

УДК [621.3+622.233.6]:681.3
№ держреєстрації 0108U000557
Инв.№

Міністерство освіти і науки України
Національний гірничий університет
(НГУ)

49000, м. Дніпропетровськ, пр. К.Маркса 19, тел. (0562) 473209, факс 7446214,
телекс 143457 «AGAT SU», E-mail: HomenkoO@nmu.org.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
д-р техн. наук, проф.
П.І. Пілов

“ _____ ” _____ 2009 р.

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ТА РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ПІДПРИЄМСТВ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО
КОМПЛЕКСУ
(заключний)
ГП-415

Начальник НДЧ,
канд. техн. наук, доцент

О.Є. Хоменко

Науковий керівник НДР,
завідувач кафедри електропривода,
д-р техн. наук, професор

О.С. Бешта

2009

Рукопис закінчено 1 грудня 2009 р.
Результати роботи розглянуто Вченою Радою НГУ,
протокол № 9 від 15 грудня 2009 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник роботи, гол. науковий співробітник, д-р техн. наук, професор	О.С.Бешта (розділи 1, 2, 3, 4)
Пров. науковий співробітник, канд. техн. наук, професор	М.М.Казачковський (розділ 1, вступ, висновки)
Ст. науковий співробітник	Д.В.Якупов (розділ 1)
Пров. науковий співробітник, канд. техн. наук, професор	О.Б. Іванов (розділ 2)
Ст. науковий співробітник, канд. техн. наук	І.А. Кирилов (розділ 2)
Гол. науковий співробітник, д-р техн. наук, професор	Ф.П. Шкрабець (розділ 3)
Ст. науковий співробітник, канд. техн. наук, доцент	О.В.Остапчук (розділ 3)
Пров. науковий співробітник, канд. техн. наук, доцент	В.С.Хілов (розділ 4)
Мол. науковий співробітник	О.Я.Сухарєв (розділ 4)

У роботі також брали участь с.н.с., канд. техн. наук, професори А.А.Колб та В.Л.Донченко, с.н.с., канд. техн. наук, доценти О.В.Балахонцев, Д.В. Ципленков, О.В. Остапчук, н.с., канд. техн. наук, доцент Н.В. Глухова, с.н.с. С.Б.Савченко, Є.Г.Худий, В.П. Гірич, С.І. Федоров та А.М. Гребенюк, н.с. О.В.Михайленко, м.н.с. С.С.Фурса, Є.П. Місяць, П.Ю. Красовський, М.С. Кириченко, П.В. Камішанський, Н.А. Іконнікова та А.О.Сьомін, інженери 1 категорії О.П. Худолій та Д.В.Петренко, лаборанти О.В.Чепур, С.В.Ковтун К.О.Огницька, Д.В.Школа.

Нормоконтролер

Л.О. Савостенко

РЕФЕРАТ

Звіт з НДР: 202 с., 74 рис., 12 табл., 53 джерела.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ: Енергоефективність електрообладнання підприємств гірничо-металургійного комплексу.

МЕТА РОБОТИ: Визначення і дослідження енергоефективних режимів та розробка принципів побудови енергозберігаючого електрообладнання підприємств гірничо-металургійного комплексу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ:

1. Запропоновано та досліджено систему керування активним випрямлячем для перетворювачів частоти, який забезпечує синусоїдальну форму струму мережі та стабілізацію напруги ланки постійного струму.
2. Розроблено метод та пристрій для виявлення дугоутворення рухомого контакту на основі використання інфрачервоних фотодіодів, який забезпечує усунення завад від сторонніх джерел випромінювання.
3. Дано теоретичне обґрунтування й розроблений спосіб селективного визначення параметрів ізоляції електричної мережі відносно землі під робочою напругою.
4. В результаті імітаційного моделювання були встановлені величини, що впливають на зміну струму статора при перемиканні асинхронного двигуна з перетворювача частоти на мережу, запропоновано використання екстремального регулятора продуктивності компресора.

ЧАСТОТНО-КЕРОВАНІЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, АКТИВНИЙ ВИПРЯМЛЯЧ, РЕЛЕЙНО-ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, РУХОМИЙ КОНТАКТ, ДУГОУТВОРЕННЯ, ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ПІД РОБОЧОЮ НАПРУГОЮ, ВЕРСТАТИ ШАРОШКОВОГО БУРІННЯ, ПЕРЕМИКАННЯ З ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ НА МЕРЕЖУ.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	6
1	ПРИНЦИПИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АКТИВНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ ЧАСТОТНО - КЕРОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ.....	7
	1.1 Аналітичний огляд.....	7
	1.2 Система керування активним випрямлячем.....	11
	1.3 Керування струмом активного випрямляча.....	14
	1.4 Моделювання роботи АВ.....	20
	1.5 Експериментальний стенд для дослідження режимів активного випрямляча.....	31
	1.6 Програмне забезпечення експериментального стенда.....	41
	1.7 Експериментальні дослідження системи керування активним випрямлячем.....	59
	1.8 Висновки.....	71
2	ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ДУГОГАСІННЯ РУХОМОГО СТРУМОЗНІМАЛЬНОГО КОНТАКТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТРУМОЗНІМАЛЬНИХ ЗАСОБІВ.....	73
	2.1 Аналіз систем дугогасіння та вибір методів попередження дугоутворення рухомого струмознімального контакту.....	73
	2.2 Розробка силових комутаторів для пристроїв попередження дугоутворення.....	83
	2.3 Аналіз та розробка системи управління силовим комутатором та системи попередження дугоутворення транспортних засобів з рухомим струмознімальним контактом.....	101
	2.4 Висновки.....	106
3	РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ВІДНОСНО ЗЕМЛІ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРУГОЮ 6 -10 КВ.....	108
	3.1 Теоретичне обґрунтування методів автоматичного контролю параметрів ізоляції та дугогасного пристрою.....	108
	3.2 Технічна реалізація методів автоматичного контролю параметрів ізоляції та дугогасного пристрою.....	113
	3.3 Методика непрямого визначення параметрів провідності ізоляції мережі відносно землі.....	117
	3.4 Розробка алгоритмів для автоматизації процесу визначення параметрів ізоляції високовольтних мереж.....	121
	3.5 Розробка алгоритмів для системи автоматичної компенсації складових струму однофазного замикання на землю.....	125
	3.6 Функціональна схема системи автоматичної компенсації складових струму однофазного замикання на землю.....	127
	3.7 Висновки.....	138

