

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіоелектроніки
Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра радіотехніки та телекомунікацій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему МЕТОД АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
УСТАНОВКИ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

Виконав: студент 2 курсу, групи РТ-219м
спеціальності _____

172 «Телекомунікації та радіотехніка»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація) _____

«Радіотехніка»

Калиніченко Денис Віталійович

(прізвище та ініціали)

Керівник Морщавка С.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

2020 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Інститут інформатики та радіoeлектроніки, ФРЕТ
 Кафедра Радіотехніка та телекомунікації
 Ступінь вищої освіти Магістр
 Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) «Радіотехніка»
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РТТ

к.т.н., доц Морщавка С.В. 

« 04 » грудня 2020 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Калиніченко Денис Віталійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Метод автоматичного регулювання параметрів установки індукційного нагріву

керівник проєкту (роботи) Морщавка Сергій Володимирович, к.т.н., доцент
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «06» листопада 2020 року № 315

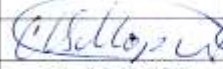
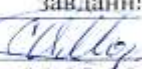
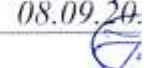
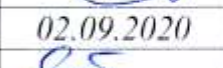
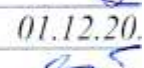
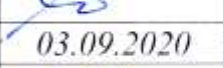
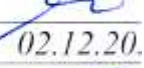
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 11 грудня 2020 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Дослідити сучасну схемотехнічну базу установок індукційного нагріву. Розробити метод керування генератора змінної напруги для пристрою індукційного нагріву металів, протестувати запропонований метод за допомогою моделі Simulink у основних режимах роботи та порівняти його з існуючими алгоритмами на відмово стійкість. Також, за можливості підтвердити результати симуляції під час натурного експерименту

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Розгляд сучасних схем технічних рішень установок індукційного нагріву та особливості їх використання. Спрощення моделі установки індукційного нагріву, використання моделі у цифровому методі управління. Моделювання роботи установки з модернізованою схемою управління та результати тестування експериментальної установки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Презентація роботи в Microsoft PowerPoint з поясненням особливостей сучасної схемотехніки, спрощенням моделі установки індукційного нагріву, алгоритму роботи установки, що пропонується, скріншотами симуляції вищевказаної моделі та фотознімками тестування експериментальної установки

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконані завдання:
1-3	Морщавка С.В., доцент	 01.09.2020	 08.09.20.
4	Левченко Н.М., професор	 02.09.2020	 01.12.20.
5	Якімцов Ю.В., доцент	 03.09.2020	 02.12.20.
нормоконтроль	Мороз Г.В., ст.викладач	 15.12.20.	 15.12.20.

7. Дата видачі завдання « 01 » вересня 2020 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Приміт
1	Розгляд основних схем технічних особливостей конструювання установки індукційного нагріву	2-й тиждень	Викона
2	Спрощення моделі установки індукційного нагріву	5-й тиждень	Викона
3	Розробка покращеної системи управління напругою енергії в установку індукційного нагріву	7-й тиждень	Викона
4	Створення моделі для комп'ютерної симуляції	8-й тиждень	Викона
5	Симуляція моделі та отримання результатів	9-й тиждень	Викона
6	Впровадження нової системи управління в експериментальну установку	11-й тиждень	Викона
7	Робота над економічною частиною	12-й тиждень	Викона
8	Розробка рекомендацій з охорони праці	13-й тиждень	Викона
9	Оформлення пояснювальної записки та презентації	14-й тиждень	Викона
10	Проходження нормконтролю, рецензування, антиплагиату, оформлення дублінського ядра	15-й тиждень	Викона

Студент(ка)

Керівник проєкту (роботи)


(підпис)

Калиніченко Д.В.

(прізвище та ініціали)


(підпис)

Морщавка С.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 88 сторінок, 40 рисунків, 7 таблиць, 29 джерел, 2 додатки

Об'єкт дослідження – схема управління параметрами накачки установки індукційного нагріву.

Метод дослідження – методи комп'ютерного моделювання та експериментальні дослідження.

Основні результати. Розглянуті схемотехнічні рішення сучасних установок індукційного нагріву малої та середньої потужності з використанням напівпровідникових технологій, їх особливості та обмеження у використанні. Була спроектована та змодельована модернізована схема управління параметрами установки індукційного нагріву, яка дозволяє збільшити відмовостійкість даної установки в аварійних ситуаціях та забезпечує її використання в змінних та заздалегідь не узгоджених умовах. Наводяться результати експерименту та симуляцій, що підтверджують доцільність використання даної схеми управління. Виконаний попередній розрахунок економічного ефекту від впровадження розглянутої розробки.

ФАЗОВЕ АВТОПІДЛАШТУВАННЯ ЧАСТОТИ, УСТАНОВКА ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ, МІКРОПРОЦЕСОРНІ ЗАСОБИ, ЦИФРОВИЙ МЕТОД УПРАВЛІННЯ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 СУЧАСНІ СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ УІН ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ	9
1.1 Фізичні основи індукційного нагріву та топології генераторів струму	9
1.2 Методи управління процесом індукційного нагріву	16
1.3 Датчики зняття параметрів установки індукційного нагріву	21
2 СПРОЩЕННЯ МОДЕЛІ УІН ТА ВИКОРИСТАННЯ ПХ РЕЗЕРВУАРНОГО КОНТУРУ У ЦИФРОВОМУ МЕТОДІ УПРАВЛІННЯ УІН.....	25
2.1 Спрощення моделі УІН.....	25
2.1.1 Спрощення моделі генератора змінного струму	25
2.1.2 Спрощення моделі «КК-індуктор-зразок»	30
2.2 Побудова передавальної характеристики коливального контуру УІН	32
2.3 Побудова схеми управління УІН.....	36
2.4 Модернізація ФАПЧ з регулюванням амплітудного значення напруги на КК.....	39
3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ УІН З МОДЕРНІЗОВАНОЮ СХЕМОЮ УПРАВЛІННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ	44
3.1 Використання комп'ютерної моделі для аналізу роботи запропонованого алгоритму	44
3.1.1 Опис моделі	44
3.1.2 Результати моделювання.....	49
3.2 Опис експериментальної установки та результати її тестування	53
4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ	58
4.1 Аналіз ринку на наявність можливих споживачів результату дослідження	58
4.2 Розрахунок витрат на дослідження	60

4.3 Оцінка економічного ефекту від впровадження результатів дослідження	62
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	66
5.1 Аналіз потенційних небезпек.....	66
5.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки.....	67
5.3 Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці.....	69
5.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	74
5.4.1 Заходи з пожежної безпеки.....	74
5.4.2 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	75
ВИСНОВКИ.....	78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	79
ДОДАТОК А.....	82
ДОДАТОК Б	84

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЧХ	–	амплітудно-частотна характеристика
ГДК	–	гранично допустима концентрація
ГУН	–	генератор, що управляється напругою
ЕОМ	–	електронно-обчислювальна машина
ЕРЕ	–	електрорадіоеlement
ЕРС	–	електрорушійна сила
ЗІЗ	–	засоби індивідуального захисту
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
КК	–	коливальний контур
НС	–	надзвичайна ситуація
ПДВ	–	податок на додану вартість
ПНФ	–	перетворювач «напруга-фаза»
ПХ	–	передавальна характеристика
УІН	–	установка індукційного нагріву
ФАПЧ	–	фазове автопідлаштування частоти
ФКІ	–	формував керуючих імпульсів
ФЧХ	–	фазо-частотна характеристика
DSP	–	Digital Signal Processor – цифровий сигнальний процесор
PDM	–	Pulse Density Modulation – густинно-імпульсна модуляція
PSFB	–	Phase-Shifted Full-Bridge – фазо-зсунутий мостовий перетворювач
ZCS	–	Zero Current Switching – перемикання у нулі струму
ZVS	–	Zero Voltage Switching – перемикання у нулі напруги

ВСТУП

Установки індукційного нагріву (УІН) з моменту їх появи у виробництві довгий час були характерними лише для важкої промисловості. Але зараз, з розвитком силової електроніки, вони можуть використовуватись на малих виробництвах, пов'язаних з розплавом, загартуванням металів та сплавів. Сюди відносяться: ювелірна справа, медицина (виготовлення металевих протезів), моделювання (авіа-, судномоделювання тощо). Внаслідок цього постає питання здешевлення виробництва даного пристрою та, разом з цим, забезпечення високої надійності роботи, навіть коли УІН використовує людина, що не має фаху з металургійної справи. Саме тому ця робота ставить за мету подолання даних проблем, а також можливість збільшити відмовостійкість вже існуючих промислових установок індукційного нагріву. Однією з таких умов є дотримання роботи конденсаторів, що використовуються в схемах коливального контуру, в їх робочому діапазоні напруг.

В даній роботі наводяться існуючі методи управління УІН, схемотехнічні рішення та їх недоліки. Тому пропонується розглянути додавання до існуючої схеми управління ФАПЧ УІН контур зсуву фази сигналу на основі амплітудної напруги на коливальному контурі з індуктором. Вирішення щодо кількісного значення даного зсуву виконується на основі розрахованої передавальної характеристики КК. Для дослідження ефекту даної розробки проводитимуться порівняння існуючої та запропонованої схеми на основі комп'ютерної моделі УІН та експериментальної установки в різних режимах роботи.

1 СУЧАСНІ СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ УІН ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

1.1 Фізичні основи індукційного нагріву та топології генераторів струму

Індукційний нагрів – процес нагріву тіл з високою електропровідністю за допомогою наведення струмів зовнішнім змінним магнітним полем. Даний метод нагріву використовує явище електромагнітної індукції:

$$E = \frac{d\Phi}{dt},$$

де Φ – потік магнітного поля, Вб:

$$\Phi = \int B \cdot dS;$$

B – магнітна індукція, Тл;

S – площа, через яку проходить магнітне поле, m^2 ;

E – електрорушійна сила (ЕРС), що наводиться під дією магнітного поля.

Згідно з цим законом, при наявності в змінному магнітному полі провідників або тіл з високою електропровідністю на них наводиться ЕРС, яке, у свою чергу, створює струми в них (при наявності замкнутих контурів) та викликають омичні втрати енергії в цих провідниках (тілах).

Для ефективного використання індукційного нагріву необхідна велика амплітуда змінного магнітного потоку. Це потрібно для індукування струму потрібної величини для створення значних омичних втрат наслідком якого є значний нагрів тіла. З цих міркувань джерела таких магнітних полів роблять за допомогою індукторів (елемент індуктивності, який використовується для індукційного нагріву) через які проводять змінний струм великої амплітуди.

Вигляд, форма, кількість витків індуктора; амплітуда та частота коливань струму є параметрами, які підлаштовують під цілі індукційного нагріву, зокрема [1]:

- плавлення в тиглях;
- пластичне деформування металів у процесах металопрокату, ковальській справі;
- загартовування металів, сплавів;
- пайка, наплавка, інші види технологічної термообробки тощо.

В залежності від мети та потужності УІН використовують різноманітні джерела змінного струму, які можна розділити на:

- системи електро-механічного перетворення енергії та частоти електромагнітних коливань: наприклад, «двигун-генератор» [2] (рис. 1.1), у якому проходить перетворення частоти змінного струму, та інші генератори, що створюють безпосередньо надвеликий змінний струм;
- системи, що використовують коливальних контурів у якості резервуарних (tank circuit).

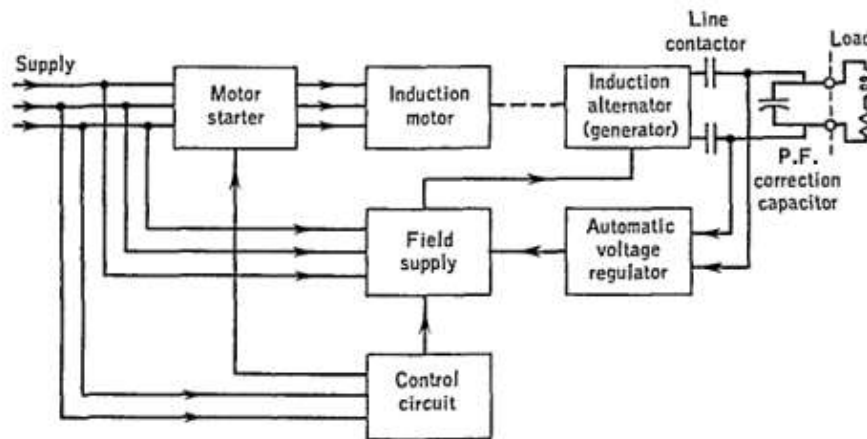


Рисунок 1.1 – Принципова схема УІН типу «мотор-генератор»

Останній тип є найбільш перспективним на цей час, оскільки вони дозволяють зменшити вартість та розміри установки. Це досягається шляхом

регулювання набагато меншої амплітуди струму, ніж той, який протікає безпосередньо в індукторі.

УІН, що застосовують коливальні контури, що використовують LC-резервуари, які, в свою чергу здатні підсилювати струм при збудженні даного контуру змінним струмом на частоті, близькій до власної частоти цього контуру. Цей режим називають резонансом. Це дає можливість застосувати в УІН джерело змінного струму з набагато меншою амплітудою зі збереженням необхідної умови роботи індукційного нагріву, а саме великого значення струму.

Таким чином, УІН, що використовують КК, мають наступні особливості:

- процес ефективної передачі енергії в деталь, що обробляється, пов'язаний з використанням реактивного навантаження, яким є індуктор. При використанні резервуарного контуру та його збудженні на резонансній частоті всієї системи генератор починає працювати на чисто активне навантаження. Дане рішення дозволяє зменшити втрати енергії на провідниках і зменшити розміри установки;

- більш гнучке регулювання частоти змінного струму, яке не потребує перебудови всієї установки, а лише LC-контуру;

- зменшення розмірів самої установки внаслідок відсутності необхідності використання елементів, здатних проводити значні величини струму;

- використання в якості елемента індуктивності КК власне індуктора УІН дозволяє зменшити вартість пристрою.

Однак, у цього типу УІН є обмеження:

- КК складається з індуктивності та ємності, а тому необхідною умовою роботи даної топології є підбір конденсаторів, що здатні витримувати надвеликі реактивні потужності на високих частотах;

- конденсатори обмежують амплітудне значення струму внаслідок наявності в них параметру робочої та максимально допустимої напруги.

Ці обмеження є тим фактором, що робить УІН специфічним продуктом радіотехнічної промисловості, що вимагає унікальних інженерних рішень. У якості прикладу можна навести конденсатори з водяним охолодженням (рис. 1.2) [3], які можуть пропускати через себе синусоїдальний струм із середньоквадратичним значенням до 2,4 кА, але, як і було зазначено вище, значення робочої напруги обмежується до 1 кВ. Очевидно, що такі специфічні характеристики та конструкції конденсаторів разом з використанням нових типів діелектриків, є причиною їх значної вартості. При цьому конденсатори такого типу є найрозповсюдженими у промислових УІН.



Рисунок 1.2 – Конденсатор на водяному охолодженні моделі
CSP1000 виробництва CELEM

Вартість конденсаторів для застосування в УІН залежить від необхідної робочої частоти індуктора: чим вище ємність і нижче частота – тим вище ціна. Тому, для зменшення вартості установок, ще одним аспектом схемотехніки є створення джерел змінної напруги, що здатні генерувати коливання високої частоти.

На сьогодні спостерігаються тенденції щодо використання двотактних напівпровідникових перетворювачів топологій «half-bridge», «full-bridge» (рис. 1.3), «push-pull» (рис. 1.4) та їх варіацій у якості генераторів змінної напруги, які є джерелом накачування енергії в резервуарний контур. Ці топології, у поєднанні з сучасними електронними перемикачами (MOSFET,

IGBT), дозволяють отримати збуджуюче коливання на власній частоті LC-контуру, яке може досягати одиниць МГц.

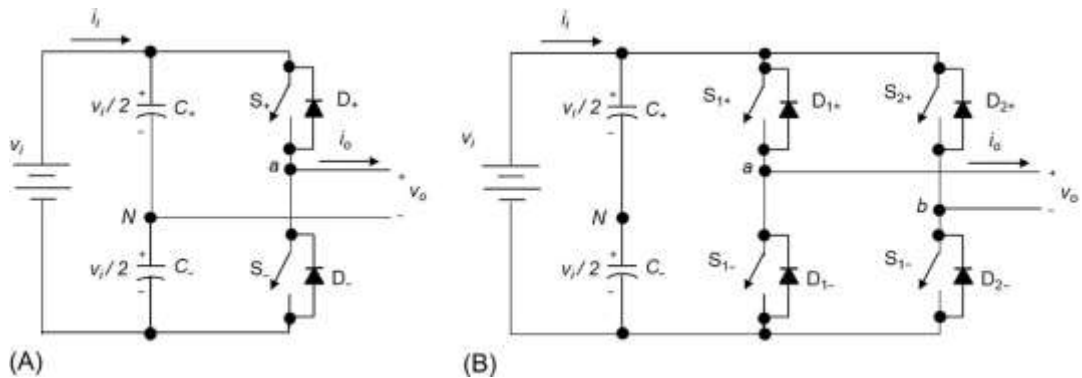


Рисунок 1.3 – Перетворювачі постійної напруги у змінну напругу топологій «half-bridge» (A) та «full-bridge» (B) [4, с.291]

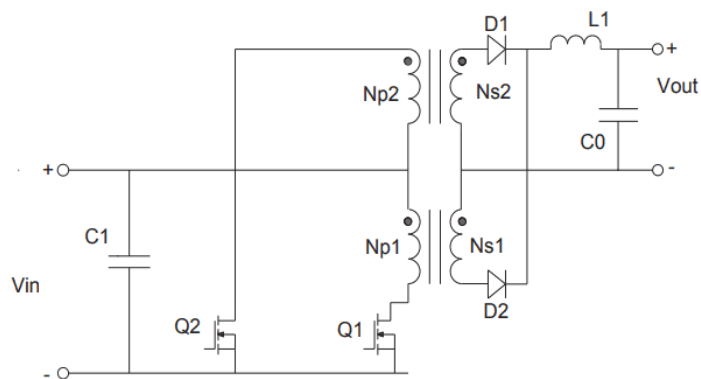


Рисунок 1.4 – Перетворювач постійної напруги у змінну напругу топології «push-pull» [5]

Взагалі, використання будь-якої схеми генератора змінної напруги на базі напівпровідникових елементів потребує додаткових зусиль зі зменшення втрат: комутаційних та провідних. До провідних відносять втрати на проходження струму через відкритий електронний перемикач, до комутаційних – втрати при перемиканні за ненульовий час, що визначається розрядкою-зарядкою вихідної паразитної ємності перемикача та

короткочасній роботі в лінійному режимі, що супроводжується значними струмами та падіннями напруги на перемикачі. Саме комутаційний тип втрат стає переважаючим при збільшенні робочої частоти перетворювача, що стає необхідним при використанні останнього в УІН. Тому, всі методи зменшення комутаційних втрат можна умовно поділити на дві частини:

а) методи, пов'язані власне з виробництвом силових напівпровідникових елементів: використання нових матеріалів та створення більш ефективних топологій, які збільшують швидкодію без зменшення комутуваної потужності. На сьогодні розробляються та випускаються транзистори та діоди з GaN, SiC, тощо [4, с.95-155], що здатні працювати з меншими втратами на частотах ~ 1 МГц. Паралельно з цим створюються швидкісні драйвери транзисторів для зменшення часу комутації електронних перемикачів;

б) методи, що пов'язані з використанням так званого «м'якого перемикання». При звичайному «жорсткому перемиканні» транзистор відкривається та закривається під час проходження через нього великого струму та/або спостерігання на ньому великої напруги, що і є джерелом великих комутаційних втрат при проходженні транзистора через лінійний режим роботи:

$$P_{\text{лин}} = \frac{I \cdot V}{2} (t_{\text{on}} + t_{\text{off}}) f, \quad (1.1)$$

де I – струм, що проходить через транзистор у відкритому стані в момент комутації;

V – напруга, що спостерігається на стоку-витоку (колекторі-емітері) польового(біполярного) транзистора в момент комутації;

$t_{\text{on}}, t_{\text{off}}$ – часи ввімкнення та вимикання транзистора відповідно;

f – робоча частота перетворювача.

