi.org/10.15407/techned2021.01.068>.

[10] Kinetics of narrow-spectrum LED glow under pulsed power / Volodymir Andriichuk, Myroslav Nakonechnyi, Yaroslav Filiuk // Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics, 2023. — Vol 26, P. 230-235. DOI: <https://doi.org/10.15407/spqeo26.02.230>.

[11] Дослідження кінетики свічення світлодіодних джерел світла / Андрійчук, В. А., Наконечний, М. С., і Філюк, Я. О, Костик Л. М., Осадца, Я. М. // Вісник Хмельницького національного університету: 2023. — Том 1. — №5..

[12] SY Hui, Si Nan Li, Xue Hui Tao, Wu Chen, and WM Ng. A novel passive offline led driver with long lifetime. IEEE Transactions on Power Electronics, 25(10):2665–2672, 2010 .

[13] Douglas Camponogara, Guilherme F Ferreira, Alexandre Campos, Marco A Dalla Costa, and Jorge Garcia. Offline led driver for street lighting with an optimized cascade structure. IEEE Transactions on Industry Applications, 49(6):2437– 2443, 2013.

[14] Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., –156 с. Отримано з <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196>.

[15] Навчальний посібник «ТЕХНОЕКОЛОГІЯ ТА ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА. ЧАСТИНА «ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА»» / автор-укладач В.С. Стручок– Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с. Отримано з <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424>