4	РОЗРОБКА НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ НА СТВОРЕННЯ ЧАСТОТНОГО ПУСКУ І ПЕРЕМІКАННЯ НА ЖИВЛЯЧУ МЕРЕЖУ НЕРЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОМПРЕСОРА.....	140
4.1	Патентні дослідження існуючих алгоритмів керування приводом компресора зі зниженим споживанням електроенергії.....	140
4.2	Розробка способу пуску і перемикання асинхронного двигуна від частотного перетворювача на мережу.....	141
4.3	Розробка алгоритму керування для перемикання асинхронного двигуна від частотного перетворювача на мережу.....	143
4.4	Розробка рекомендацій на створення нерегульованого приводу з частотним пуском і перемиканням на живлячу мережу асинхронного двигуна компресора.....	152
4.5	Аналіз компресора як об'єкта керування.....	155
4.6	Розробка алгоритму керування приводом компресора зі зниженим споживанням енергії.....	165
4.7	Розробка структурної схеми системи керування приводом компресора зі зниженим споживанням енергії.....	169
4.8	Розробка рекомендацій для створення регульованого привода компресора.....	173
4.5	Висновки.....	174
	ВИСНОВКИ.....	176
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	178
	Додаток А Звіт з патентних досліджень.....	184
	Додаток Б Акт впровадження.....	196
	Додаток В Витяг з протоколу засідання кафедри.....	197
	Додаток Г Витяг з протоколу засідання Науково-технічної ради університету.....	199
	Додаток Д Рецензія.....	201

ВСТУП

Робота присвячена дослідженням енергоефективного електрообладнання підприємств гірничо-металургійного комплексу і включає питання контролю ізоляції і обмеження аварійних струмів у високовольтних мережах гірничих підприємств, надійності та безпеки систем електроспоживання транспортних засобів з рухомими струмознімальними контактами, визначення раціональних режимів роботи і розробки енергозберігаючого приводу компресорів кар'єрних бурових верстатів, енергоефективного векторного керування активними випрямлячами частотно-керованих електроприводів.

Виходячи з цього, вирішені наступні завдання.

У напрямі створення комплексу засобів контролю параметрів ізоляції та обмеження аварійних струмів для мереж 6-10 кВ: розробка засобів контролю параметрів ізоляції у мережах карерів та шахт напругою 6-10 кВ без зняття робочої напруги; розробка методів контролю струму однофазного замикання на землю розподільних мереж.

У напрямі створенні засобів дугогасіння струмоприймачів транспортних засобів: обґрунтування нових методів випереджального вимикання при порушенні контактів; розробка пристроїв формування сигналів; розробка нових принципів та методів запобігання електричних розрядів при струмозніманні; дослідження ефективності нової системи електроживлення в порівнянні з відомими.

У напрямі створення автоматизованого частотно-керованого електропривода компресорів кар'єрних верстатів шарошкового буріння: розробка методів автоматичного керування компресорної установки при обмеженні ударних навантажень на живлячу мережу і механічну трансмісію.

У напрямі створення енергоефективного векторного керування активними випрямлячами частотно - керованих електроприводів: обґрунтування принципів векторного керування активними випрямлячами; розробка алгоритмів керування; математичне моделювання електропривода з векторно-керованими активними випрямлячами, створення експериментального стенду для дослідження режимів активного випрямляча.

1 ПРИНЦИПИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АКТИВНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ ЧАСТОТНО - КЕРОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

1.1 Аналітичний огляд

На сьогоднішній день частотно-регульований електропривод є одним з найефективніших рішень для регулювання швидкості виробничих механізмів. Проте сьогодні висуває все більш жорсткі вимоги до енергозбереження і електромагнітної сумісності в регульованому електроприводі. До енергетичних показників, які визначають електромагнітну сумісність частотно-регульованого електропривода з живлячою мережею, належать гармонійний склад споживаного струму і коефіцієнт потужності. В аспекті енергозбереження розглядається можливість регульованим електроприводом, що працює в частих гальмівних режимах з генерацією енергії, повертати цю енергію в мережу з відповідними показниками якості, про які йшла мова вище.