«М'яке перемикання», у свою чергу, використовує коливальні LC-контури, як паразитні, так і вбудовані [4, с.339-349]. Коливання

напруги/струму зі зсувом фази між ними, які спостерігатимуться при цьому, дозволяють обрати момент перемикання транзистора, коли через нього буде протікати малий або нульовий струм (ZCS – Zero Current Switching, перемикання при нульовому струмі) або на транзисторі не буде спостерігатися значна напруга (ZVS – Zero Voltage Switching, перемикання при нульовій напрузі). Відповідно до (1.1), комутаційні втрати стають мінімальними.

Застосування останнього методу значно спрощується при його використанні в УІН: наявність коливального контуру та роботи перетворювача на частоті, вищій за резонансну, тобто роботі перетворювача на індуктивне навантаження, дозволяє досягти ZVS-режим роботи перемикачів. Це робить можливим збільшити як частоту роботи перетворювача, а отже і УІН у цілому, так і збільшити потужність без зменшення ККД.

Двотактні перетворювачі у якості генератора змінної напруги для УІН потребують додаткових вузлів. Зокрема, під'єднання коливального контуру до перетворювача необхідно проводити за допомогою елементу узгодження вихідного імпедансу перетворювача з вхідним імпедансом коливального контуру (рис. 1.5). Без використання узгоджувального елемента джерело буде не здатним передавати енергію контуру і накачка енергії в індуктор не відбуватиметься. Найчастіше у якості узгоджувального елемента використовують узгоджувальний трансформатор (рис. 1.6).

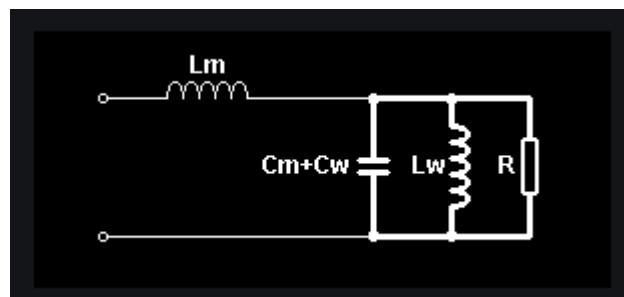


Рисунок 1.5 – Схема паралельного коливального контуру з узгоджувальним індуктором L_m та конденсатором $C_m + C_w$, що входить до складу контуру [7]

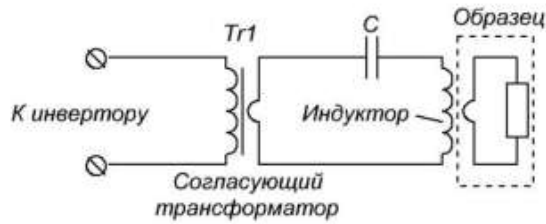


Рисунок 1.6 – Схема послідовного коливального контуру з узгоджувальним трансформатором [6]

На відміну від звичайних перетворювачів, ті, що використовуються в УІН, висувають умову щодо підтримання робочої частоти. При внесенні в індуктор заготовки з певною магнітною проникністю індуктор змінює свою індуктивність, а це, в свою чергу, впливає на власну частоту LC-контуру. У випадку з плавильними УІН з використанням тиглів, застосовуються, зазвичай, тиглі з провідних матеріалів, які мають різні значення магнітної провідності. При їх знаходженні всередині індуктора вони можуть змінити його індуктивність у декілька разів, тим самим зсуваючи власну частоту контуру. Знак та значення зсуву частоти залежить від типу матеріалу тигля або заготовки.

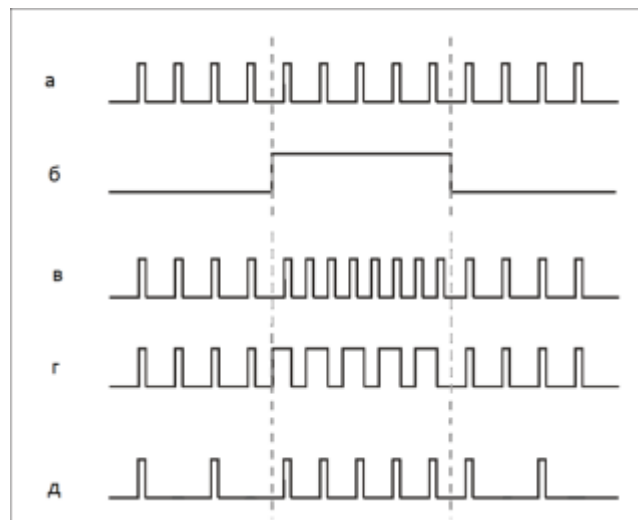
Проблеми з дотриманням робочої частоти перетворювачів вирішуються за рахунок методів їх управління.

1.2 Методи управління процесом індукційного нагріву

З точки зору технології використання УІН головним параметром для регулювання є температура деталі, що обробляється, та її швидкість нагріву. Цей показник регулюється саме потужністю самої УІН і залежить також від термодинаміки процесу нагріву (втрати тепла у навколишнє середовище через конвекцію, випромінювання зразком тощо), конструкції обладнання і т.д. Потужність, що безпосередньо передається через індуктор на зразок, регулюється потужністю генератора змінної напруги.

Беручи за основу двотактні перетворювачі напруги, потужність можливо регулювати за допомогою зміни трьох параметрів: коефіцієнту заповнення – D (відношення часу відкритого стану транзисторів до періоду перемикавання), робочої частоти – f_{sw} , густини імпульсів напруги. Відповідно до обраного параметру регулювання, розрізняють:

- частотно-імпульсна модуляція (ЧІМ, PFM), при якій імпульси напруги мають однаковий коефіцієнт заповнення, але різний період повторення (рис. 1.7 в);
- широтно-імпульсна модуляція (ШІМ, PWM), при якій змінюється D при постійному f (рис. 1.7 г);
- густинно-імпульсна модуляція (ГІМ, PDM), де регулюючий сигнал задає умовну густину імпульсів (рис. 1.7 д).



а) несучий сигнал; б) корисний сигнал; в) ЧІМ; г) ШІМ; д) ГІМ

Рисунок 1.7 – Види модуляцій

Додатково слід зазначити про фазо-зсувову імпульсну модуляцію (ФЗІМ, PSPM), яка, зазвичай, використовується в мостових топологіях інверторів. Вона полягає у застосуванні зсуву фази між управляючими імпульсами однакової частоти та коефіцієнту заповнення $D=0,5$ у якості

модуючого сигналу. Більш детально про цей вид модуляції наводиться в роботі Kifune H. та ін. (рис. 1.8, 1.9) [9].

Оскільки УІН мають вимоги щодо підтримання робочої частоти на рівні власної частоти резервуарного LC-контур, то найчастіше використовується саме ЧІМ та комбінації ЧІМ з іншими зазначеними модуляціями. Майже не використовується ШІМ через неможливість одночасного регулювання потужності перетворювача та дотримання режиму «м'якого перемикання» транзисторів. Однак цей режим знайшов застосування в УІН, де перетворення напруги живлення у змінну напругу проходить через декілька перетворень напруги [8]: із змінної в постійну (AC-DC Converter) та з постійної в змінну потрібної частоти (рис. 1.10).

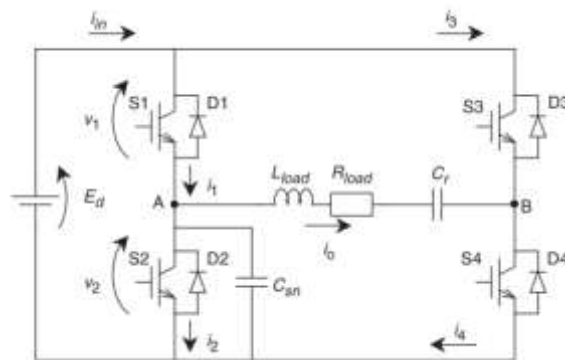


Рисунок 1.8 – Мостовий інвертор напруги (а) з використанням PSPM [9]

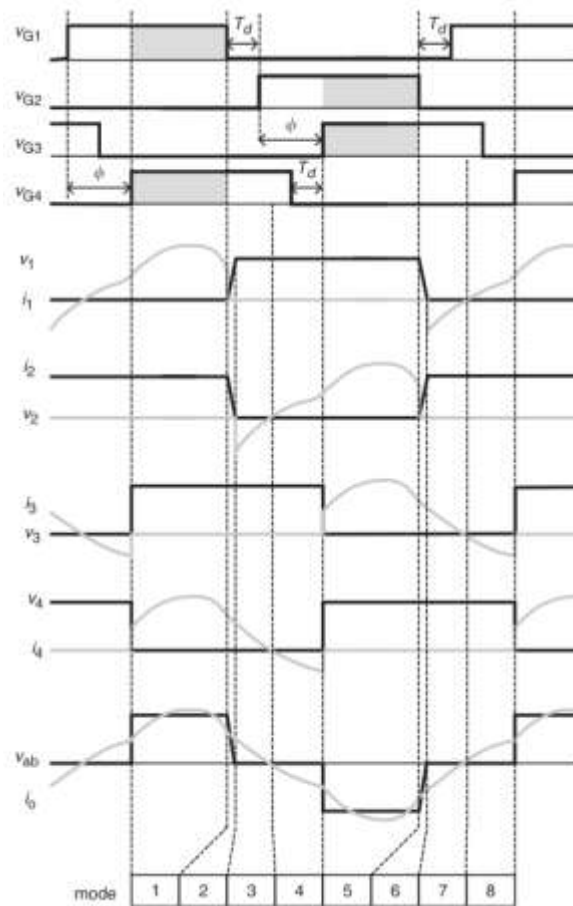


Рисунок 1.9 – Типові графіки сигналів при застосуванні PSPM [9]

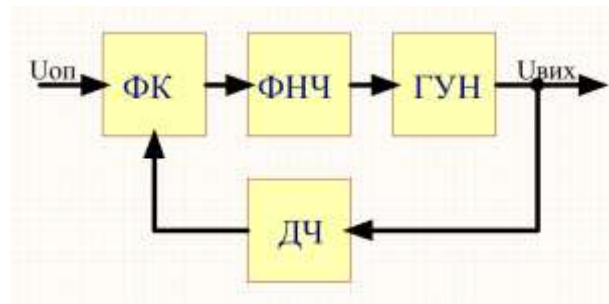


Рисунок 1.10 – Реальна модель індукційної печі [8]

На практиці, відповідно до цілей, потужностей, використовуються з різною частотою всі вищенаведені методи регулювання. В більшості цих робіт за основу береться ЧІМ, яка виконується за допомогою алгоритму ФАПЧ.

ФАПЧ (фазове автопідлаштування частоти) – алгоритм створення вихідного сигналу (зазвичай, періодичний) за допомогою порівняння фази

опорного сигналу з фазою вихідного. Простий аналоговий ФАПЧ (рис. 1.11) створюється за допомогою фазового компаратора, ФНЧ, ГУН та дільником частоти.



ФК – фазовий компаратор; ФНЧ – фільтр низьких частот;

ГУН – генератор, що управляється напругою; ДЧ – дільник частоти

Рисунок 1.11 – Приклад аналогового ФАПЧ

У випадку УІН, різниця фаз сигналів струму та напруги КК за допомогою ФАПЧ підтримується на рівні нуля. Таким чином, цей алгоритм встановлює частоту роботи перетворювача на значення власної частоти LC-контурі та виконує умову ефективної передачі енергії у деталь в індукторі УІН.

Зокрема, в роботі Кухтецького С.В. [6] застосовується алгоритм ФАПЧ із застосуванням PDM у якості регулятора потужності УІН. В роботах V.Esteve [10] та G.M.Segura [12] розглядаються модифіковані цифрові алгоритми ФАПЧ, що направлені на зменшення комутаційних втрат за допомогою додавання необхідної фазової затримки між опорним сигналом та сигналом зворотного зв'язку. Це дозволяє більш ніж вдвічі зменшити втрати на перемикачах.

Праці M.Nawaz [11] та M.S.V. Prasad [13] досліджують різні системи управління накачки в резервуарний контур; зокрема, в [11] робиться акцент на використанні апаратів нечіткої логіки та нейромереж у якості системи управління УІН з підтримкою потужності накачки. S.V.M.Prasad розглядає роздільне управління накачкою енергії в LC-контур та частотою накачки, забезпечуючи «м'яке перемикання» транзисторів інвертора на всьому

діапазоні навантажень одночасно з регулюванням процесу індукційного нагріву.

Отже, в УІН в якості схеми управління найчастіше застосовують схему ФАПЧ для ефективної накачки енергії в резервуарний контур паралельно з додатковими схемами модуляції для регулювання вихідної потужності установки, як того потребують технології використання в промисловості.

1.3 Датчики зняття параметрів установки індукційного нагріву

Для регулювання потужності та параметрів накачки в резервуарний контур УІН існують різноманітні схемотехнічні рішення щодо отримання показників в реальному часі.

Найбільш інформативними для користувача УІН є температура заготовки та швидкість її зростання. Ці параметри необхідні для контролю власне самого технологічного процесу термообробки зразка з провідного матеріалу. Хоча датчики вимірювання температури є необхідними в ланцюгах контролю УІН, вони не впливають напряду на параметри накачки LC-контуру. З цих міркувань температурні датчики в даній роботі детально розглядатися не будуть.

Більш важливими є вимірювання параметрів струму та напруги у коливальному контурі: частоти, фази та амплітуди. Ці параметри є необхідними для підтримання роботи інвертора на частоті близькій до резонансної, а тому вибір потрібного типу датчиків впливатиме на якість роботи алгоритму управління.

У порівнянні з іншими цілями використання, наприклад, вимір споживаної потужності в електромережах, датчики напруги та струму для їх використання в УІН повинні виконувати наступні вимоги:

- датчик напруги повинен витримувати високі напруги ($>200\text{В}$);
- при можливості датчик напруги повинен передавати сигнал з гальванічною розв'язкою від коливального контуру для безпеки використання;

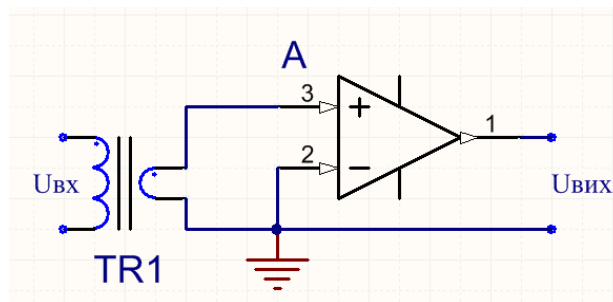
– датчик напруги не повинен вносити в ланцюг зворотного зв'язку додаткових значних фазових затримок або повинен їх компенсувати, якщо він використовується в схемі ФАПЧ;

– датчик напруги не повинен мати значно спотворену АЧХ та ФЧХ на діапазоні частот роботи інвертора та УІН.

Вимоги до датчика струму аналогічні: при можливості він має бути лінійним, не вносити значних фазових затримок та мати гальванічну розв'язку від коливального контуру.

Необхідно також відмітити той факт, що вимірювання кожного параметру (частоти, амплітуди, фази) не є необхідним для регулювання роботи КК УІН, тому кількість вимог може зменшуватись в залежності від обраного контуру зворотного зв'язку. Наприклад, вихідний сигнал датчиків переходу через нуль матиме інформацію про частоту та фазу коливань у КК.

Датчики (вимірювачі) напруги високої частоти та амплітуди не мають проблем з реалізацією. В деяких випадках, коли гальванічна розв'язка первинної вимірювальної схеми не є необхідною, то можна застосовувати резистивні дільники напруги; за неможливості використання – диференційні підсилювачі (з високим входним опором за синфазною складовою) або високочастотні трансформатори напруги з використанням феритів та інших феромагнітних осердь. Останні, навіть при наявності нелінійних матеріалів осердя, не вноситимуть значних похибок у вимірюванні за умови високого входного опору блоку підсилювача (рис. 1.12).



TR1 – трансформатор напруги; А – підсилювач з високих входним опором

Рисунок 1.12 – Датчик напруги з використанням трансформатора напруги

Умовно датчики струму можна поділити на 4 групи:

а) резистивні шунти. Основою вимірювання струму є закон Ома, за яким падіння напруги на резисторі з відомим значенням опору лінійно залежить від струму. Цей спосіб майже не використовується з причин неможливості більш-менш точно вимірювати повний діапазон струмів (величина якого може досягати 200кА), особливо з гальванічною розв'язкою, а ненульове значення паразитної індуктивності шунта обмежує частотний діапазон, в якому можливе зняття фази струму без значних спотворень;

б) датчики на основі ефекту Холла. Цей тип датчиків не має достатньої швидкодії з причин необхідності значно підсилювати вихідний сигнал з елемента Холла, що обмежує ефективну смугу пропускання. Цей недолік вирішується використанням феромагнітних матеріалів для підсилення магнітного поля, що діє на елемент. Однак від такого рішення вихідний сигнал стає нелінійним відносно струму, що вимірюється. Це обмежує можливість використання. З цих причин може застосовуватись у якості моніторингу споживаної потужності УІН;

в) трансформатор струму. Застосування даного типу датчика обмежується нелінійністю осердя, що використовується. Це впливає на ФЧХ датчика, що потребує компенсації затримок фази при використанні в контурі ФАПЧ;

г) пояс Роговського. Відповідно до [14], пояс Роговського є хорошою альтернативою трансформаторам струму: відсутність феромагнітного осердя позбавляє вихідний сигнал від джерел нелінійності, а висока швидкодія робить цей датчик ідеальним для вимірювань високочастотних струмів великої амплітуди, які спостерігаються в УІН. Пояс Роговського формує на виході сигнал, пропорційний похідній струму, тому для його використання необхідне використання швидкодіючого інтегратора (рис. 1.13). Таким чином, тоді як інтегратор підвищує вартість розробки, використання специфічної котушки робить даний тип датчиків значно дорожчими за інші види.