Знижені енергетичні показники регульованого електропривода можна пояснити тим, що одним з основних елементів дволанкових перетворювачів регульованого електропривода є вхідний некерований випрямляч. Некерований шестипульсний випрямляч є найпоширенішим варіантом для електроприводів змінного струму з частотним регулюванням малої і середньої потужності. Зі збільшенням потужності до сотень кіловат та одиниць і десятків мегават використовують випрямлячі з пульсністю 12, 18, 24, що значно покращує енергетичні показники електропривода. В роботі [1] показано, що в режимі безперервного вхідного струму ідеалізованого випрямляча коефіцієнт потужності дорівнює 0,887 - 0,955, для режиму переривчастого струму цей коефіцієнт дорівнює 0 – 0,887. Тому завжди намагаються підтримати вхідний струм безперервним за рахунок оптимізації робочих режимів та вмикання додаткових дроселів. В роботі [2] також проведено детальний аналіз, який підтверджує зазначені вище показники. При використанні некерованих випрямлячів вхідний струм містить непарні та не кратні трьом гармонійні складові вищих порядків: 5-ту, 7-му, 11-ту та інші, які мають досить ве-

лику амплітуду порівняно з головною складовою струму [3]. Для зменшення амплітуд гармонійних складових використовують дроселі у колі як змінного струму, так і постійного (випрямленого). При цьому падіння напруги на мережевому дроселі повинно бути не більше 3% - 5% від напруги живлення. Більші значенні падіння напруги можуть призвести до втрати моменту двигуна. Дросель постійного струму менше впливає на момент двигуна [3].

При роботі в частих гальмівних режимах енергія рекуперації у приводах з некерованими випрямлячами розсіюється на гальмівному опорі і в мережу не повертається. Оптимізувати використання гальмівної енергії можливо за рахунок об'єднання декількох приводів спільною ланкою постійного струму. Тоді приводи, що працюють у режимі двигуна, зможуть спожити генеровану енергію. Таке можливо, наприклад, на кранах. Але в одиночному електроприводі такої можливості немає і проблема корисного використання гальмівної енергії лишається актуальною.

У приводах із некерованим випрямлячем ємність ланки постійного струму повинна бути такою, щоб забезпечити зменшення пульсацій випрямленої напруги і обмеження перенапруг у гальмівних режимах. Коефіцієнт ємності у таких електроприводах складає приблизно 100 мкФ/кВт потужності двигуна [4, 5]. При цьому вона має достатньо великі габаритні розміри і впливає на загальний габарит пристрою, зменшення якого є важливим інженерним рішенням.

Використання у якості вхідного елемента інвертора на повністю керованих ключах може вирішити описані вище проблеми [4]:

- може забезпечити рекуперацію гальмівної енергії до мережі;
- мати на вході випрямляча практично синусоїдальний струм (мінімум вищих гармонік струму) з нульовим фазовим зсувом відносно напруги мережі (коефіцієнт зсуву $\cos \varphi \approx 1$);
- зменшити ємність ланки постійного струму за рахунок регулювання напруги на ній.

Загальна схема силової частини активного випрямляча (АВ) і системи регулювання представлена на рис. 1.1. Задача системи регулювання – забезпечити пе-

редачу лише активної потужності через АВ в обох напрямках, тим самим забезпечуючи роботу електропривода у 4 квадрантах.

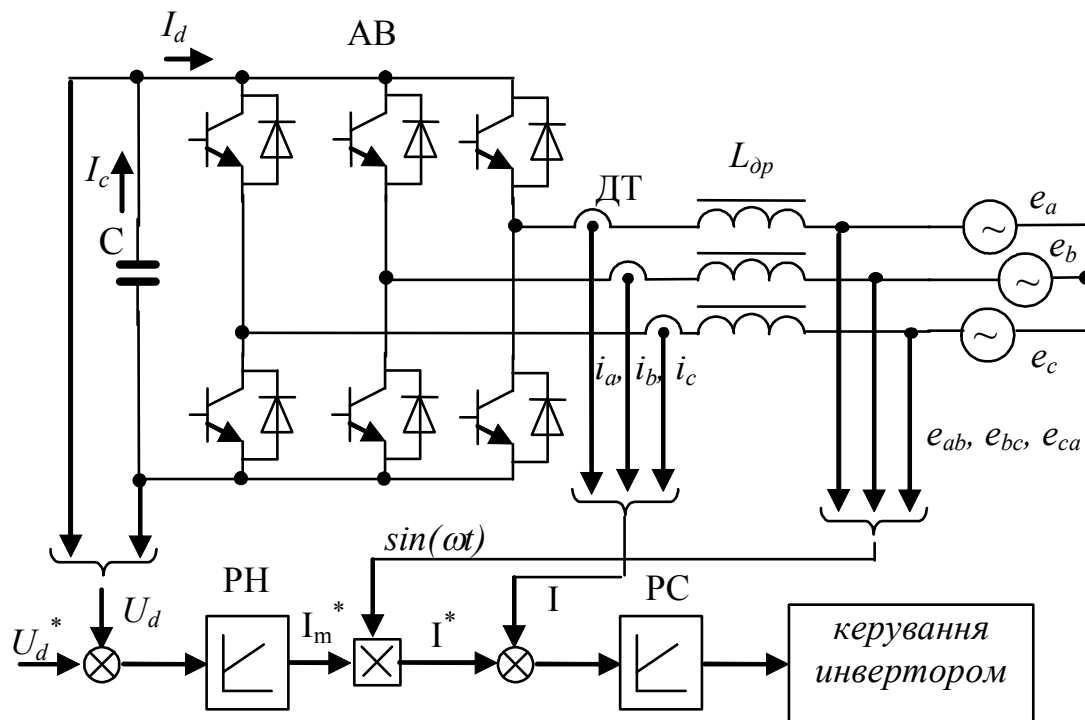


Рисунок 1.1 – Схема силової частини та системи керування активного випрямляча.