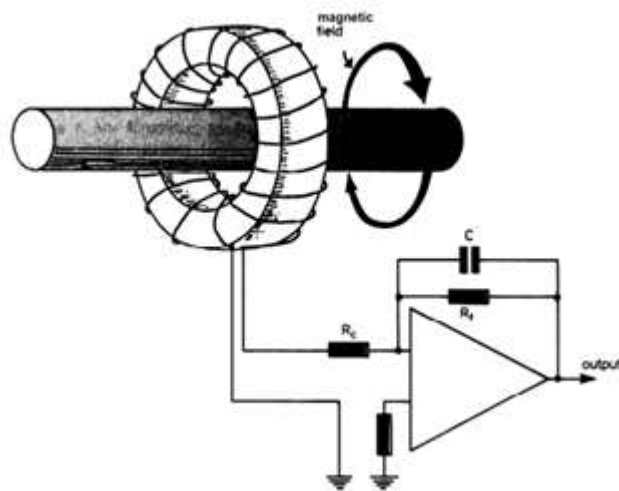


Рисунок 1.13 – Пояс Роговського з ланцюгом інтегратора

Отже, вибір типу датчика струму та напруги для використання в УІН залежить від наступних критеріїв:

- 1) робочий діапазон значень;
- 2) ефективна смуга пропускання;
- 3) наявність та величина спотворень АЧХ та ФЧХ вхідного сигналу;
- 4) захищеність від зовнішніх завад;
- 5) безпечність використання у приладі.

2 СПРОЩЕННЯ МОДЕЛІ УІН ТА ВИКОРИСТАННЯ ПХ РЕЗЕРВУАРНОГО КОНТУРУ У ЦИФРОВОМУ МЕТОДІ УПРАВЛІННЯ УІН

2.1 Спрощення моделі УІН

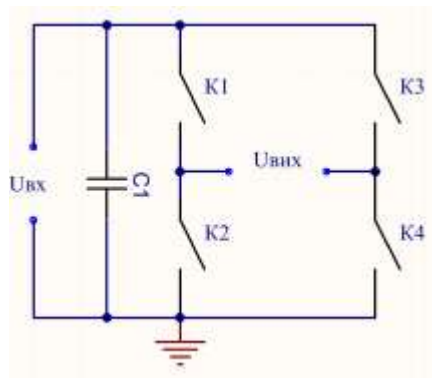
Для того, щоб уникнути складності та громіздкості процесу моделювання УІН із системою керування, що пропонується, необхідно досягти спрощення окремих блоків УІН, зокрема:

- блоку генератора змінного струму, який частіше за все представляє собою двотактні перетворювачі напруги;
- блоку навантаження даного генератора, який складається з резервуарного контуру, індуктора, власне зразка з його значенням опору, відносної магнітної проникності тощо, та елементами узгодження опорів.

2.1.1 Спрощення моделі генератора змінного струму

Як вже було зазначено в першому розділі, сучасні УІН будуються з використанням резервуарних LC-контурів, тому система управління УІН, у цілому, буде розроблятися навколо схеми накачки енергії в цей резервуарний контур. Регулювання параметрів, у свою чергу, регулює середню кількість енергії в резервуарі за одиницю часу і, таким чином, регулюється потужність нагріву.

Як було сказано у підрозділі 1.1 даної роботи, зараз найчастіше використовуються двотактні перетворювачі напруги. Моделювання цих схем є досить громіздкою задачею, але в умовах їх використання в УІН цю модель можна спростити. Для цього розглянемо це спрощення на прикладі двотактного мостового («full-bridge») перетворювача (рис. 2.1).



$C1$ – згладжувальний конденсатор; $K1, K2, K3, K4$ – електронні перемикачі

Рисунок 2.1 – Ідеальний мостовий перетворювач напруги

Принцип роботи цього перетворювача полягає у почерговому ввімкненні двох пар перемикачів: $K1, K4$ та $K2, K3$, для генерації на виході змінної напруги прямокутної форми (рис. 2.2).

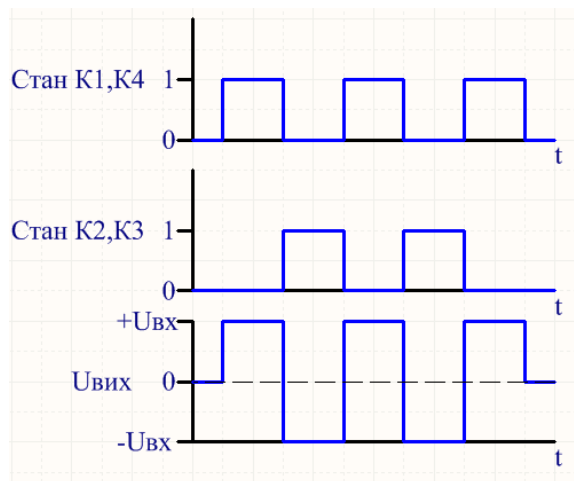


Рисунок 2.2 – Графіки роботи ідеального мостового перетворювача

Взагалі, на форму сигналів цих напруг будуть впливати як паразитні елементи, які присутні в реальних схемах, так і тип навантаження. Окрім цього, в практичних випадках обов'язково буде присутній так званий «мертвий час» та змінюватиметься коефіцієнт заповнення D . «Мертвий час» вводить для того, щоб уникнути одночасний відкритий стан реальних електронних перемикачів $K1$ та $K2$ або $K3$ та $K4$, за наявності ненульового

часу перемикання. Коефіцієнт заповнення D використовується для регулювання потужності, що надходить на вихід перетворювача.

Навантаження цього перетворювача в УІН представляє собою коливальний контур, повний опір якого залежить від частоти напруги збудження (рис. 2.3).

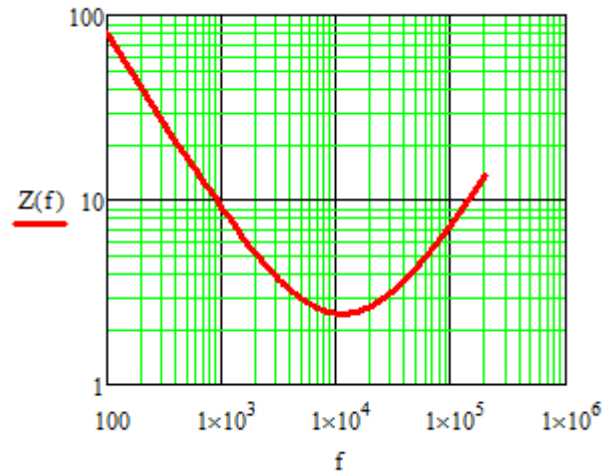


Рисунок 2.3 – Залежність повного опору послідовного коливального контуру від частоти генератора

Використання такого типу навантаження дозволяє спростити модель генератора змінної напруги, для цього використовуються наступні допущення:

а) в реальній схемі перетворювача «мертвий час» присутній, але його значення значно менше періоду роботи перетворювача:

$$t_{DT} \ll \frac{1}{f_{SW}},$$

де t_{DT} – «мертвий час»;

f_{SW} – робоча частота перетворювача напруги;

б) залежність опору коливального опору від частоти роботи перетворювача f_{SW} дає можливість регулювати вихідну потужність шляхом зміни f_{SW} ;

в) коефіцієнт заповнення є постійним і дорівнює $D=0,5$ для дотримання режиму «м'якого перемикавання» електронних перемикачів;

г) в ідеальному перетворювачі вихідна напруга матиме прямокутну форму сигналу. Прямокутний періодичний сигнал розкладається у ряд Фур'є [18]:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)),$$

де $s(t)$ – вихідний сигнал;

a_0 – значення постійної складової сигналу;

a_n, b_n, ω_n – амплітуди та частоти n -их гармонік сигналу, при цьому

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T} n;$$

T – період сигналу.

У випадку двотактного перетворювача $a_0 = 0$, $T = 1/f_{sw}$. Амплітуда гармонік прямокутного періодичного сигналу, який спостерігається на виході перетворювача зменшується зі збільшенням їх порядку, тобто зі збільшенням їх частоти.

Якщо прийняти за навантаження коливальний контур та провести перетворення Фур'є сигналу струму через навантаження, то можна помітити, що зі збільшенням частоти збільшується повний опір контуру, що зменшує амплітуду струму за цієї частоти:

$$I_n = \frac{a_n}{Z(2\pi f_n)},$$

де I_n – струм, що виникає у контурі опором:

$$Z(2\pi f_n) = 2\pi f_n L + \frac{1}{2\pi f_n C} + R$$

під дією n -ої гармоніки амплітуди напруги a_n та частоти f_n вихідної напруги перетворювача.

Звідси можна зробити висновок, що використання LC-контру викликає відмінності спектру струму від спектру напруги. Це дозволяє, у випадку послідовного коливального контуру, зробити спрощення щодо форми вихідного сигналу перетворювача, а саме прийняти його за сигнал синусоїдальної форми (рис. 2.4).

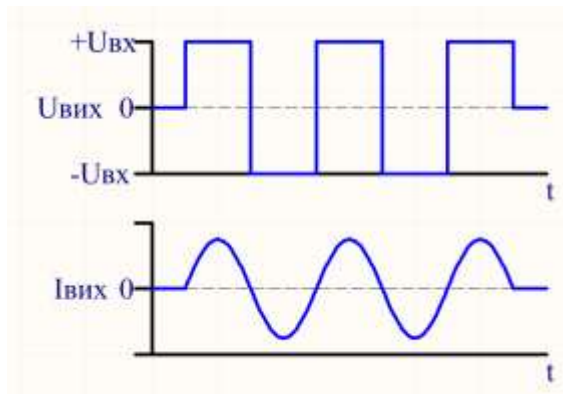
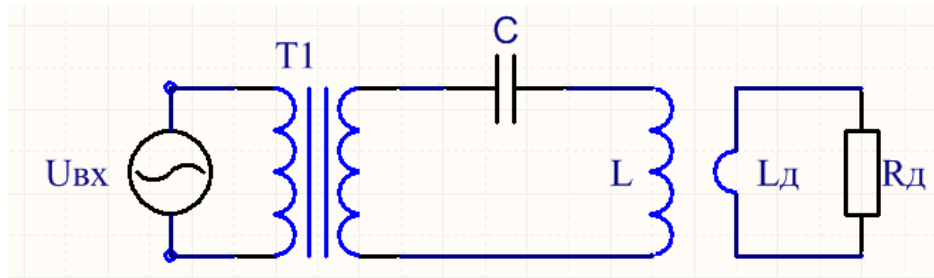


Рисунок 2.4 – Форма сигналу струму через послідовний коливальний контур

Таким чином, модель джерела змінного струму для УІН у вигляді двотактного перетворювача напруги можна спростити до моделі джерела синусоїдального струму змінної частоти постійної амплітуди. У випадку використання топологій перетворювачів з використанням PDM, PSFB та ін. це джерело можна представляти у якості джерела синусоїдального струму зі змінною амплітудою та частотою. Це пояснюється тим, що частотні складові вихідної напруги будуть такі ж самі за значенням частот, але різними за їх амплітудою. Враховуючи фільтруючу властивість коливального контуру до гармонік вище першої, можна прийти до висновку, що будь-яка схема керування двотактним перетворювачем буде мати на виході синусоїдальний струм при характерному для УІН навантаженні цих джерел.

2.1.2 Спрощення моделі «КК-індуктор-зразок»

Індуктор може бути частиною КК, так і пов'язаним з ним через узгоджувальні ЕРЕ. Звідси деталь, яка є безпосереднім навантаженням УІН, буде впливати на параметри накачки енергії в коливальний контур. Розглянемо ідеалізований блок «КК-індуктор-зразок» у випадку прямого під'єднання індуктора до КК (рис. 2.5).

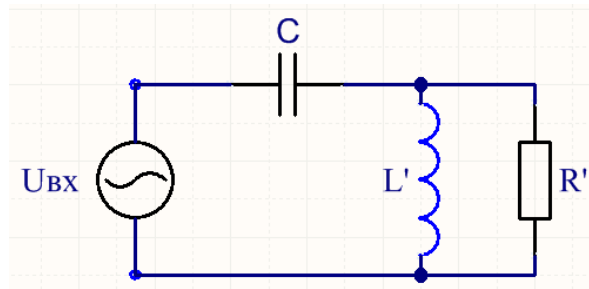


$U_{вх}$ – вхідна напруга; $T1$ – узгоджувальний трансформатор;

L – індуктор; L_d – власна індуктивність деталі(зразка); R_d – її опір

Рисунок 2.5 – Блок «КК-індуктор-зразок» з прямим під'єднанням індуктора до резервуарного контуру

Відповідно до рис. 2.5, зразок, маючи ненульову індуктивність, пов'язаний за допомогою електромагнітної індукції з індуктором, утворюючи тим самим трансформатор з повітряним осердям. Використовуючи допущення про ідеальність цього трансформатора, а також ідеальність узгоджувального трансформатора (або трансформаторів), можна привести блок до наступного вигляду (рис. 2.6).



R' , L' – значення опору та індуктивності, що навантажують джерело
вхідної напруги

Рисунок 2.6 – Еквівалентна схема блоку «КК-індуктор-зразок»
з послідовним КК

Індуктор, частіше за все, має більш ніж один виток та виробляється такої форми, щоб змінне магнітне поле було однорідним на всій площині деталі, що термічно обробляється. Тоді деталь у першому наближенні можна представити як індуктивність з одним витком; значення R' при цьому відповідає значенню:

$$R' = R_d \cdot N^2,$$

де N – кількість витків індуктора.

Значення L' враховує зміну індуктивності індуктора внаслідок ненульової індуктивності зразка та зміну відносної магнітної проникності простору всередині індуктора.

У випадках, коли індуктор під'єднаний до резервуарного контуру через узгоджувальні ЕРЕ, використовуючи аналогічні перетворення, можливо досягти ідентичної еквівалентної схеми. Відмінностями, в даному випадку, будуть лише значення тих реактивних та активних опорів, що знаходяться в схемі.

В реальних системах, у яких присутні активні втрати на реактивних елементах (втрати на поляризацію діелектрику, на опір обкладинок конденсаторів резервуарного контуру, на опір з'єднувальних провідників, шин, провідника, з якого зроблений індуктор тощо) запропонована схема не

буде точно відповідати дійсності. Наприклад, дві паралельно з'єднані котушки індуктивності в КК з одним конденсатором, в реальному випадку, маючи ненульове значення опору провідника, викликають появу, окрім власної частоти контуру (повний резонанс), власну частоту коливань між конденсатором та однією з котушок (частковий резонанс) [16, с.121-146].

Однак, розглядаючи установки УІН, де головною задачею при конструюванні є зменшення паразитних активних опорів в основних блоках, цим ефектом на робочих частотах установки можна знехтувати на етапі моделювання. На етапі конструювання різниця частот повного та часткових резонансів буде мінімальною.

Отже, для спрощення моделі УІН та аналізу роботи різноманітних схем її управління можливо застосувати еквівалентну схему, яку зображено на рис. 2.6. У випадку, коли використовується паралельний КК, вихідний блок установки можливо привести до подібної за простотою схеми.

2.2 Побудова передавальної характеристики коливального контуру УІН

Доцільність використання резервуарних контурів в УІН можливо довести застосовуючи передавальну характеристику схеми (2.1) вихідного блоку УІН на основі рис. 2.6:

$$K(j\omega) = \frac{U_{R'}(j\omega)}{U_{ex}(j\omega)} = \frac{j\omega L' \parallel R'}{\frac{1}{j\omega C} + j\omega L' \parallel R'}, \quad (2.1)$$

де $j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця;

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота, що відповідає частоті збудження f .

Залежність вихідної амплітуди напруги, що спостерігається на резисторі $|U_{R'}(j\omega)|$, відносно вхідної $|U_{ex}(j\omega)|$, від частоти виражатиметься через АЧХ $|K(j\omega)|$, а фази – через ФЧХ:

$$\arg(K(j\omega)) = \arctg\left(\frac{\operatorname{Re}(K(j\omega))}{\operatorname{Im}(K(j\omega))}\right).$$

Приймаючи $C, L' = \text{const}$ та змінюючи значення R' , отримуємо набір графіків АЧХ даного КК (рис.2.7).

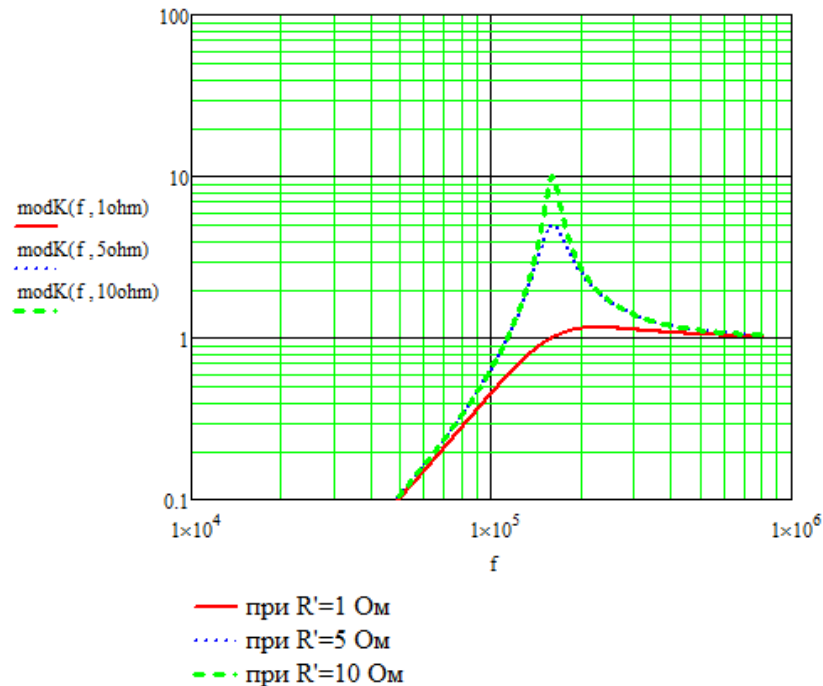


Рисунок 2.7 – АЧХ резервуарного контуру при $C = 1\text{мкФ}$, $L' = 1\text{мкГн}$

Згідно вищенаведених графіків, окрім частотно-селективних властивостей КК можна побачити підсилення вхідного збуджуючого коливання за рахунок ефекту резонансу. Це дозволяє генерувати коливання з великим значенням амплітуди, яке необхідне для ефективної передачі енергії в деталь в індукторі для її нагріву. Окрім цього, енергія цих коливань просторово обмежена всередині контуру, що зменшує втрати в установці.

Однак використання LC-контуру в УІН не є вирішенням всіх проблем. Зокрема, для ідеального контуру за відсутності навантаження (відсутності деталі в індукторі) $|K(j\omega)| \rightarrow \infty$, оскільки $R' \rightarrow \infty$. В реальній установці присутні втрати на опорі провідників та на поляризації діелектриків, які

можна виразити через $R_{внутр}$. Значення амплітуди тоді буде мати кінцеве значення за рахунок врівноваження втрат на $R_{внутр}$ з вхідною потужністю. Але, як вже було зазначено в п.2.1.2 даної роботи, цей опір має настільки мале значення, що ще до настання цієї рівноваги амплітуда напруги в контурі стане більше за дозволений діапазон напруг конденсаторів. Це викликає пробій діелектрика та вихід з ладу всієї установки. Тому відсутність деталі, яку нагрівають, в індукторі вважають аварійною ситуацією.