АВ являє собою автономний інвертор напруги (АІН) на повністю керованих ключах (IGBT, MOSFET, GTO), який підключається до мережі змінного струму з фазними ЕРС e_a , e_b , e_c через дроселі $L_{ор}$. Для якісного регулювання напруги U_d на конденсаторі необхідно забезпечити стабільний струм заряду/розряду конденсатора. Це значить, що активний випрямляч повинен працювати в режимі джерела струму, що можливе при охопленні його негативним зворотним зв'язком за струмом. При цьому, для забезпечення керованості ключів, напруга в ланці постійного струму U_d повинна бути більше амплітудного значення лінійної напруги мережі $U_d > U_{лм}$. У переважній більшості випадків система керування АВ є двоконтурною. Вона складається з контуру струму АВ та контуру регулювання напруги на конденсаторі C . Регулятор напруги РН порівнює дійсну напругу U_d з заданою U_d^* і формує завдання на амплітуду фазного струму. В даній системі вимірюється фазна напруга, при діленні якої на її амплітуду отримуємо одиничну синусоїду.

Помноживши цю синусоїду на задану амплітуду фазного струму отримаємо завдання на фазний струм, який регулюється регулятором струму РС. Регулятор струму, або спеціальній логічний пристрій, формує імпульси керування ключами інвертора. Так виглядає загальна структура системи керування.

Питанням побудови систем керування АВ присвячено багато робіт [1,4-9]. Характерною особливістю для них є те, що модель АВ і системи керування будується у системі координат, яка зв'язана з вектором ЕРС мережі і обертається з її частотою. В такій системі можливо окремо задавати активну і реактивну складові струму мережі. Для цього виконується дворазове координатне перетворення: $abc \rightarrow \alpha\beta$, $\alpha\beta \rightarrow xy$ [7]. Регулятор напруги в описаних системах виконано лінійним і синтезовано за принципами систем підлеглого керування.

В роботах [1, 10] запропоновано релейно-векторне керування струмом АВ за алгоритмами, які використовуються при керуванні вихідним інвертором у частотно-керованому електроприводі. В роботі [4] запропоновано використовувати алгоритм прямого керування моментом (DTC). Особливістю цих алгоритмів є те, що для зміни струму обирається один із станів інвертора, який призведе до зміни струму в заданому напрямку.

Часто використовуються вже досить досліджені методи керування інвертором напруги, такі як синусоїдальна широтно-імпульсна модуляція та модуляція просторового вектора напруги. Але на відміну від релейних алгоритмів вони мають зменшену швидкодію.

Майже всі перелічені релейно-векторні алгоритми керування є перспективними і суто цифровими. Тому для більш ефективного їх використання в АВ необхідна адаптація до специфіки даної системи.

Метою роботи є розробка системи керування АВ, яка задовольнить усім вимогам, і розробка алгоритму керування струмом АВ, адаптованого до його особливостей.

1.2 Система керування активним випрямлячем

В попередньому розділі розглянуто загальну схему побудови системи керування АВ і способів побудови контуру струму АВ. Використовуючи цю схему, в даному підрозділі запропоновано двоконтурну систему підлеглого регулювання координат АВ (рис. 1.2) [12].

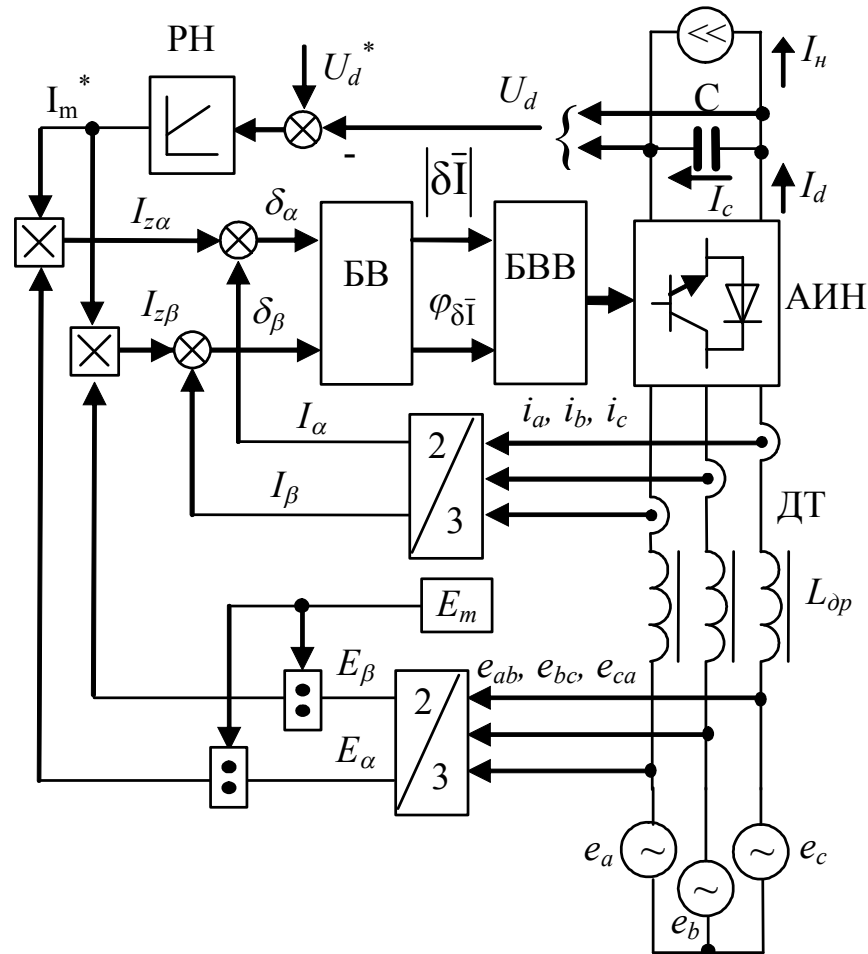


Рисунок 1.2 - Активний випрямляч із системою керування

Для підвищення швидкодії системи регулювання використовується релейний векторний алгоритм управління струмом. Регулювання струму ведеться в координатній системі $\alpha\beta$. Представлена система регулювання на відміну від систем, описаних в координатах що обертаються, є простішою, містить менше координатних перетворень і вимагає менше обчислень. Однак слід зазначити, що на вході випрямляча можливо формувати лише активний струм. Але дана умова цілком задовольняє умовам використання АВ.

Контур регулювання струму. Завдання на амплітуду струму інвертора формується регулятором напруги РН. Для формування завдання на синусоїдальні струми $I_{z\alpha}$ і $I_{z\beta}$ вимірюються мережеві ЕДС з подальшим перетворенням в E_α і E_β . Набуті значення напруги діляться на амплітуду фазної ЕРС E_m . Таким чином, виходить синусоїда одиничної амплітуди, яка множиться на задану амплітуду струму. У блоці БВ по одержаних помилках регулювання струму визначаються модуль і фаза вектора помилки струму. Блок БВВ здійснює вибір необхідного вектора напруги інвертування за результатами розрахунків блоку БВ. Для вибору необхідного вектора напруги можуть бути використані алгоритми керування струмом, які, наприклад, описані в [1, 4, 10-12]. Наведені алгоритми було розроблено для використання в системах векторного регулювання швидкості асинхронних двигунів. Але як було зазначено в попередньому розділі між АВ та АІН є повна аналогія і ці алгоритми можуть бути використані в системах керування АВ. Проте АВ має деяку специфіку, тому в подальшому буде запропоновано векторний релейний алгоритм керування струмом АВ.

Контур регулювання напруги. Як і у більшості відомих систем керування АВ, регулятор напруги є лінійним регулятором. Для визначення передавальної функції регулятора напруги передавальну функцію згорнутого контуру струму представимо у вигляді:

$$W_N(p) = \frac{1/k_\delta}{2T_\mu p + 1},$$

де k_m – коефіцієнт датчика струму, T_μ – мала некомпенсована стала часу, яка включає мертвий час ключів інвертора, обчислювальні затримки, період дискретизації системи регулювання, інерційності в каналі вимірювання струму. При розрахунках приймалася рівною $T_\mu = 0,0005$ с.

Регулятор напруги формує завдання на амплітуду вектора струму мережі (або амплітуду фазного струму $I_{m\phi}$). Співвідношення між струмом I_d і амплітудним значенням фазного струму інвертора $I_{m\phi}$ знайдемо з рівняння балансу потужності:

$$U_d I_d = 3E_\phi I_\phi = \frac{3}{2} E_{m\phi} I_{m\phi},$$

$$I_d = \frac{3E_{m\phi} I_{m\phi}}{2U_d},$$

де E_ϕ і I_ϕ – діючі значення ЕДС і струму фази мережі; $E_{m\phi}$ – амплітудне значення фазної ЕРС мережі.

Структурна схема контуру напруги представлена на рис. 1.3. Збуренням в даній системі є струм інвертора двигуна I_n . Зробивши припущення про постійність амплітуди фазної ЕРС мережі і напруги в ланці постійного струму, при настроюванні регулятора напруги на симетричний оптимум одержимо наступну передавальну функцію регулятора напруги:

$$W_{PH}^*(p) = \frac{k_m C (8T_\mu p + 1)}{32T_\mu^2 k_H p},$$

$$W_{PH}(p) = \frac{k_m C (8T_\mu p + 1)}{32T_\mu^2 k_H p} \frac{2U_d}{3E_{m\phi}}.$$

Як видно з рис. 1.3 і передавальної функції $W_{PH}(p)$, коефіцієнти регулятора залежать від величини збурень, якими є зміна амплітуди мережевої ЕРС $E_{m\phi}$ і струму навантаження I_n (і, як наслідок, U_d).