Враховуючи це, виробники промислових УІН застосовують захисні механізми в конструкції, які не дають передавати енергію накачки в КК без наявності навантаження та припиняють цей процес при аварійних ситуаціях. Окрім цього, в технології використання цих установок впроваджуються зміни в посадові інструкції операторів для запобігання цього. Протилежна ситуація спостерігається в непромислових, дешевших виробках, де внаслідок здешевлення захисні механізми не передбачені, тому надмірна накачка енергії в КК УІН є однією з головних причин виходу з ладу установок.

Розглядаючи процес накачки енергії в КК через параметр добротності контуру Q , який описує відношення максимальної напруги на конденсаторі до напруги генератора за резонансної частоти, можна побачити, що Q реального КК буде знаходитись у межах:

$$Q = \left[R'_{\min} \sqrt{\frac{C}{L'}}; \frac{1}{R_{внутр}} \sqrt{\frac{L'}{C}} \right] \quad (2.2)$$

де $R'_{\min}$ – еквівалент найменшого опору, який допустимий для дотримання умови ефективного нагріву, що залежить від потужності УІН. Іншими словами, при роботі УІН в штатному режимі КК має добротність, що відповідає паралельному типу контуру, та визначається робочим навантаженням установки; в аварійному режимі – послідовному типу

контур, та визначається опором втрат власне в контурі, тобто $(R_{\text{внутр}} \downarrow, Q_{\text{max}} \uparrow)$.

Окрім цього, згідно (2.2), значення добротності залежить і від інших параметрів контуру, таких як ємність та індуктивність. Найбільший інтерес представляє котушка індуктивності L' , яка, взагалі, має змінну індуктивність, в залежності від індуктора та типу навантаження (деталі). Однак, з точки зору розрахунку амплітудного значення коливань, можна приймати $L' = \text{const}$ внаслідок того, що:

а) $Q \sim \sqrt{\frac{1}{L'}}$, тоді як $Q \sim R'$;

б) значення R' , на відміну від L' , змінюється в набагато ширшому діапазоні значень, ніж значення індуктивності L' .

Слід зазначити, що це припущення діє лише у випадку розрахунку амплітудного значення, тоді як зміною L' не можна нехтувати при дотриманні робочої частоти генератора біля резонансу контуру.

Значення ємності C в загальному випадку не змінюється і залежить лише від резервуарної батареї конденсаторів та інших конденсаторів, які можуть виконувати функцію узгодження імпедансів.

При нормальній роботі установки значення R' є невідомим і не піддається точній оцінці навіть оператором. Окрім того, вона є змінною величиною в процесі, тому вводиться безрозмірна величина Y , яка відповідає відношенню:

$$Y = \omega C R'.$$

Використання Y дає змогу за допомогою математичних перетворень (додаток А) отримати АЧХ та ФЧХ схеми в наступному вигляді:

$$|K(\omega)| = \frac{Y \cdot X_{L'}}{\sqrt{Y^2 (X_C - X_{L'})^2 + X_{L'}^2}}, \quad (2.3)$$

$$\arg(K(\omega)) = \arctg\left(Y \frac{X_C - X_{L'}}{X_{L'}}\right), \quad (2.4)$$

де $X_C = \frac{1}{\omega C}$ – реактивний опір конденсатора C ;

$X_{L'} = \omega L'$ – реактивний опір конденсатора L' .

Водночас можна відмітити наступну особливість запропонованої величини: при $\omega = \omega_{рез} = 1/\sqrt{L' \cdot C}$

$$X_C - X_{L'} = 0, \quad |K(\omega_{рез})| = Y(\omega_{рез}),$$

тобто за резонансної частоти запропонована величина чисельно дорівнюватиме добротності контуру. Іншими словами, вищеписане дозволяє проводити розрахунки з використанням АЧХ та ФЧХ КК з невідомим значенням опору навантаження, зокрема розрахунок частоти, за якої ПХ контуру матиме задане значення.

Отже, існує необхідність побудови такої схеми управління, яка мала б у собі захисний механізм від надмірної накачки енергії при відсутності навантаження навіть за відсутності зовнішніх ланцюгів захисту.

2.3 Побудова схеми управління УІН

До схеми управління УІН, враховуючи особливості роботи як генератора змінного струму, так і власне блоку «КК-індуктор-деталь» висуваються наступні вимоги:

- а) регулювання потужності, що надходить у КК;
- б) дотримання робочої частоти перетворювача напруги у вузьких межах навколо власної частоти вихідного блоку УІН, незалежно від навантаження, для підтримки ефективності процесу нагріву;
- в) механізми та алгоритми, що сприяють збільшенню ККД, зокрема, дотримання умови «м'якого перемикачання» електронних перемикачів перетворювача;

г) алгоритм уникнення ситуацій надмірної передачі енергії у вихідний блок установки за відсутності деталі в індукторі для його захисту від надмірних напруг.

Завдання розробки даної схеми спрощується за допомогою використання спрощень моделі УІН, які були виведені раніше, а саме:

- перетворювач напруги в загальному випадку можна представити як джерело синусоїдальної напруги зі змінною частотою та амплітудою;
- вирішення завдання за допомогою еквівалентної схеми КК (рис. 2.6).

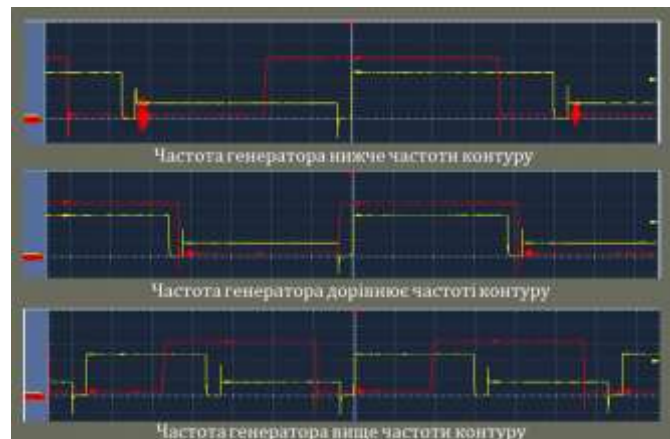
Вихідний струм перетворювача буде представляти з себе синусоїдальний сигнал, тому умова «м'якого перемикавання» електронних перемикачів буде дотримуватись, коли різниця фаз напруги та струму буде мінімальна, тобто спостерігається ZCS-робота перемикачів. Згідно ФЧХ КК (2.4) це відбувається при робочій частоті, близької до резонансної. Таким чином, дотримання першої зазначеної вимоги виконує другу.

Згідно ПХ КК, підтримання робочої частоти перетворювача можливо виконувати за допомогою порівняння фаз струму та напруги у контурі. Це завдання найкраще виконують алгоритми ФАПЧ.

Датчики, які знімають вказані фази, в реальності, мають власні ПХ, за якими вони вносять власні похибки у вимір фази. Ці похибки, в свою чергу, з використанням ФАПЧ вносять похибку в установку робочої частоти перетворювача. Тому необхідні заходи з компенсації даних фазових затримок.

Компенсація затримок найкраще виконується при використанні цифрових процесорів: як цифрових сигнальних процесорів (DSP), так і мікроконтролерних засобів. Наприклад, в своїй попередній роботі [17] та у роботі Mangesh B. та Sunil T. [18] пропонується вводити в контур зворотного зв'язку фаз «опорну» фазу. Ця «опорна» фаза, наприклад, може бути отримана при автоматичному пошуку резонансної частоти КК. За цієї частоти власна різниця фаз контуру дорівнює нулю, тому отримане значення різниці фази буде рівним загальній фазовій затримці всіх вимірювальних

ланцюгів (рис. 2.8). При врахуванні цього значення в алгоритмі ФАПЧ встановлюється частота рівна власній частоті контуру.



червоний – вихідний сигнал з датчика;

жовтий – управляючий сигнал електронного перемикача

Рисунок 2.8 – Осцилограми роботи алгоритму ФАПЧ [17]

Вимогу щодо регулювання потужності можна виконувати як регулюванням безпосередньо джерела змінної напруги (методи PDM, PFM, PSFB, розгляд яких наведений в розділі 1 цієї роботи), або введенням додаткової ланки перетворення напруги живлення. Таким перетворювачем, наприклад, може бути знижуючий перетворювач («buck», «chopper»), який було використано у вищезазначених роботах. Недоліком останнього методу є подорожчання установки, що зумовлене збільшенням кількості ЕРЕ в ній. На противагу цьому, це рішення дозволяє роз'єднати ланцюги управління потужності та робочої частоти перетворювача, тим самим перша і друга вимоги, що наведені на початку цього підрозділу, дотримуються незалежно одна від одної. Завдяки цій перевазі модель інвертора буде застосовувати саме цей вид регулювання потужності.

Таким чином, була сформована схема управління УІН, на основі якої буде розроблятися така схема, яка змогла б забезпечити безпечність використання установки у випадку аварійної ситуації, якою вважається відсутність навантаження.

2.4 Модернізація ФАПЧ з регулюванням амплітудного значення напруги на КК

Як вже було зазначено, обмеження накачки енергії в коливальний контур є необхідністю для захисту резервуарних конденсаторів від перенапруг. Однак ця вимога викликає протиріччя з умовою ефективної роботи установки, за якої обмеження подачі потужності у контур означає зниження швидкості нагріву деталі. Це протиріччя можна усунути шляхом створення такого алгоритму, який, в залежності від навантаження, регулював частоту наступним чином:

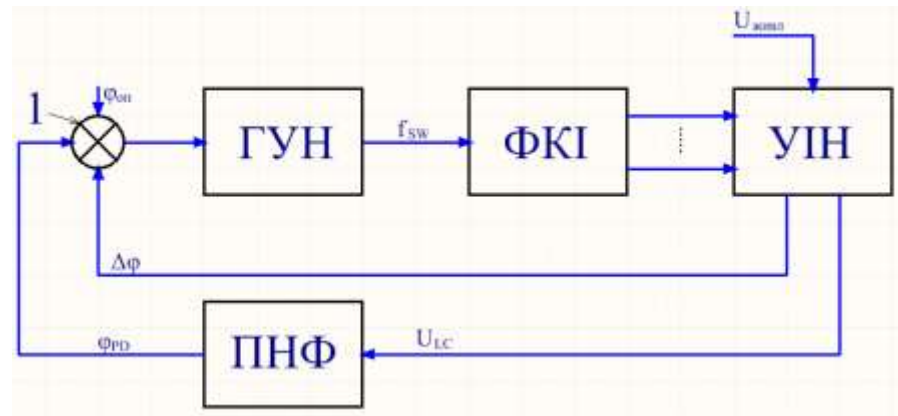
- в умовах, коли УІН працює в штатному режимі, захисне обмеження відсутнє і алгоритм виконує функцію ФАПЧ;
- в умовах роботи без деталі в індукторі УІН автоматично обмежує вхідну потужність розлаштуванням КК (виходом з резонансу).

Вибір напрямку зміни робочої частоти залежить від характеру навантаження, що є рекомендованим для транзисторів. При зменшенні частоти перетворювач матиме ємнісний характер навантаження, тобто при відкритті транзисторів відбуватиметься стрибок струму через них. При збільшенні ж частоти навантаження матиме індуктивний характер. Тоді при закритті транзисторів спостерігатимуться стрибки напруги. Індуктивний характер навантаження є кращим, оскільки транзистори (зокрема, IGBT) при великих імпульсах струму можуть вийти з режиму насичення. Для транзисторів, які створені для роботи в режимі перемикача, вихід з режиму насичення на довгостроковий період означає його вихід з ладу. Отже, розлаштування КК (вихід з резонансу) потрібно робити за допомогою підвищення частоти.

У якості індикації «наявність/відсутність» деталі в індукторі можна використовувати АЧХ КК (2.3), за якою видно, що з підвищенням значення опору деталі амплітудне значення напруги збільшується. Отже, вимірюючи значення напруги на резервуарному контурі можна отримати інформацію про

наявність ($R' \rightarrow R'_{\min}$) чи відсутність ($R' \rightarrow \infty$) деталі в індукторі. Ця залежність є основою розроблюваного методу управління.

Враховуючи вищезазначені вимоги та особливості, модернізована схема ФАПЧ, якої зображена на рис. 2.9.



1 – суматор; ГУН – генератор, що управляється напругою;

ФКІ – формувач управляючих імпульсів; УІН – установка індукційного нагріву;

ПНФ – перетворювач «напруга-фаза»

Рисунок 2.9 – Покращена схема ФАПЧ для УІН

Слід зазначити, що вищенаведена схема є досить спрощеним її зображенням: в блоку УІН, окрім власне вихідного блоку, має необхідні датчики, вихід з яких подаються на наступні блоки. Суматор (позначений цифрою 1 на рис. 2.9), в свою чергу, складає значення фаз, які представлені у вигляді чисельних значень.

За основу даної схеми, береться ФАПЧ, який описаний в попередньо згаданих роботах у підрозділі 2.3 даної записки. Похибки, що виникають в вимірювальних ланцюгах схеми, компенсуються «опорним» зсувом фази $\varphi_{оп}$, який розраховується при автоматичному пошуку резонансу. До суматора надходить різниця фаз струму та напруги $\Delta\varphi$, значення «регулюючого» зсуву фази φ_{PD} та «опорного» $\varphi_{оп}$. Вихідне значення суматора подається на вхід ГУН, який формує робочу частоту перетворювача напруги. Формувач керуючих імпульсів (ФКІ) на основі виходу ГУН створює

сигнали, які безпосередньо керують електронними перемикачами перетворювача.

Блок перетворювача «напруга-фаза» (ПНФ) формує на виході φ_{PD} в залежності від амплітудного значення напруги U_{LC} на коливальному контурі. Набір значень $\varphi_{PD}(U_{LC})$ розраховується за допомогою наступного алгоритму:

а) під час пошуку резонансу, який представляє собою пошук частоти, за якої на контурі спостерігається максимальне U_{LC} при заданій напрузі живлення $U_{живл}$, алгоритм знаходить значення $f_{рез}$, φ_{OP} та L_{ind} , що виходить зі знайденого значення $f_{рез}$;

б) значення $U_{живл max}$ відоме, тому наступним кроком буде формування масиву значень:

$$Y(f_{рез}) = [1; 0,6U_{Cmax}/U_{живл max}],$$

де U_{Cmax} – максимально допустима напруга на конденсаторній батареї коливального контуру.

Оскільки $Y(f_{рез}) = Q$, цим значенням відповідають відношення амплітудного значення U_{LC} до $U_{живл}$ на резонансній частоті при заданому значенні $Y(f_{рез})$;

в) обирається набір значень відношення $U_{LC}/U_{живл}$ для кожного Y таким чином, щоб кожне значення цього відношення не було більше за Y , відповідний йому, а кожне наступне значення відношення було більше попереднього:

$$\left(\frac{U_{LC}}{U_{живл}}\right)_i \leq Y(f_{рез})_i, \quad \left(\frac{U_{LC}}{U_{живл}}\right)_i < \left(\frac{U_{LC}}{U_{живл}}\right)_{i+1},$$

де i – номер елементу в масиві значень $Y(f_{рез})$;

г) виконується обернена задача пошуку частоти за якою АЧХ КК (2.3) відповідатиме заданому значенню:

$$\left| K(2\pi f_{\text{шук}}) \right|_i = (U_{LC}/U_{\text{живл}})_i,$$

де $f_{\text{шук}}$ – частота, яка шукається. Це потребує вирішення рівняння з відомим значенням $U_{LC}/U_{\text{живл}}$ та $Y(f)$. Це рівняння аналітично не вирішується, тому застосовуються чисельні методи розв'язку з вибором значення, більшого за резонансну частоту:

$$f_{\text{шук}} > f_{\text{рез}}.$$

д) для кожного значення $f_{\text{шук}}$ за допомогою ФЧХ контуру (2.4) розраховується відповідне йому значення $\Delta\varphi = \arg(K(2\pi f_{\text{шук}}))$;

е) кожному значенню $\Delta\varphi$ співвідноситься значення U_{LC} і формується таблиця співвідношень $U_{LCi} - \Delta\varphi_i$. Вона лежить в основі роботи блоку ПНФ.

Виконання вищеописаного алгоритму для заданих Y розраховує відповідні їм значення $\Delta\varphi$, $U_{LC}/U_{\text{живл}}$, $f_{\text{шук}}$, що наводяться у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Розраховані значення $\Delta\varphi$, $U_{LC}/U_{\text{живл}}$, $f_{\text{шук}}$ для заданих Y при $C = 5\text{мкФ}$, $L' = 5\text{мкГн}$, $f_{\text{рез}} = 31,83\text{кГц}$

$Y(f_{\text{рез}}) = Q$	$U_{LC}/U_{\text{живл}}$	$f_{\text{шук}}$, кГц	$\Delta\varphi$, град.
2	2	31,83	0
3	3	31,83	0
5	4	33,97	29,2
9	5	34,75	53,6
17	6	34,61	67,8

Отже, за допомогою даного алгоритму можна отримати таблицю співвідношень $U_{LC} - \Delta\varphi$, за якою блок ПНФ буде формувати значення φ_{PD} на своєму виході. Цей блок тоді виконуватиме наступні функції:

- при збільшенні добротності контуру, яке спостерігається при відсутності деталі в індукторі, збільшується амплітуда напруги контуру. Внаслідок цього блок ПНФ змінює значення φ_{PD} таким чином, що збільшує частоту на виході схеми ФАПЧ. Збільшення f_{sw} викликає падіння амплітуди напруги ($Z_{LC\omega\omega} \uparrow, P_{\omega\omega} \downarrow$) у контурі, чим дотримується вимога роботи контуру в межах $(0; U_{C\max})$;

- зменшення добротності контуру призводить до зворотних змін на виході ПНФ: f_{sw} зменшується та наближається до значення резонансної частоти контуру, збільшуючи вихідну потужність перетворювача ($Z_{LC\omega\omega} \rightarrow Z_{LC\text{рез}}, P_{\omega\omega} \uparrow$).

У результаті, запропонована схема здатна обмежувати вихідну потужність перетворювача напруги у випадках відсутності навантаження на УІН і не обмежує її, коли УІН працює в штатному режимі.

З МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ УІН З МОДЕРНІЗОВАНОЮ СХЕМОЮ УПРАВЛІННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Використання комп'ютерної моделі для аналізу роботи запропонованого алгоритму

Для створення та перевірки моделі використовується математичний пакет Matlab 2015b разом з його частиною Simulink. В основному пакеті проводиться отримання початкових значень, які, згодом, будуть використовуватися при основному моделюванні в Simulink. Повний лістинг програм в Matlab та вигляд моделі Simulink наводиться в додатку Б.

При проектуванні даної моделі використовувалися припущення та спрощення, які описувалися в другому розділі даної роботи. Крім того, можна припустити, що датчики зняття параметрів КК при цьому є ідеальними.

3.1.1 Опис моделі

До довільних початкових значень для моделювання роботи схеми управління УІН входять:

- ємність резервуарного контуру C_{lc} , значення якої є відомою величиною для розробника;
- максимально допустима напруга на конденсаторах КК U_{cmax} ;
- напруга живлення перетворювача U_{supply} ;
- коефіцієнт заповнення імпульсу знижуючого перетворювача D . За його відсутності це значення дорівнює одиниці;
- співвідношення витків узгоджувального трансформатора між перетворювачем та КК $matchTransfN$;
- стан роботи перетворювача «напруга-фаза» (рис. 2.9) *RegulationOn*:
1 – ввімкнений, 0 – вимкнений.

Модель, що розглядається, на початку здійснює пошук значень параметрів КК, які не можуть бути чітко вимірними користувачем для безпосереднього введення в блок управління. Такими параметрами є індуктивність індуктора та власна частота КК.

Значення індуктивності індуктора в процесі моделювання задається випадковим чином. Це моделює випадок, коли індуктор виготовляється з контролем форми та розміру під деталь, що буде оброблятися, але не його електричних характеристик.

Пошук резонансної частоти контуру відбувається за алгоритмом, розглянутого раніше. При пошуку резонансної частоти програма знаходить значення індуктивності L_{lc} . Після цього програма матиме всі необхідні значення для розрахунку масиву значень «напруга-фаза» $U_{LCi} - \Delta\varphi_i$ за алгоритмом, розглянутим в підрозділі 2.4 даної роботи.

Отримані таким способом значення далі використовуються при симуляції моделі, наведеній на рис. Б.1, що в додатку Б даної роботи. Вона складається з початкових постійних значень, частина з яких попередньо отримується вищенаведеною програмою, та підсистем, що моделюють принцип роботи реальних функціональних вузлів УІН.

Підсистема «Генератор» (рис. 3.1) відповідає за генерування змінної напруги, що подається на підсистему «RLC Схема» (рис. 3.2). Сам генератор виконує декілька функцій:

- безпосереднє утворення коливання на виході перетворювача заданої частоти та амплітуди. Вихідний сигнал при цьому складається з набору одноперіодних синусоїдальних коливань змінної частоти та амплітуди. Кожне одноперіодне коливання матиме амплітуду та частоту, значення яких буде дорівнювати значенням на вході підсистеми на момент закінчення періоду попереднього. Такий режим роботи генератора забезпечує відсутність спотворень синусоїдального сигналу водночас зі зміною частоти коливань під час роботи;

техніки в цифровій та мікропроцесорній техніці, прикладом яких є цифрові таймери та лічильники. Для цього вимірюється безпосередньо різниця часу між переходами через нуль вхідного та вихідного сигналу та, використовуючи заздалегідь відоме значення частоти, отримується значення в градусах.

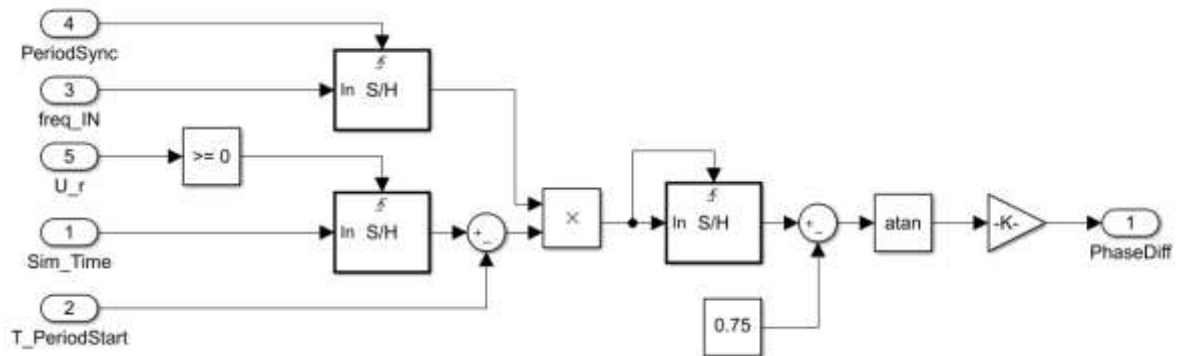


Рисунок 3.3 – Підсистема «Фазовий детектор»

Блок ФАПЧ (рис. 3.4), аналогічно до попередньої підсистеми, повторює можливі цифрові схеми. В даному випадку, ФАПЧ є ключовим вузлом управління робочої частоти УІН та гарантує нульове значення різниці фаз на своєму вході за допомогою зміни частоти на виході. Це призводить до роботи перетворювача на частоті близькій до резонансної частоти КК.

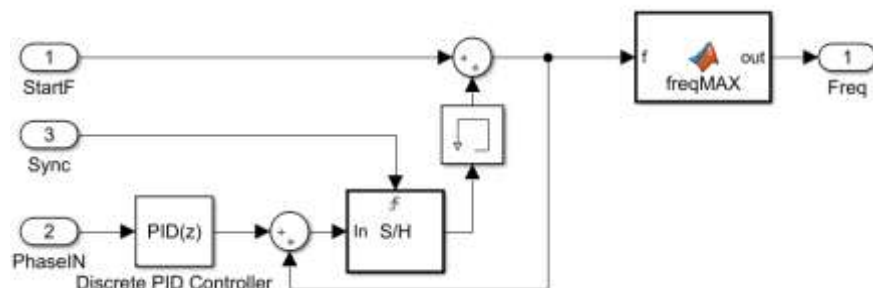


Рисунок 3.4 – Підсистема «ФАПЧ»

Головним блоком, робота якого розглядається в даному проєкті, є підсистема перетворювача «Напруга-фаза» (рис. 3.5). Ця підсистема працює

на принципі багатоканального блоку компараторів з гістерезисом. Кожний канал порівнює одну й ту саму вхідну величину амплітуди вихідного коливання на контурі, що отримується піковим детектором. Кожен канал має пріоритет: чим вище номер – тим вищий пріоритет. При перевищенні амплітуди коливання понад значення певного U_{LCi} , вихід i -ого компаратора прийматиме значення «1». Таким чином, на виході цієї підсистеми буде з'являтися сигнал, що дорівнюватиме $\Delta\varphi_i$, де i – номер останнього компаратора, у якого «1» на виході. Значення $\Delta\varphi_i$ далі сумується зі значенням із фазового детектора. В результаті, сигнал похибки на вході блоку ФАПЧ, що складатиметься з суми цих двох сигналів, буде вносити відповідні зміни у робочу частоту перетворювача.

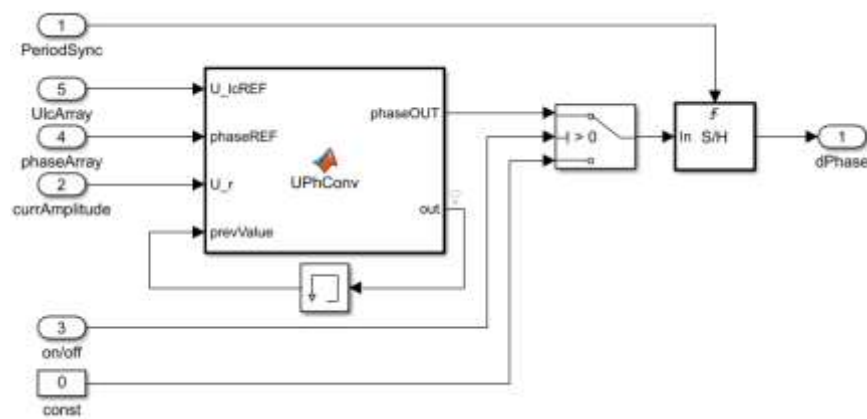


Рисунок 3.5 – Підсистема перетворювача «Напруга-фаза»

Враховуючи вищеописане, дана модель дозволяє проводити аналіз роботи схеми управління, що пропонується в роботі, на основі змін будь-якого параметра схеми. Також є можливість виключити вплив підсистеми ПНФ на роботу схеми управління, змінивши значення *RegulationOn* на нуль. При цьому буде проходити симуляція роботи стандартного алгоритму ФАПЧ.

3.1.2 Результати моделювання

Для дослідження різниці в роботі звичайної та модернізованої схем ФАПЧ в УІН проводиться моделювання вищерозглянутої системи в цих двох випадках. Для цього початкові значення, прийматимуть значення, що наведені в табл. 3.1. Вибір значень пояснюється обмеженнями та можливостями сучасної схемотехнічної бази.

Таблиця 3.1 – Початкові значення для моделювання

Параметр	Назва змінної	Значення
Напруга живлення, В	U_{supply}	$380 \cdot \sqrt{2} = 537,4$
Коефіцієнт заповнення	D	1
Значення ємності КК, мкФ	C_{lc}	$12 \cdot 16 \cdot 0,047 = 9,024$
Максимально допустима напруга на конденсаторах, В	U_{cmax}	1000
Співвідношення витків узгоджувального трансформатора	$matchTransfN$	20

Значення ємності КК виходить з використання поліпропіленових конденсаторів, розрахованих на меншу реактивну потужність, з'єднаних паралельно.

Для прямого порівняння цих двох систем значення індуктивності індуктора приймається постійним:

$$L_{lc} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ мкГн}.$$

Таким чином, власна частота КК буде дорівнювати:

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{lc} \cdot C_{lc}}} = 30588 \text{ Гц}.$$

Виконання головної програми в Matlab формує необхідні значення для симуляції, в тому числі – масив значень $U_{LCi} - \Delta\varphi_i$, необхідний для роботи ПНФ. Для наочності ці значення приводяться у якості графічної залежності $\Delta\varphi_i(U_{LCi})$, що зображена на рис. 3.6.

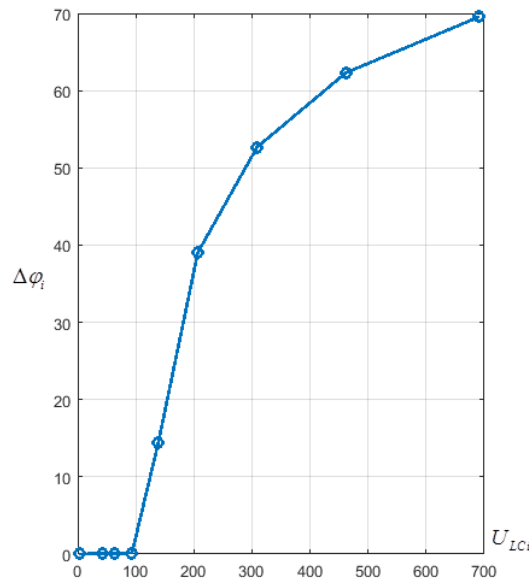


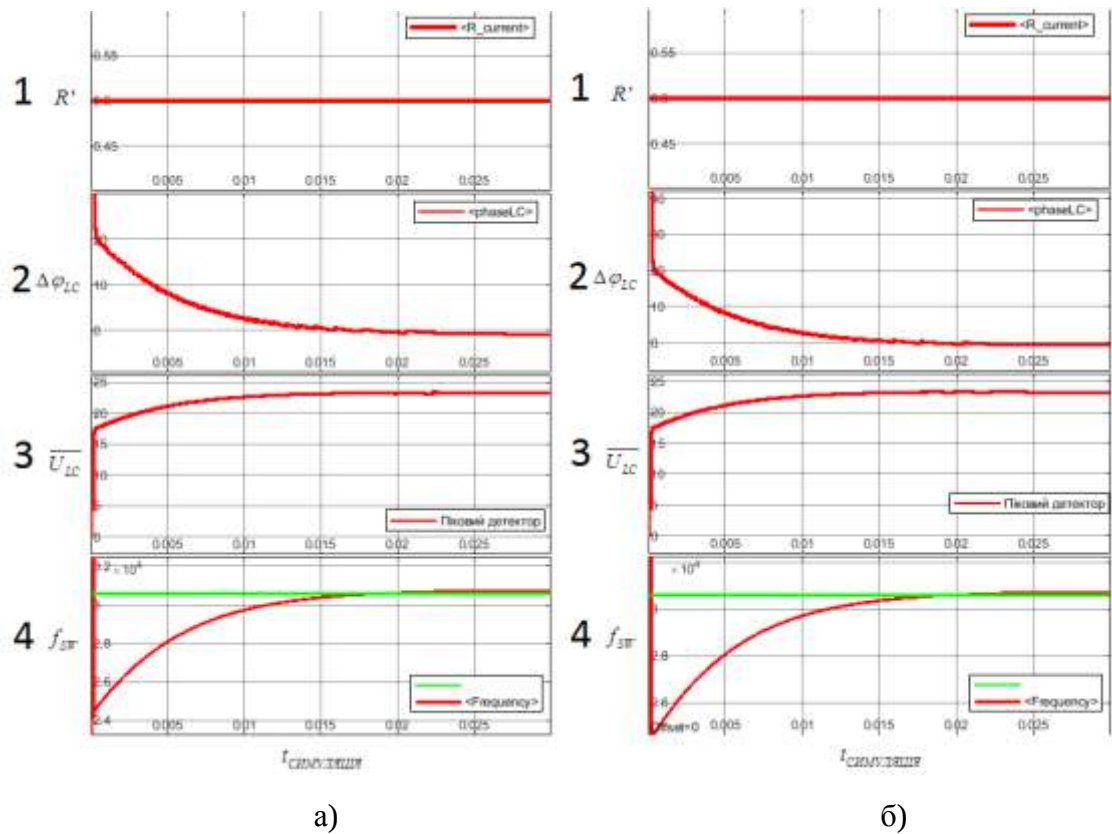
Рисунок 3.6 – Графічна залежність $\Delta\varphi_i(U_{LCi})$

Робота схем управління порівнюється для наступних випадків:

- а) навантаження контуру не змінюється і є постійною величиною;
- б) навантаження змінюється, що симулює поступове прибирання деталі з індуктора.

Перший випадок описує як обидві схеми поведуть себе у «штатному режимі роботи» УІН, тоді як у другому моделюванні порівнюється реакція на збільшення добротності резервуарного контуру.

Результати симуляції першого випадку наводяться на рис. 3.7.



а) проста схема ФАПЧ, б) модернізована схема ФАПЧ;
 1 – навантаження на УІН; 2 – значення різниці фаз КК;
 3 – поточна амплітуда коливань у КК; 4 – поточна робоча частота перетворювача
 у порівнянні з розрахованою резонансною частотою
 Рисунок 3.7 – Результати симуляції роботи УІН з двома різними схемами
 управління при постійному навантаженні

Таким чином, модернізована схема ніяк не впливатиме на вихідну потужність УІН і повністю повторюватиме властивості роботи звичайного ФАПЧ.

Для перевірки роботи ПНФ в аварійному режимі припускаємо, що зміна навантаження УІН (опору R'), наприклад, падіння тиглю з плавильної УІН, не є швидким процесом відносно періоду коливань в індукторі:

$$T(\Delta R') \gg \frac{1}{f_{sw}}.$$

Наприклад, цю зміну опору можна представити як суму постійного опору та опору, що пропорційний коливанню трикутної форми (рис. 3.8) з частотою 10Гц.

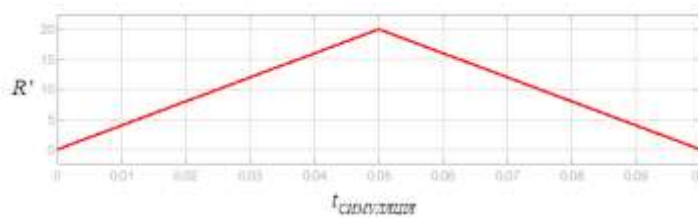


Рисунок 3.8 – Моделювання навантаження УІН при аварійному режимі

Враховуючи вищезазначене, отримані результати симуляції системи наводяться на рис.3.9.

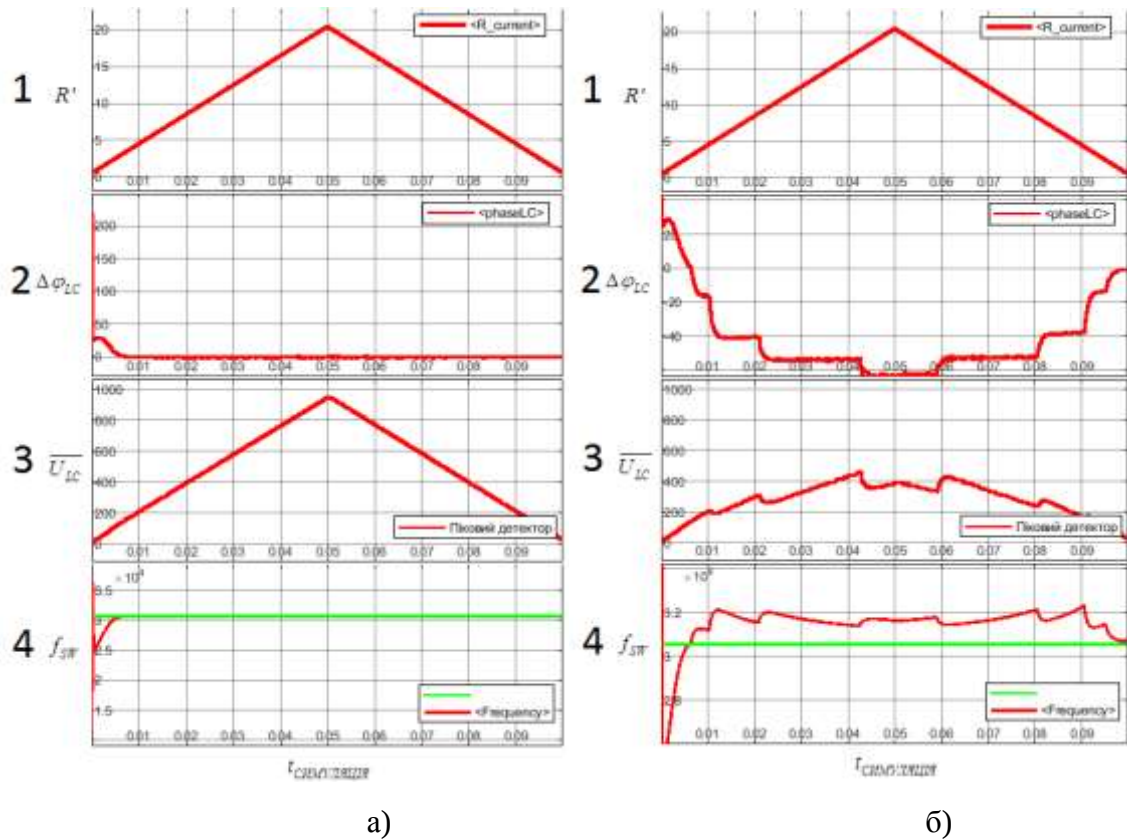
Згідно з результатами, що були отримані в ході останніх симуляцій, можна помітити наступне: звичайна схема ФАПЧ, утримуючи частоту роботи перетворювача біля резонансної частоти КК, забезпечує повну накачку енергії навіть при великих значеннях добротності. В реальних схемах – це гарантований вихід з ладу резервуарних конденсаторів.

В той же час, модернізована схема ФАПЧ з запропонованим блоком ПНФ вводить додатковий сигнал похибки на ФАПЧ, що змушує останній зсувати частоту роботи вгору. Згідно з графіків, що зображені на рис.2.9 (б), амплітуда коливань на виході УІН утримується в межах робочого діапазону напруг ЕРЕ.

Окрім цього, дані результати показують необхідність адаптивної регуляції чутливості схеми ФАПЧ, яка, взагалі, повинна залежати від добротності КК. Це пояснюється тим фактом, що залежність зміни фазового зсуву від зміни частоти пропорційна добротності КК:

$$\Delta\varphi \sim Q \cdot \Delta f .$$

Отже, запропонована модернізована схема ФАПЧ здатна вирішити проблему з надмірною накачкою енергії в резервуарний контур УІН за відсутності навантаження.