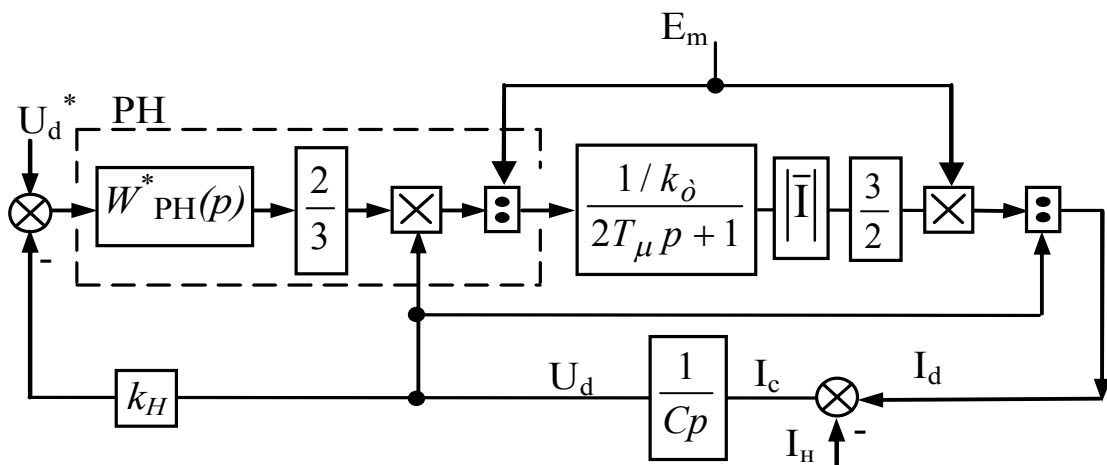


Рисунок 1.3 - Контур регулювання напруги

1.3 Керування струмом активного випрямляча

За основу побудови контуру струму взято релейно-векторне керування струмом, мова про яке йшла вище. Як відомо, релейно-векторні регулятори струму (РВРС), забезпечують найбільшу швидкодію і високу точність регулювання струму. Проте, описані в [1, 10, 11], оптимальні по швидкодії РВРТ мають деякі недоліки, а саме:

- дані регулятори розглядалися для керування вихідними інверторами ПЧ і не враховують специфіки АВ;
- оптимальне за швидкодею регулювання струму в задачах регулювання струму АВ може привести до збільшення частоти комутації ключів перетворювача і зниження точності регулювання;
- описані РВРС орієнтовані на застосування в цифрових системах і на їх точність впливає період дискретизації цифрової системи управління, що в свою чергу приводить до посилювання вимог до мікроконтролера системи регулювання.

В даному розділі роботи удосконалюється релейно-векторного регулятор, запропонований в [12] з метою зниження числа комутацій силових ключів перетворювача, підвищення точності регулювання вхідного струму АВ і зменшення впливу величини періоду дискретизації цифрової системи.

На рис. 1.4,а представлені спрощена силова схема, а на рис. 1.4,б – векторна діаграма станів АВ. Кожному узагальненому вектору напруги відповідає певне поєднання замкнутих ключів, позначених цифрами. Вектора $U_1 - U_6$ ненульові і зсунуті на 60° . Вектора $+0$ і -0 відповідають нульовим станам, при виборі яких всі фази навантаження підключаються до шини $+U_d$ або $-U_d$.

Враховуючи той факт, що АВ повинен працювати в режимі забезпечення коефіцієнта зсуву фаз $\cos \varphi = 1$, позначимо специфіку даного пристрою, про яку згадувалося вище:

- на відміну від АІН, АВ є об'єктом, у якого можна безпосередньо виміряти всі необхідні величини: вхідний змінний струм мережі, напругу мережі (проти-ЕРС), напругу і струм в ланці постійного струму;

- напруга мережі (проти-ЕРС) є величиною, яка задає фазу струму, тому заданий кут зсуву фаз між струмом і напругою мережі завжди рівний 0^0 або 180^0 .

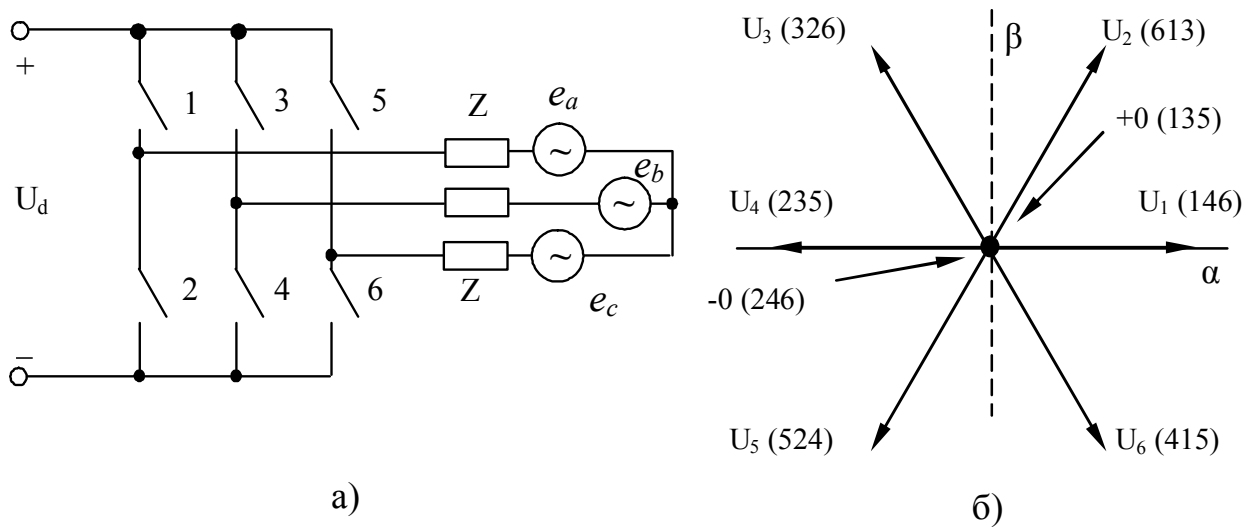


Рисунок 1.4 – Активний випрямляч:
а) – спрощена силова схема, б) – векторна діаграма станів