а) проста схема ФАПЧ, б) модернізована схема ФАПЧ;

1 – навантаження на УІН; 2 – значення різниці фаз КК;

3 – поточна амплітуда коливань у КК; 4 – поточна робоча частота перетворювача у порівнянні з розрахованою резонансною частотою

Рисунок 3.9 – Результати симуляції роботи УІН з двома різними схемами управління при змінному навантаженні

3.2 Опис експериментальної установки та результати її тестування

Для експериментального дослідження застосовувалась саморобна УІН потужністю до 10кВт. Вона складається з:

- випрямляча вхідної напруги з 3-фазної електромережі;
- знижуючого перетворювача з регульованою вихідною напругою;

– напівмостовий перетворювач на IGBT-модулях, що генерує змінну напругу (рис. 3.10);

– власне КК УІН (рис. 3.11), який живиться через узгоджувальний трансформатор та складається з батареї конденсаторів та індуктора в якості L -елементу контуру.



Рисунок 3.10 – Плата знижуючого та напівмостового перетворювача

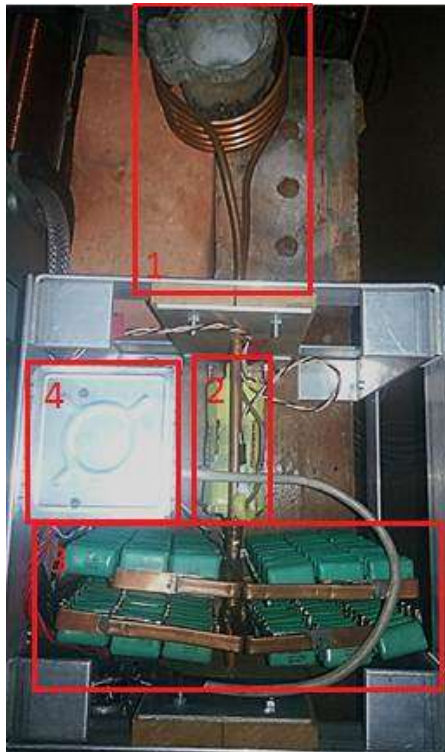
Схема управління складається з двох друкованих плат: плата зняття параметрів КК та головної схеми управління. Плата зняття параметрів КК (рис. 3.12) виконує наступні функції:

– приймання сигналу фази струму КК з диференційного трансформатора струму у поєднанні з датчиком переходу через нуль (рис. 3.12, а);

– зняття значення амплітуди напруги КК за допомогою трансформатора струму (рис. 3.12, б);

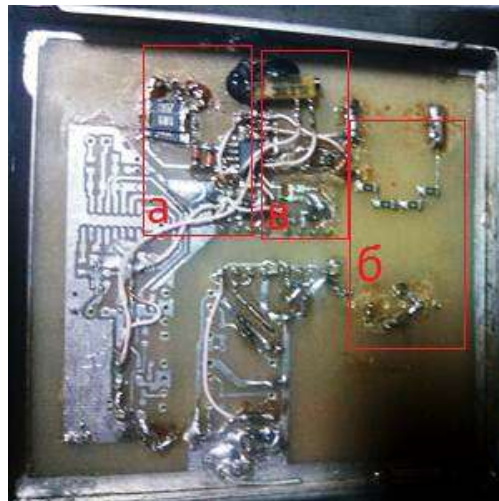
– захисний механізм від перенапруги у КК (рис. 3.12, в), що вимикає перетворювач.

Всі сигнали, які йдуть від плати датчиків, гальванічно ізольовані від інших вузлів.



1) індуктор з тиглем; 2) узгоджувальний трансформатор;
3) конденсаторна батарея; 4) вузол для зняття параметрів КК

Рисунок 3.11 – Блок «КК-індуктор»



а) датчик переходу через нуль сигналу струму КК;
б) трансформатор напруги; в) датчик перенапруги в КК
Рисунок 3.12 – Плата для зняття параметрів КК УІН

Головна схема управління (рис. 3.13) складається з мікроконтролера STM32F334, пікового детектора зі змінним коефіцієнтом підсилення та драйверів керуючих сигналів на перетворювачі напруги. Сигнали на електронні перемикачі передаються через оптичне волокно для підвищення завадо- та відмовостійкості обладнання.

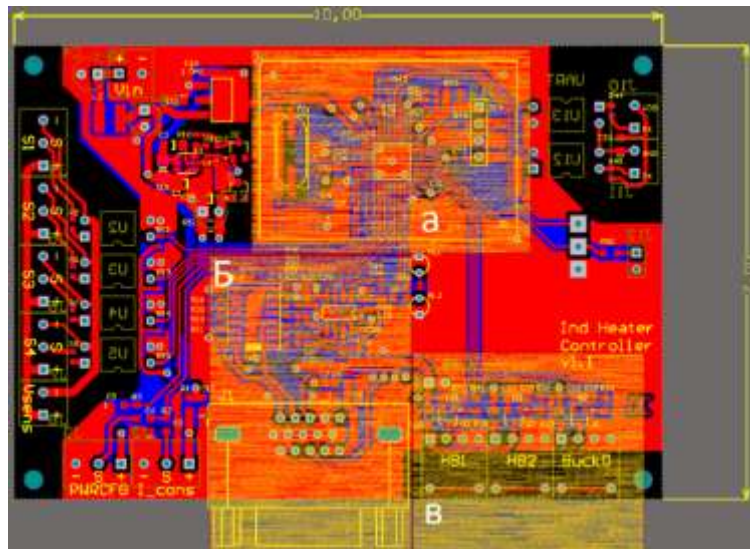


Рисунок 3.13 – Головна плата управління на базі STM32F334 (а)
з піковим детектором (б) та драйверами керуючих сигналів (в)

Наведений МК використовується за наявності в ньому: швидкодіючого процесорного ядра ARM Cortex-M4, який містить блок операцій з рухомою комою (FPU); периферійні підсистеми для керування силовими модулями, до яких входить таймер з високою роздільною здатністю тощо. Цей вибір дозволяє без виділення значних обчислювальних потужностей процесора впровадити алгоритми роботи, що наводяться у підрозділі 3.1 даної записки, а саме:

- алгоритм підрахунку різниці фаз вхідної напруги та струму КК;
- алгоритм ФАПЧ з використанням блоку ПНФ;
- формування керуючих імпульсів для перетворювачів;
- інтерфейс керування та індикації потужності УІН тощо.

Варто відзначити, що впровадження запропонованої модернізації до алгоритму ФАПЧ вносить незначне збільшення часу на його обробку процесором. З цього можна зробити висновок, що таке поліпшення алгоритму не нестиме за собою відчутних змін у швидкодії схеми управління.

Під час експериментальних досліджень було визначено, що вищенаведена установка з використанням запропонованого алгоритму показує таку саму ефективність, як і звичайний алгоритм ФАПЧ. При знаходженні тигля з металом в індукторі частота перетворення дорівнює власній частоті КК з урахуванням тиглю і здійснюється ефективний нагрів (рис. 3.14). У випадку виймання тиглю з індуктора при повній потужності перетворювача, що є аварійною ситуацією, у резервуарному контурі не спостерігаються коливання з надвисокими амплітудами, які могли б вивести з ладу конденсаторну батарею. Разом із незначним збільшенням обчислювальних ресурсів контролера ця модифікація внесе лише позитивні зміни у роботу УІН.



Рисунок 3.14 – Приклад розплаву алюмінію в титановому тиглі з використанням експериментальної УІН

4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Аналіз ринку на наявність можливих споживачів результату дослідження

Проблема, що розглядається в даній роботі, полягає у відсутності дешевих та водночас безпечних рішень використання установки індукційного нагріву (УІН) у сфері малого та середнього бізнесу. Існуючі рішення складаються з:

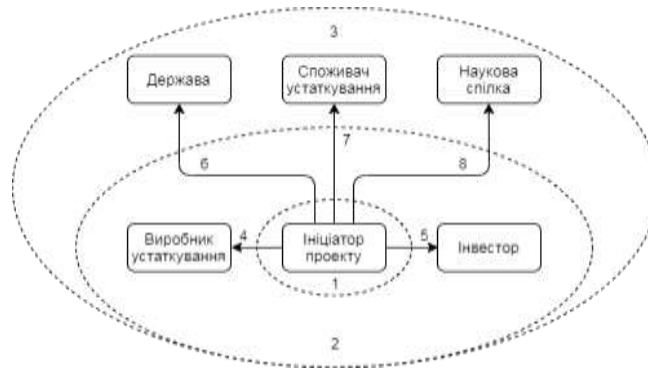
- 1) додаткових та надлишкових схем захисту для забезпечення безпеки як користувача, так і самої установки;
- 2) впровадження змін у технології використання УІН;
- 3) змін у посадових інструкціях та додатковому навчанні персоналу, що працює з установкою.

Перше рішення несе у собі підвищення вартості УІН, тоді як інші вимагають збільшення розмірів фондів підприємства. Таким чином, використання технології індукційного нагріву, хоча і несе збільшення продуктивності виробництва, не має достатньо низької вартості обладнання для значного поширення серед малого та середнього бізнесу.

Дана робота пропонує виробникам даного типу обладнання новітню схему управління, яка дозволяє зменшити витрати на виробництво та обслуговування їх продукції, тим самим збільшити попит на неї. В довгостроковій перспективі головні споживачі цієї техніки – підприємці – зможуть зменшити вартість своєї власної продукції. Додатковим чинником здешевлення служить зменшення фонду технічного обслуговування устаткування. Розробка, перш за все, націлена на сектор малого та середнього бізнесу.

Отже, ініціатором даного проєкту з розробки та її продажі виступає конструкторське бюро розробок, самостійне або підпорядковане, наприклад, інституту або університету.

До сторін, що безпосередньо впливають на хід реалізації проєкту, відносяться як установа, якій підпорядкований ініціатор, так і безпосередній споживач – виробник (виробники) устаткування. Ці сторони можуть бути інвесторами даного проєкту або покупцями цієї розробки (рис.4.1).



- 1) сфера повноважень відповідальності; 2) сфера прямого впливу;
 3) сфера опосередкованого впливу; 4) трансфер технологій;
 5) капіталізація, контроль реалізації; 6) прозорість, репутація, розвиток економіки;
 7) розвиток бізнесу; 8) трансфер знань, досліджень

Рисунок 4.1 – Карта стейкхолдерів

Сторона, що мало впливає, але залежна від результатів, складається з:

- держави або держав, яка має зацікавленість в розвитку економіки в секторі безпосередньо користувачів продукції виробників;
- суб'єктів малого та середнього бізнесу, або кінцеві споживачі результатів розробки;
- наукових організацій та/або установ.

До суб'єктів малого та середнього бізнесу відносяться всі підприємства з виготовлення продуктів із застосуванням термічної обробки та виплавки металів:

- майстерні з металообробки широкого спектру;
- ювелірні фабрики, майстерні;
- виготовлення стоматологічних металічних протезів та інструментів;
- створення моделей кораблів, автомобілів, літаків тощо.

Згідно карти стейкхолдерів, поданій на рис. 4.1, в реалізації даного проєкту зацікавлений широкий спектр стейкхолдерів, що доводить його цінність і практичну значимість в отриманні економічного, соціального та екологічного ефекту.

4.2 Розрахунок витрат на дослідження

Окрім зацікавленості, проєкт, що реалізується, має бути прибутковим. Для попередньої оцінки прибутковості необхідно розрахувати операційні витрати та оцінити вартість для продажу технології, що розробляється.

Операційні витрати включають матеріальних витрат, витрати на оплату праці, відрахування на соціальні заходи, амортизацію та інші операційні витрати.

Витрати на оплату праці включають витрати по оплаті праці виробничого та адмінперсоналу (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Фонд заробітної плати виробничого та адмінперсоналу

Посада	К-сть осіб	Тарифна ставка, грн./год	Ефективний фонд робочого часу, год	Тарифний заробіток, грн.	Розмір премії, грн.	Загальний фонд, грн.	ЄСВ, грн.
Розробник	2	100	300	60000	5000	70000	15400
Складальник	1	75	50	3750	2000	5750	1265
Відладчик	1	60	20	1200	2000	3200	704
Керівник	1	200	150	30000	7000	37000	8140
Юрист	1	150	20	3000	4000	7000	1540
Економіст	1	150	20	3000	4000	7000	1540
Разом						129950	28589

Таким чином, витрати на оплату праці і соціальні заходи складають 158539 грн.

Матеріальні витрати (табл. 4.2) складаються з витрат на внутрішній документообіг та витрати на запчастини для збірки і перевірки експериментального устаткування.

Таблиця 4.2 – Матеріальні витрати проєкту

Найменування	Норматив на 1 од.	Ціна, грн.	Вартість, грн.
Друковані плати	2	3000	6000
Електронні компоненти	1	10000	10000
Матеріали для пайки	1	200	200
Корпус та кріплення	1	1500	1500
Тигель	1	500	500
Канцтовари	1	600	600
Разом			18800

Повна вартість використаних матеріалів складає 18800 грн.

Устаткування та його амортизація вказується в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Амортизація основних ресурсів

Найменування	К-сть, шт	Строк використання, міс.	Строк служби, років	Первісна вартість, грн.	Амортизація, грн.
ПК	4	3	10	15000	1500
Принтер	1	1	5	5000	83
Паяльна станція	1	2	10	3000	50
Мультиметр	1	2	2	1000	83
Осцилограф	1	2	10	25000	417
Програмне забезпечення для розробки	2	3	10	100000	5000
Програмне забезпечення для документообігу	2	1	10	10000	167
Разом					7300

Всього витрат на амортизацію основних засобів – 7300 грн.

Витрати на використані послуги включають плату за комунальні послуги в період реалізації проєкту і наводяться в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Вартість спожитих послуг

Найменування	Тариф, грн.	Спожито од.	Вартість, грн.
Електропостачання обладнання	1,69/кВт*год	450 кВт*год	760,5
Електропостачання експериментального стенду	1,69/кВт*год	50 кВт*год	84,5
Водопостачання	20,77/м ³	5	103,85
Теплопостачання	1233,12/Гкал	0,5	616,56
Разом			1565,41

Загальна вартість спожитих послуг становить 1565,41 грн.

Таким чином, отримуємо повний кошторис витрат на реалізацію проєкту (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Кошторис витрат

Найменування типу витрат	Витрати, грн.
Матеріальні витрати	18800
Витрати на оплату праці	129950
Відрахування на соціальні заходи	28589
Амортизація	7300
Інші операційні витрати	1565,41
Разом	186204,41

4.3 Оцінка економічного ефекту від впровадження результатів дослідження

Економічний ефект на основі реалізації проєкту можливо розглянути на основі реальних установок і їх середньої ціни. Середній строк служби індукційної печі складає 10-12 років, а середня вартість на УІН потужністю 4кВт станом на кінець 2020 року – 220 тис. грн.

Для продажу розробки виробникам установок необхідно врахувати до собівартості розробки ПДВ, прибуток та податок на цей прибуток. ПДВ становить:

$$ПДВ = 20\% \cdot СВ_{розробка} = 0,2 \cdot 186204,41 = 37240,89(\text{грн.}).$$

Прибуток розраховується як 30% від собівартості, а податок на нього, станом на 2020 рік, становить 18%:

$$ПР = 0,3 \cdot СВ_{розробка} = 55861(\text{грн.}),$$

$$Под_{ПР} = 0,18 \cdot ПР = 55861 \cdot 0,18 = 10055(\text{грн.}).$$

Отже, вартість розробки буде складати:

$$В_{розробка} = СВ_{розробка} + ПДВ + ПР = 186204,41 + 37240,89 + 55861 = 279306,3(\text{грн.}),$$

з чистим прибутком для бюро розробок:

$$ЧПР = ПР - Под_{ПР} = 55861 - 10055 = 45806(\text{грн.}).$$

При впровадженні запропонованої розробки собівартість установки збільшиться згідно з додатковими витратами:

- оплата додаткової праці конструктора-розробника та технолога – 8000 грн.;
- витрати на додаткові матеріали та запчастини – 4000 грн.

Витрати, пов'язані з організацією масового виробництва, можна не враховувати внаслідок дуже незначних змін у технологічному процесі виробництва УІН.

Таким чином, нова собівартість становитиме 232 тис. грн., тобто збільшиться на:

$$\left(\frac{232}{220} - 1\right) \cdot 100\% = 5,4\%.$$

Дана розробка зменшує ймовірність виходу з ладу обладнання. Це дозволяє збільшити строк служби УІН приблизно на 5 років. Підприємець, що використовує УІН як основний засіб, зменшує свої щорічні витрати на амортизацію на:

$$\frac{CB_{ст.}}{T_{сл.ст.}} - \frac{CB_{нов.}}{T_{сл.нов.}} = \frac{220}{12} - \frac{232}{17} = 18,3 - 13,65 = 4,65 (\text{тис.грн.}),$$

де $CB_{ст.}$ та $CB_{нов.}$ – собівартість старої та нової моделі УІН відповідно;

$T_{сл.ст.}$, $T_{сл.нов.}$ – строк служби, років.

Звідси, за строк служби нової УІН підприємець здатний лише на зменшенні амортизаційних втрат зменшити свої витрати на:

$$\Delta \text{Витр}(T_{сл.нов.}) = 4,65 \cdot 17 = 79,05 (\text{тис.грн.}).$$

Окупність розробки і її впровадження в УІН за 17 років (збільшений строк служби) настає при виробництві та експлуатації лише:

$$\begin{aligned} N_{\text{окупність}} &= \frac{B_{\text{розробка}}}{\Delta \text{Витр}(T_{сл.нов.}) - (CB_{нов.} - CB_{ст.})} = \\ &= \frac{279306,3}{79050 - 12000} = 4,165 \approx 5 (\text{од.}) \end{aligned}$$

установок.

Даний розрахунок проводився з припущенням продажі розробки лише одному виробнику та впровадженню даної розробки лише в одну модель УІН. В реальності число виробників, об'єм виробництва УІН та попит на них є набагато більшими, тому дана розробка має окупитись значно швидше.

Виходячи з цього, реалізація даного проєкту вирішує наступні питання:
– економічні – зменшення витрат на експлуатацію, техогляд;

- соціальні – збільшення захищеності робітників внаслідок зменшення ймовірності аварійних ситуацій;

- екологічні – збільшення строку служби зменшує витрати на утилізацію відпрацьованого обладнання.

Отже, дана розробка є доцільною і має значний економічний ефект у цілому.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз потенційних небезпек

В даній роботі розглядається розробка та застосування нової схеми управління установки індукційного нагріву, тому для досягнення результату можлива наявність наступних видів робіт:

- 1) розробка моделі та її моделювання з використанням комп'ютерних технологій;
- 2) розробка та конструювання експериментальної установки індукційного нагріву;
- 3) монтаж експериментального обладнання з під'єднанням електроживлення та захисного заземлення;
- 4) експериментальні дослідження з розплавлення та нагріву металевих деталей і зразків.