Розглянемо принцип векторного регулювання струму в нерухомій координатній системі α - β , жорстко пов'язаній з вектором фази А [14] і використаній в [11,12]. У [1] використовується система x - y , орієнтована дійсною віссю x за вектором напруги мережі, але порядок визначення помилки струму і вибору необхідного вектора напруги АВ схожі з [10].

Вектор помилки регулювання струму є різницею між векторами заданого і дійсного струмів $\delta \bar{I} = \bar{I}_z - \bar{I}$. Модуль і фаза вектора помилки струму визначаються через його проекції δ_α і δ_β по осях α і β (рис. 1.5):

$$\delta_\alpha = I_{z\alpha} - I_\alpha,$$

$$\delta_\beta = I_{z\beta} - I_\beta,$$

$$\delta I = \sqrt{\delta_\alpha^2 + \delta_\beta^2},$$

$$\delta\varphi = \arctg \frac{\delta_\beta}{\delta_\alpha}.$$

У середині допустимої області (ДО) радіусом Δ модуль помилки регулювання струму не перевищує допустимої величини і жодних перемикань регулятора не

відбувається. При виході за межі ДО вибирається новий стан (вектор напруги) інвертора, який дозволить щонайшвидше повернути помилку в задані межі. У [1] оптимальну швидкодію визначено як максимально швидке зменшення модуля вектора помилки без зміни його фази, що дозволяє мінімізувати одночасно як амплітудну, так і фазову помилку регулювання струму. Виходячи з цього, задачею будь-якого швидкодійного РВРС є відшукування такого вектора напруги, який забезпечить рух кінця вектора струму по напрямку вектора помилки через центр ДО.

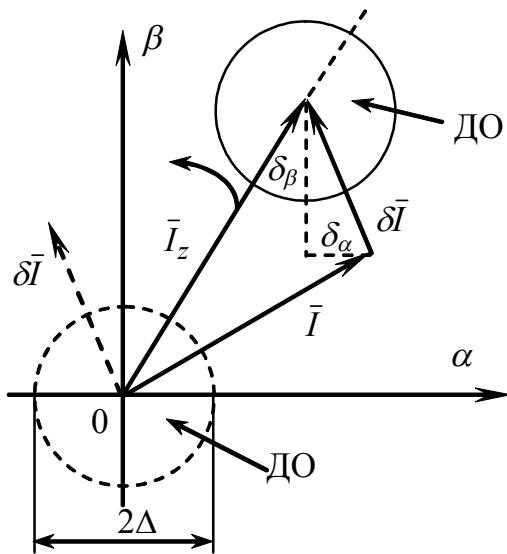


Рисунок 1.5 – Похибка регулювання струму

$\bar{I}R$ нехтуємо). Зі всіх можливих векторів напруги АВ тільки один може забезпечити найбільшу швидкість руху вектора дійсного струму (зменшення модуля вектора помилки струму) в заданому напрямку. При цьому практично завжди спостерігається фазова і амплітудна похибка, оскільки АВ має кінцеве число станів і вибраний вектор не завжди повною мірою відповідає розрахунковому.

Розглянемо ситуацію, представлену на рис. 1.6. Є вектор помилки струму $\delta\bar{I}$. Для вибору необхідного вектора напруги по вище приведену виразу визначимо вектора похідних струму $\left(L \frac{d\bar{I}}{dt}\right)_i$.

Проаналізуємо їх дію. Введемо систему координат jk , позитивний напрям осі абсцис якої співпадає з напрямом вектора $\delta\bar{I}$.

Спроектуємо вектора $\left(L \frac{d\bar{I}}{dt}\right)_i$ на осі j і k . Проекція вектора по осі k змінює

У різних РВРС використовуються різні підходи до знаходження необхідного вектора напруги АВ, але так чи інакше всі вони зводяться до рішення рівняння вигляду

$$\bar{U} = \bar{I}R + L \frac{d\bar{I}}{dt} + \bar{E} \text{ для всіх можливих станів АВ.}$$

За наслідками розрахунків визначається якнайкращий вектор напруги, який забезпечить найбільший вектор похідної струму

$$\frac{d\bar{I}}{dt} = \frac{\bar{U} + \bar{E}}{L} \text{ в заданому напрямі (складовою}$$