Відповідно до ГОСТ 12.0.003-74 «ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [19], вищенаведені роботи мають такі можливі небезпечні фактори:

- підвищена запиленість чи загазованість повітря робочої зони. При нагріванні металів до високих температур збільшується концентрація продуктів контакту з повітрям: дим тощо;
- підвищена температура поверхонь обладнання, матеріалів. Експериментальна установка розігріває деталі до високих температур, що є частиною її роботи;
- підвищена температура повітря робочої зони. Нагрів матеріалів та поверхонь непрямим чином викликає нагрів повітря;
- підвищене значення напруги в електричному ланцюгу, замикання якої може відбутися через тіло людини. В робочій зоні присутні напруги до 1000В змінного струму;

- підвищений рівень електромагнітних випромінювань, напруженість магнітного поля. Установка працює за рахунок великих рівнів змінного магнітного поля для нагріву металів та сплавів;
- токсичні та подразнюючі хімічні речовини. Продукти горіння кольорових металів та забруднень на поверхні деталей мають токсичний та/або подразнюючий характер;
- статичні фізичні перенапруження організму. Пов'язане перш за все з довготривалою сидячою роботою розробників з використанням ЕОМ;
- розумове перенапруження організму. Потребує значних розумових ресурсів для виконання роботи з проектування та розробки.

Також слід зазначити за підвищену пожежонебезпеку в приміщенні, де знаходиться експериментальна установка. Ця можлива небезпека пов'язана як з нагрівом тіл вище температури займання горючих матеріалів та з можливою несправністю електрообладнання.

До потенційних небезпек, пов'язаних з наслідками надзвичайних ситуацій, відносять можливу невідповідність персоналу в умовах НС.

Таким чином, існують потенціальні джерела небезпек, які можуть нести загрози здоров'ю та життю працівників. Заходи з підвищення безпеки будуть у трьох напрямках:

- забезпечення техніки безпеки;
- виробнича санітарія та гігієна праці;
- забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях.

5.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

Для дотримання техніки безпеки робітниками проводять інструктажі та навчання з питань охорони праці згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці» [20]. До цих навчань включають відомості щодо:

- поводження з електроустаткуванням, що знаходиться під високою напругою;

- поводження з інструментом та обладнанням, що є джерелом високої температури;
- використання запобіжних заходів, засобів захисту від ураження струмом, впливу летких речовин у повітрі, високих температур та випромінювань;
- інструктажі з пожежної безпеки, правила поводження у надзвичайних ситуаціях;
- навчання з підвищення якості та безпеки праці з використанням ЕОМ.

Заходи безпеки інженерів-розробників, операторів ЕОМ складаються з належного стану робочого місця та електробезпеки. Відповідно до НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин» [21], робоче місце з ЕОМ повинно:

- займати площу не менше 6 м^2 та об'єм 20 м^3 ;
- мати відстань між бічними поверхнями комп'ютера має бути не менше за 1,2 м;
- мати відстань між тильною поверхнею одного комп'ютера та екраном іншого не повинна бути меншою за 2,5 м;
- мати прохід між рядами робочих місць має бути не меншим 1 м.

При площі приміщення 35 м^2 та його об'ємі 80 м^3 , згідно вищезазначеної норми, може бути обладнане 4 робочими місцями, що відповідає кількості основного персоналу.

Захист від ураження електричним струмом проводиться відповідно до ДБН В.2.5-27-2006 «Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд» [22], ДСТУ 7237: 2011 «Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту» [23]. До цих заходів включають:

- розташування розеток на висоті не менше 0,2 м від підлоги, вимикачів – не нижче 1,2 м від підлоги;

- захисне заземлення металічних корпусів обладнання, елементів опалення;
- обладнання кожного робочого місця достатньою кількістю розеток 220/380В з використанням електрокабелів з достатньою для навантаження площині поперечного перерізу провідників;
- розетки та вилки обладнання повинні мати три (для однофазної напруги 220В) або п'ять контактів (для 3-фазної напруги 380В): фаза/фази, нуль, захисна земля;
- використання підлоги з ізоляційними властивостями (лінолеум тощо);
- наявність захисного заземлення в приміщеннях, опір якого не перевищує 4 Ом для мережі 380/220В;
- зменшення ризику дотику до струмоведучих частин обладнання за допомогою електроізоляції цих частин;
- зміна, монтаж та ремонт експериментальної установки проводиться лише при відсутності напруги живлення.

Використання устаткування для пайки пов'язане з впливом високих температур та виділенню їдких та токсичних речовин в процесі. Для зменшення застосовуються:

- використання сплавів припою, що не мають у своєму складі Свинцю та інших токсичних елементів;
- штучна вентиляція, витяжки в місці пайки;
- використання безпечних або найменш токсичних флюсів в процесі пайки;
- за можливості – зменшення часу ручної пайки з використанням обладнання для автоматичного монтажу ЕРЕ.

5.3 Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці

До заходів виробничої санітарії та гігієни праці відносять:

- дотримання належних умов мікроклімату робочого місця;
- зменшення шкідливого впливу обладнання та ЕОМ;

– зменшення напруженості праці робітників та впливу на психо-фізичний стан.

До умов мікроклімату відносять: температура, вологість, чистота повітря, освітленість тощо.

Оптимальний стан повітря для приміщення, де знаходяться ЕОМ (згідно ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [24]):

- температура – у холодну пору року $19-23^{\circ}\text{C}$, у теплу – $12-25^{\circ}\text{C}$;
- вологість – 40-60%, не більше 75%;
- швидкість руху повітря – 0,2-0,4 м/с.

Для підтримки параметрів повітря в приміщенні з ЕОМ встановлюють кондиціонери з повітряними фільтрами для теплого періоду та системи опалення в зимній. Повітряні фільтри встановлюються для контролю рівня пилу у приміщенні для збільшення строку служби техніки.

Розрахунок необхідного повітрообміну в виробничих приміщеннях проводиться залежить від:

- кількості постійно працюючих робітників у приміщенні;
- наявності установок, обладнання, технологічних процесів, пов'язаних з виділенням тепла;
- умови, пов'язані з виділенням небезпечних речовин у повітря.

Необхідний повітрообмін у приміщенні, де знаходяться робочі місця розробників та операторів ЕОМ, за відсутності джерел тепла та небезпечних речовин розраховується за формулою:

$$L_1 = l \cdot n = 30\text{м}^3 / \text{год} \cdot 3 \text{ ос.} = 90\text{м}^3 / \text{год},$$

де l – нормований повітрообмін на одну особу відповідно до санітарних норм;

n – кількість постійно працюючих робітників в приміщенні ЕОМ.

Таким чином, у приміщенні ЕОМ, розміри якого складають 6х4х3м при його об'ємі

$$V_{EOM} = 6 \cdot 4 \cdot 3 = 72 \text{ м}^3$$

коефіцієнт кратності повітрообміну k буде лежати в межах $1 \leq k \leq 10$. Отже, дане приміщення потребує лише організованої природної вентиляції.

Для приміщення, де знаходиться експериментальна установка, висувуються додаткові умови щодо штучної вентиляції для підтримання концентрації шкідливих речовин внаслідок нагрівання металічних деталей на рівні нижчому за ГДК, а також охолодження повітря від нагріву повітря.

Для цього, у випадку плавлення та термообробки цинку та його сполучень, при ГДК сполучень цинку (ГДК цинку оксид – $0,5 \text{ мг} / \text{м}^3$) та розмірів цього приміщення $A_1 = 10 \text{ м}$, $B_1 = 5 \text{ м}$, $C_1 = 3 \text{ м}$ циркуляція повітря повинна складати:

$$L_3 = \frac{G \cdot 3600}{q_{ГДК} - q_{np}} = \frac{0,7 \cdot 3600}{0,5 - 0,1 \cdot 0,5} = 5600 (\text{м}^3 / \text{год})$$

де G – кількість шкідливих речовин, що виділяється при роботі, $\text{мг} / \text{с}$;

$q_{ГДК}$ – гранично допустима концентрація речовини, що виділяється, $\text{мг} / \text{м}^3$;

q_{np} – концентрація речовини в припливному повітрі, $\text{мг} / \text{м}^3$.

У випадку плавлення з виділенням нетоксичних сполук розрахунок циркуляції повітря виходить з потужності експериментальної установки, яка складає $P_{уст} = 15 \text{ кВт}$:

$$L_6 = \frac{Q \cdot 3600}{C \cdot \rho \cdot (T_{вуд} - T_{np})} = \frac{15 \cdot 3600}{1,1 \cdot 1,2 \cdot (60 - 18)} = 1071 (\text{м}^3 / \text{год})$$

де Q – надлишок теплоти в приміщенні, кВт ;

C – теплоємність повітря, що дорівнює $1 \text{ кДж} / \text{кг} \cdot ^\circ \text{C}$;

ρ – густина припливного повітря, що дорівнює $1,2 \text{ кг} / \text{м}^3$;

$T_{вид}$ – температура повітря, що видаляється;

$T_{пр}$ – температура повітря, що надходить в приміщення.

Для безпечності мікроклімату для працівників використовується найбільше значення L яке, в даному випадку, буде мати значення:

$$L = L_3 = 5600 \text{ м}^3 / год .$$

Відповідне цьому значення коефіцієнт кратності повітрообміну k розраховується за формулою:

$$k = \frac{L}{V_{прим.}} = \frac{L}{A_1 \cdot B_1 \cdot C_1} = \frac{5600}{10 \cdot 5 \cdot 3} = 37,3.$$

Розраховане значення коефіцієнту кратності повітрообміну показує необхідність використання штучної механічної вентиляції в промисловому приміщенні для підтримки температури і концентрації шкідливих речовин у межах санітарних норм.

Рівень освітлення в обох приміщеннях, відповідно до ДБН В.2.5–28:2018 «Природне та штучне освітлення» [25], повинне становити не менше 400 лк.

Проектно-конструкторська діяльність пов'язана зі збиранням електронних схем на друкованих платах, що включає процес пайки. Для попередження впливу токсичних припоїв, флюсів останні зберігаються в щільній тарі, використовуються застосування спец одягу, витяжної вентиляції, виконання правил особистої гігієни тощо.

Ця діяльність також пов'язана з використанням ЕОМ, що, окрім випромінювання, викликають значне напруження очей, кістково-м'язові порушення від статичної м'язової напруженості та нервово-емоційне навантаження.

Для попередження профзахворювань зору рекомендується використовувати такі екрани, щоб:

- символи на екрані чіткі і добре розрізняються;
- зображення позбавлене блимання;
- яскравість та / або контрастність легко регулюються;
- екрани вільні від відблисків і відбиття;
- випромінювання знижені до надзвичайно малих рівнів.

Для попередження проблем з опорно-руховим апаратом, а також від нервово-емоційних навантажень рекомендуються часті активні відпочинки, організація ергономічного розташування ЕОМ.

Активний відпочинок повинен включати комплекс гімнастичних вправ, спрямованих на:

- зняття нервового напруження;
- м'язове розслаблення;
- відновлення функцій фізіологічних систем, що порушуються протягом трудового процесу;
- зняття втоми очей;
- поліпшення мозкового кровообігу і працездатності.

Для захисту оператора експериментальної установки від змінних магнітних полів експериментальна установка конструюється з використанням екранів, а панель управління розташовується на відстані від джерела випромінювань та полів.

Окремої уваги потребують заходи зі зменшення впливу важкості та шкідливості роботи працівників. Робота розробників потребує великої кількості розумових ресурсів працівників для творчої діяльності та вирішення завдань за відсутності алгоритмів, тому працівники потребують додаткової оплати за напруженість праці або впровадження робочого розкладу, за якого вплив даних факторів мінімізується.

5.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

5.4.1 Заходи з пожежної безпеки

Заходи з пожежної безпеки для приміщення з ЕОМ та приміщення з експериментальною установкою відрізняються, так як перше приміщення належить класу пожежонебезпечності Д, тоді як приміщення з установкою – до класу Г, відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків, установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [26].

Згідно ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [27], клас вогнестійкості приміщень повинен бути не менше ІІІ.

Клас можливої пожежі в обох приміщеннях – Е (горіння електроустановок під напругою до 1000В). Джерелами пожежонебезпеки в цих приміщеннях – ЕОМ та експериментальна установка.

За ДНАОП 0.00-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» [28], для попередження пожеж використовуються автоматичні вимикачі, запобіжники для від'єднання від електромережі обладнання, що вийшло з ладу. Приміщення побудоване відповідно до норм електробезпеки, за яких струмоведучі частини, розетки тощо не будуть перегріватися від перенавантаження.

Для первісного пожежогасіння використовуються вуглекислі вогнегасники ВВК-1.4 місткістю 5 л: по 2 шт. в кожному приміщенні. Вибір пов'язаний з основним можливим джерелом пожежі – електроустаткуванням.

У приміщеннях встановлена порогова охоронно-пожежна сигналізація. Вона може працювати як автономно, так і в складі комплексної системи безпеки спільно з відеоспостереженням, контролем доступу і системою підвищення ефективності управління. Істотно розширюються можливості по управлінню обладнанням і обробці інформації, що надходить – при наявності модулів «Моніторинг» або «Центральний пост» на моніторі охоронця

автоматично видається інформація про пожежу із зазначенням місця його виникнення на графічному плані підприємства. В охоронюваних приміщеннях встановлюються порогові пожежні або охоронні сповіщувачі, які об'єднуються в шлейфи сигналізації і підключаються до головної панелі.

Таким чином, обладнання відповідає вимогам пожежної безпеки відповідно до [28].

5.4.2 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

До заходів безпеки у надзвичайних ситуаціях включають заходи із забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту. За принципом дії засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) поділяються на фільтруючі (доступ до навколишнього середовища через фільтруючі засоби) та ізолюючі (повна ізоляція шкіри та органів дихання від середовища) і класифікуються відповідно до рис. 5.1.

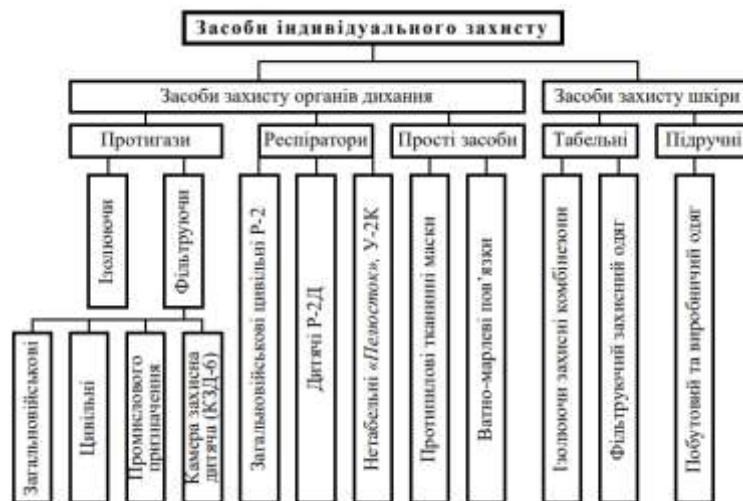
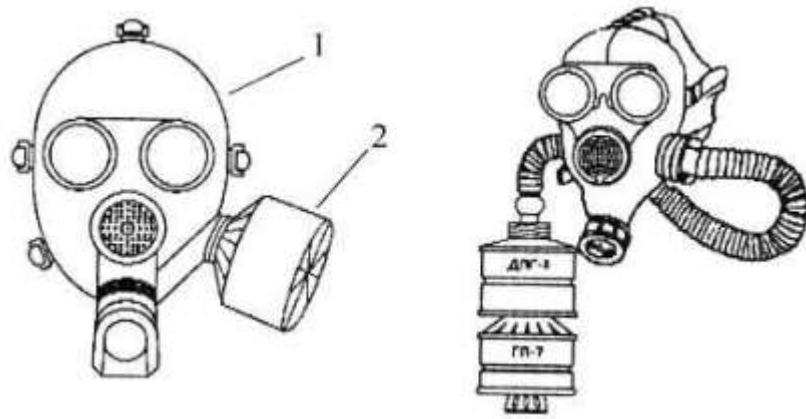


Рисунок 5.1 – Класифікація ЗІЗ [32]

Для захисту органів дихання використовуються протигази ГП-7 (рис. 5.2), які є більш новою альтернативою ГП-5. Даний протигаз укомплектований змінними фільтрами.



1) шолом-маска; 2) фільтропоглинаюча коробка

Рисунок 5.2 – Цивільний протигаз ГП-7

Фільтр складається з металевої оболонки, заповненої протидимовим фільтром та вуглецевим порошком. Повітря спочатку проходить через протидимовий фільтр, де воно очищується від крапель, аерозолів, пилу, а залишок отруйних речовин поглинається вугільним порошком (на 1г порошку до 0,5г отруйних речовин).

У якості засобу захисту шкіри використовуються комплекти легких захисних костюмів Л-1 (рис. 5.3).



Рисунок 5.3 – Легкий захисний костюм Л-1

Даний костюм виготовлений з прогумованої тканини і складається з куртки з капюшоном, брюк з панчохами, двопалих рукавичок і

підшоломника. В комплект входить сумка для перенесення костюма і запасна пара рукавичок.

Розмір ЗІЗ підбирається для кожного робітника окремо.

Також до засобів індивідуального захисту відносять засоби медичного захисту:

- аптечка індивідуальна АІ-2, що забезпечена засобами для надання самопомогі і взаємодопомогі при пораненнях, опіка, зниження впливу отруйних речовин, бактеріальних засобів та іонізуючого випромінювання;
- індивідуальний перев'язочний пакет ІПП – для накладання первинних пов'язок на рани;
- індивідуальний протихімічний пакет ІПП-8, ІПП-51 – для знезараження отруйних речовин в крапельно-рідинному стані, що потрапили на відкриті ділянки тіла і одяг.

У якості організаційних заходів проводяться інструктажі та навчання з поводження у надзвичайних ситуаціях, зокрема:

- правила поводження та евакуації під час НС;
- правила використання ЗІЗ.

Отже, при виконанні всіх заходів безпеки та охорони праці ймовірність можливих небезпек знижується, а їх вплив на здоров'я працівників мінімізується.

ВИСНОВКИ

За результатами роботи були зроблені наступні висновки:

- основний напрям розробок в сфері індукційного нагріву – підвищення ККД та зменшення розмірів установок;
- сучасні схеми управління бюджетних установок не мають швидких захисних механізмів для захисту обладнання від випадків аварійних ситуацій;
- використання передавальної характеристики коливального контуру дозволяє отримати покращену схему фазового автопідлаштування частоти з регулюванням, окрім частоти, напруги на навантаженні;
- модернізована схема ФАПЧ дозволяє утримувати амплітудне значення напруги на резервуарному контурі у межах робочого діапазону напруг радіоелементів, що використовуються в ньому, незалежно від вхідної напруги та добротності контуру;
- використання ФАПЧ для підтримки резонансної частоти КК потребує використання адаптивної чутливості ФАПЧ в залежності від поточної добротності контуру для стабільності та швидкодії роботи цього вузла керування;
- наведена покращена схема управління УІН показала свою працездатність в реальному обладнанні;
- впровадження запропонованої схеми управління не потребує значних змін у програмі та загальній схемі пристрою, а також впливає на швидкодію системи незначним чином;
- попередній економічний розрахунок показує, що дана модифікація має короткий строк окупності та є економічно важливою розробкою;
- можливе використання модернізованої схеми ФАПЧ для інших випадків застосування явища резонансу в силовій електроніці: резонансні топології, бездротова зарядка тощо.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Слухоцкий А.Е. Установки индукционного нагрева: учебное пособие для вузов [Текст] / А.Е.Слухоцкий, В.С.Немков, Н.А.Павлов, А.В.Бамунэр. – Л.: Энергоиздат, 1981. – С.6.
2. Simpson P.G. Induction heating coil and system design / P.G. Simpson. – McGraw-Hill book company, Inc., 1960. – P.210.
3. Celem Water-Cooled polypropylene high frequency power capacitor – CSP 1000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.celem.com/csp_1000.
4. Rashid M.H. Power electronics handbook. 4th Edition / M.H. Rashid. – Elsevier, Inc., 2018. – P. 95-155, 291, 339-349.
5. Push Pull Converter Application Notes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mpsind.com/product-resources/push-pull-converter-applications-notes/>.
6. Кухтецкий С.В. Простой лабораторный инвертор для индукционного нагрева. Часть 2 [Текст] / С.В. Кухтецкий. – Красноярск: Институт химии и химической технологии, СО РАН, 2010. – 21 с.
7. High frequency Induction heating [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.richieburnett.co.uk/indheat.html>.
8. Lucia O. Induction Heating Technology and its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges / O. Lucia, P. Maussion, E. Dede, J.M. Burdio // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Vol. 61 (№5). – P.2509-2520.
9. Kifune H. Cost effective phase shifted pulse modulation soft switching high frequency inverter for induction heating applications / H. Kifune, Y. Hatanaka, M. Nakaoka // IEE Proc.-Electr. Power Appl. – Vol. 151, No. 1. – January 2004. – P.19-25.
10. Esteve V. Improving the Reliability of Series Resonant Inverters for Induction Heating Applications / V. Esteve, J. Jordán, E. Sanchis-Kilders, Enrique

J. Dede, E. Maset, J.B. Ejea and A. Ferreres // IEEE Transactions on industrial electronics. – Vol. 61, No. 5. – May 2014. – P.2564-2572.

11. Nawaz M.A. Power Control Scheme of a Medium Frequency Induction Furnace [Text] / M.A. Nawaz. – Lahore: Department of Electrical Engineering University of Engineering and Technology, August 2017. – 131 p.

12. Segura G.M. Induction heating converter's design, control and modeling applied to continuous wire heating [Text] / G.M. Segura. – Barcelona, June 2012. – 226 p.

13. Prasad S.V.M. Investigation on class-D inverter fed induction heater [Text] / S.V.M. Prasad. – Dr. M.G.R. Educational and research institute university, December 2009. – 129 p.

14. Ward D.A. Using Rogowski coils for transient current measurements / D.A. Ward, J.La T. Exon // Engineering science and education journal. – June 1993. – P. 105-113.

15. Ряд Фурье [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.dsplib.org/content/fourier_series/fourier_series.html.

16. Белоцерковский Г.Б. Основы радиотехники и антенны. Часть 1. Основы радиотехники [Текст] / Г.Б. Белоцерковский. – М.: «Советское радио», 1969. – С. 121-146.

17. Калиніченко Д.В. Мікропроцесорне керування процесами індукційного нагріву в установках для плавлення та термічної обробки металів / Д.В. Калиніченко // Всеукраїнський конкурс на кращу студентську наукову роботу 2019/2020 навчального року. – 2019. – 29 с.

18. Borage M. A 25kW, 25kHz Induction Heating Power Supply for MOVPE System Using L-LC Resonant Inverter / M. Borage, S. Tiwari. – Raja Ramanna Centre for Advanced Technology, 2013. – P. 7-9.

19. ГОСТ 12.0.003-74. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2002. – 7 с.

20. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. – К.: Держкомітет з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду. – 2005. – 35 с.

21. НПАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин. – К.: Держкомітет з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду. – 2010. – 10 с.

22. ДБН В.2.5-27-2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. – К.: Мінбуд України. – 2006. – 156 с.

23. ДСТУ 7237: 2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту. – К.: Держспоживстандарт України. – 2011. – 9 с.

24. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартів безпеки праці (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – 1988. – 111 с.

25. ДБН В.2.5–28:2018. Природне та штучне освітлення. – К.: Мінбуд України. – 2018. – 137 с.

26. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків, установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – К.: Мінрегіон України. – 2016. – 34 с.

27. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. – К.: Мінбуд України. – 2017. – 39 с.

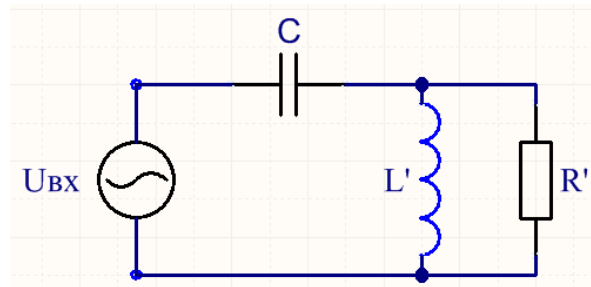
28. ДНАОП 0.00-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – К.: Мінпраці та соцполітики України. – 2001. – 74 с.

29. Методичні вказівки до лабораторного заняття «Дослідження захисних властивостей засобів індивідуального захисту населення» з дисципліни «Цивільний захист і охорона праці в галузі» для студентів усіх спеціальностей будь-якої форми навчання / М.О. Журавель, С.М. Журавель. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 28 с.

Додаток А

Виведення формул передавальної характеристики коливального контуру

Для побудови ПХ КК використовується схема, зображена на рис. А.1.



R' , L' - значення опору та індуктивності, що спостерігається джерелом
вхідної напруги

Рисунок А.1 – Еквівалентна схема блоку «КК-індуктор-зразок»
з послідовним КК

Використовуючи $p = j\omega$, де j – уявна одиниця, отримуємо:

$$K(p) = \frac{U_{R'}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{pL' \parallel R'}{\frac{1}{pC} + pL' \parallel R'}. \quad (\text{A.1})$$

Розкриваючи дужки та зводячи до одного знаменника многочлени в чисельнику та знаменнику формули (А.1), отримуємо:

$$K(p) = \frac{p^2 R' L' C}{(pL' + R' + p^2 R' L' C)}. \quad (\text{A.2})$$

Проведемо зворотню заміну $j\omega = p$ (А.2) отримує вигляд:

$$K(j\omega) = \frac{-\omega^2 R' L' C}{(j\omega L' + R' - \omega^2 R' L' C)} \quad (\text{A.3})$$

Для отримання чистого комплексного вигляду чисельник і знаменник множиться на комплексно спряжене знаменника, тоді:

$$K(j\omega) = \frac{\omega^2 R' L' C (R' - \omega^2 R' L' C - j\omega L')}{\omega^2 L'^2 - (R' - \omega^2 R' L' C)^2},$$

звідси реальна і уявна складові становитимуть:

$$\text{Re}[K(j\omega)] = \frac{\omega^2 R' L' C (R' - \omega^2 R' L' C)}{\omega^2 L'^2 + (R' - \omega^2 R' L' C)^2},$$

$$\text{Im}[K(j\omega)] = \frac{\omega^2 R' L' C (-\omega L')}{\omega^2 L'^2 + (R' - \omega^2 R' L' C)^2}.$$

Введемо заміну $Y = R' \cdot \omega C$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$, $X_{L'} = \omega L'$ та:

$$a(\omega) = \frac{\omega^2 R' L' C}{\omega^2 L'^2 + (R' - \omega^2 R' L' C)^2} = \frac{Y \omega L'}{\left(\frac{Y}{\omega C} - Y \omega L'\right)^2 + \omega^2 L'^2}.$$

Таким чином, реальна і уявна складові матимуть вигляд:

$$\text{Re}[K(j\omega)] = a(\omega)(R' - Y \omega L'),$$

$$\text{Im}[K(j\omega)] = a(\omega)(-\omega L').$$

Відповідно до цього, АЧХ та ФЧХ будуть дорівнювати:

$$|K(\omega)| = \frac{Y \cdot X_{L'} \sqrt{Y^2 (X_C - X_{L'})^2 + X_{L'}^2}}{Y^2 (X_C - X_{L'})^2 + X_{L'}^2} = \frac{Y \cdot X_{L'}}{\sqrt{Y^2 (X_C - X_{L'})^2 + X_{L'}^2}},$$

$$\arg(K(\omega)) = \arctg\left(Y \frac{X_C - X_{L'}}{X_{L'}}\right).$$

Додаток Б

Лістинг програм та моделей для симуляції запропонованої схеми управління УІН

Головна програма *main.m*:

```
global C_lc L_lc fResonance RLoad USupply U_LC D Ucmx matchTransfN
Ucmx = 1000;
matchTransfN = 20;
C_lc = 12 * 16 * 0.047e-6;
% pd = makedist('Normal');
L_lc = 3e-6;
%
% abs(random('Normal',0,1))*5e-6;
RLoad = 20;
USupply = 380 * sqrt(2);
D = 1;
global RegulationOn
RegulationOn = 0;
fResonance = resonanceFind();
fResonanceIdeal = 1 / (2 * pi * sqrt (L_lc * C_lc));
i = 1;
Y(i) = 0.1;
while (Y(i) < (0.6*Ucmx*matchTransfN/USupply))
    i = i+1;
    Y(i) = 0.1 + 1.5^(i-1);
end
for j=1:i
    U_lc(j)= USupply / matchTransfN * Y(j);
    frequency_lc(j) = freqFindY(Y(j), j);
    phase_lc(j) = phaseY(frequency_lc(j), Y(j)) * -180 / pi;
end
plot(U_lc,phase_lc);
```

Підпрограма *resonanceFind.m*:

```
function [found] = resonanceFind()
global C_lc L_lc RLoad USupply D matchTransfN
maxVal = 0;
Frequency = 100000;
currentVal = abs(transferFunc(Frequency)) * USupply * D / matchTransfN;
while (currentVal >= maxVal)
    maxVal = currentVal;
    Frequency = Frequency - 10;
    currentVal = abs(transferFunc(Frequency))* USupply * D /
matchTransfN;

end
found = Frequency;
end
```

Підпрограма *transferFunc.m*:

```
function [outputArg1] = transferFunc(f)
global C_lc L_lc RLoad
p = 2i .* pi .* f;
outputArg1 =(p.^2 .* RLoad .* L_lc .* C_lc) ./ (p.*L_lc + RLoad + p.^2
.* RLoad .*L_lc .* C_lc);
end
```

Підпрограма *freqFindY.m*:

```
function [outputArg1] = freqFindY(Q, i)
global C_lc L_lc fResonance USupply U_LC D Ucmx matchTransfN
freq = fResonance + 50;
if (Q <= 1)
    outputArg1 = freq;
end
freq = fResonance + 20;
mod = modK_Y (freq, Q);
while (mod >= i)
    freq = freq + 20;
    mod = modK_Y (freq, Q);
end
outputArg1 = freq;
end
```

Підпрограма *modK_Y.m*:

```
function [outputArg1] = modK_Y(f, Yref)
global C_lc L_lc
p = 2i .* pi .* f;
R = Yref ./ (p .* C_lc);
Xc = 1 ./ ( p .* C_lc);
Xl = p .* L_lc;
Y = p .* C_lc .* R;
outputArg1 = Y .* Xl ./ (sqrt (Y.^2 .* (Xc + Xl).^2 + Xl.^2) );
end
```

Підпрограма *phaseY.m*:

```
function [outputArg1] = phaseY(f, Yref)
global C_lc L_lc
p = 2 .* pi .* f;
R = Yref ./ (p .* C_lc);
Xc = 1 ./ ( p .* C_lc);
Xl = p .* L_lc;
Y = p .* C_lc .* R;
a = (Xc - Xl) ./ Xl;
outputArg1 = atan(Y .* a);
end
```

Вигляд основної системи змодельованої в програмному пакеті Simulink наведений на рис. Б.1. Структури всіх наявних підсистем наведені на рис. Б.2-6.

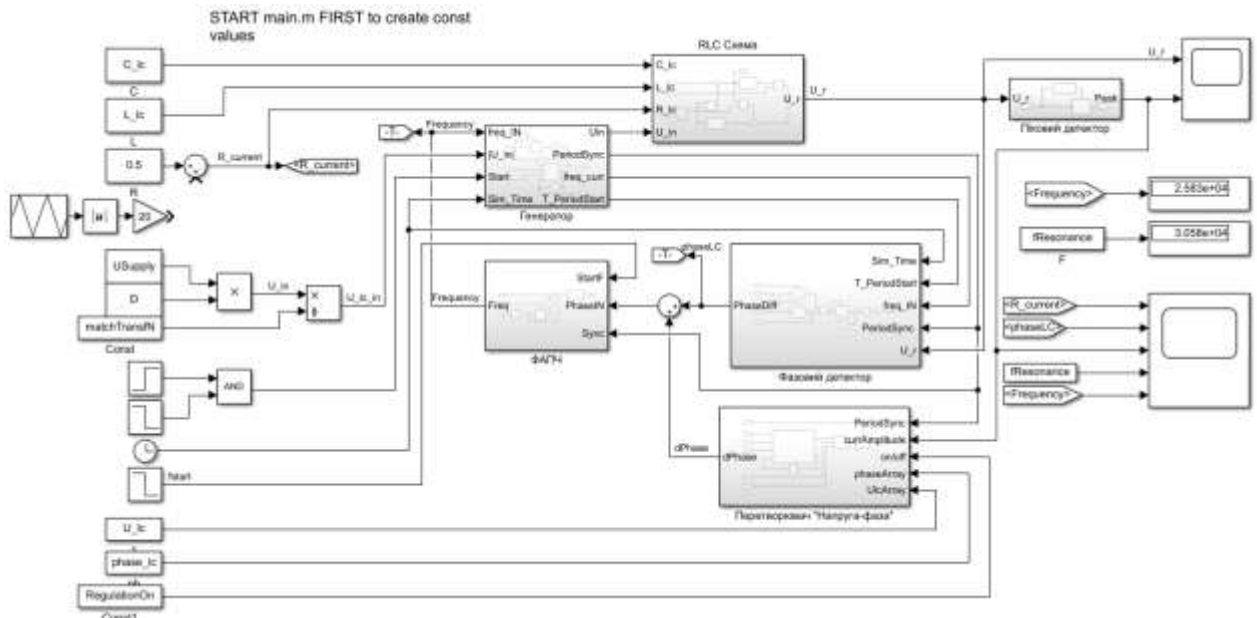


Рисунок Б.1 – Система управління УН в Simulink

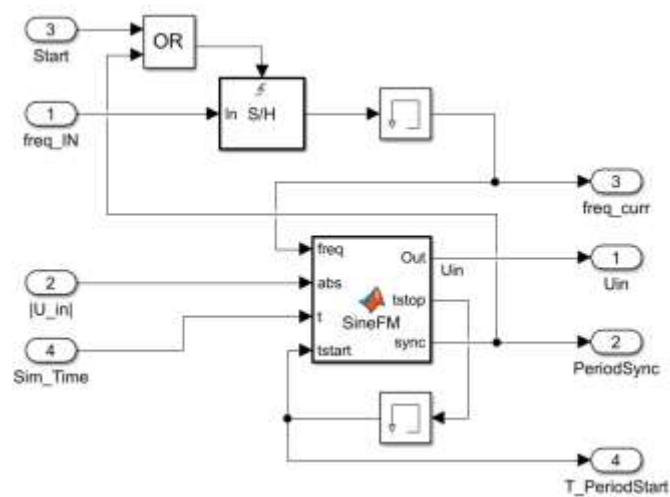


Рисунок Б.2 – Підсистема «Генератор»

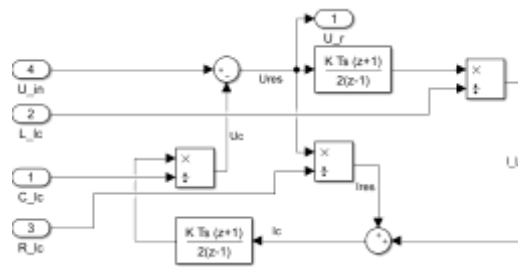


Рисунок Б.3 – Підсистема «RLC Схема»

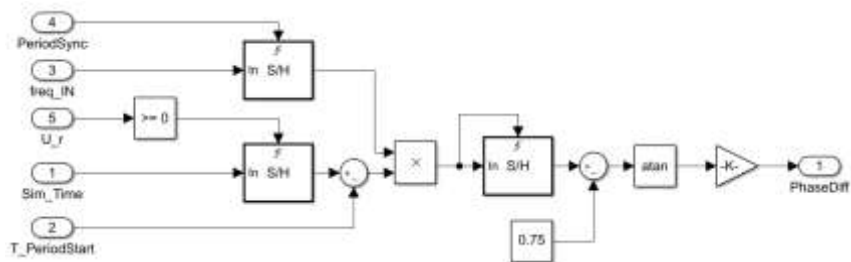


Рисунок Б.4 – Підсистема «Фазовий детектор»

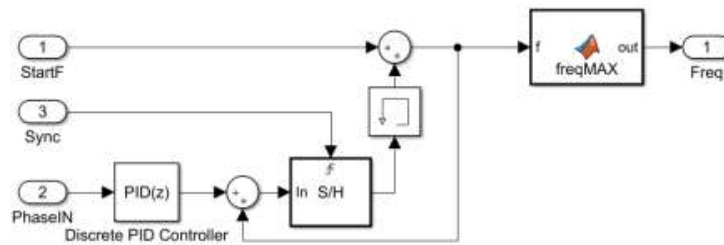


Рисунок Б.5 – Підсистема «ФАПЧ»

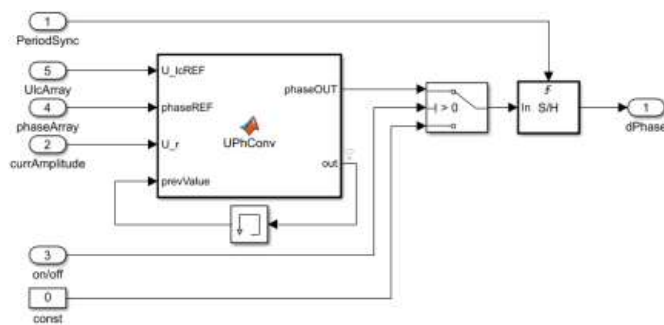


Рисунок Б.6 – Підсистема перетворювача «Напруга-фаза»

Підпрограма *SineFM.m*:

```
function [Out, tstop, sync] = SineFM(freq, abs, t, tstart)
Out = abs*sin(2*pi*freq*(t-tstart));
if (t - tstart) < (1/freq)
    tstop = tstart;
    sync = 0;
else
    tstop = t;
    sync = 1;
end
```

Підпрограма *UPhConv.m*:

```
function [phaseOUT,out] = UPhConv(U_1cREF, phaseREF, U_r, prevValue)
phaseOUT = 0;
out = zeros(9,1);
for j=1:9
    out(j)=prevValue(j);
    if out(j) == 0
        if U_r >= U_1cREF(j)
            out(j) = 1;
        end
    else
        if U_r <= (U_1cREF(j)- U_1cREF(j)*j/30)
            out(j) = 0;
        end
    end
    if out(j) == 1
        phaseOUT = phaseREF(j);
    end
end
```

Підпрограма *freqMAX.m*:

```
function out = freqMAX(f)
if f >=100000
    out = 100000;
else if f <= 10000
    out = 10000;
else
    out = f;
end
end
```