модуль вектора, а проекція по осі ординат j здійснює поворот вектора $\delta\bar{I}$. З рисунку видно, що зі всіх можливих векторів похідної струму на вектор $\delta\bar{I}$ в заданому напрямі діють три вектори: $\left(L \frac{d\bar{I}}{dt}\right)_1$, $\left(L \frac{d\bar{I}}{dt}\right)_2$, $\left(L \frac{d\bar{I}}{dt}\right)_3$. Найбільш на модуль вектора $\delta\bar{I}$ впливає вектор $\left(L \frac{d\bar{I}}{dt}\right)_2$, який і забезпечує найбільшу швидкодію і буде вибраний в регуляторах [1,10,11]. Вектор $\left(L \frac{d\bar{I}}{dt}\right)_1$ здійснює більше поворот вектора, ніж зменшення модуля і підходить менше всього. Вектор $\left(L \frac{d\bar{I}}{dt}\right)_3$ здійснює якнайменший поворот вектора $\delta\bar{I}$ (має якнайменше фазове розузгодження з вектором $\delta\bar{I}$), але при цьому більш поволі зменшує модуль вектора $\delta\bar{I}$ ніж $\left(L \frac{d\bar{I}}{dt}\right)_2$. Це означає, що кінець вектора струму переміщатиметься по траєкторії, яка найближче проходить від центру ДО.

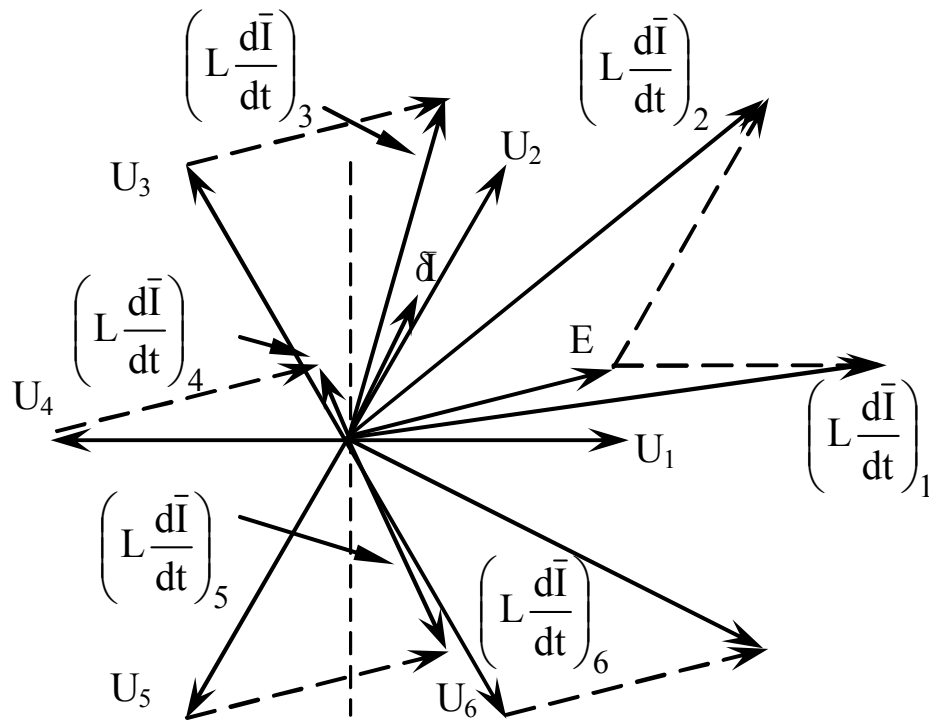


Рисунок 1.6 - Формування вектора похідної струму

Пояснимо, чому вибір оптимального за швидкодією вектора напруги є недоречним у задачах регулювання струму АВ.

1. Знаходження кінця вектора струму \bar{I} якомога ближче до центру ДО (помилка менше заданої) і якомога довше в ДО повністю задовольняє умовам релейного регулювання струму.

2. Цифрова система управління має період дискретизації T , в більшій частині якого не формуються керуюча дія.

3. Вектор заданого струму \bar{I}_z обертається з круговою частотою мережі $\omega=2\pi f$, де $f=50$ Гц. Вектор \bar{V}_τ лінійної швидкості повороту кінця вектора \bar{I}_z визначиться як: $\bar{V}_\tau = \frac{d}{dt} (I_z e^{j\omega t}) = I_z e^{j\omega t} j\omega = j\omega I_z e^{j\omega nT}$, де T – період дискретизації цифрової системи керування, n – кількість періодів. Період дискретизації системи управління достатньо малий і за цей проміжок часу вектор заданого струму повернеться на дуже малий кут. Це дозволяє сказати, що на періоді дискретизації вектор заданого струму нерухомий.

4. Для малих періодів дискретизації вектор приросту струму можна розрахувати по формулі [1]: $\Delta\bar{I} = \frac{\bar{U} + \bar{E}}{L} \Delta t = \frac{\bar{U} + \bar{E}}{L} T$. Швидкість переміщення вектора \bar{I} перевершуватиме швидкість повороту вектора заданого струму \bar{I}_z на один-два порядки, що визначає частоту комутації ключів АВ в кілогерци. Нехай буде вибраний оптимальний за швидкодією вектор напруги (\bar{U}_2 на рис. 1.6). Цей вектор забезпечить найбільший приріст вектора $\Delta\bar{I}$ на періоді дискретизації і за цей проміжок часу вектор струму \bar{I} переміститься на відстань більшу ніж діаметр ДО і вийде далеко за межі ДО. При цьому при фазовому розузгодженні векторів $\Delta\bar{I}$ і $\delta\bar{I}$ час перебування вектора струму \bar{I} в ДО скоротиться. При виборі вектора з меншою швидкодією, але меншим фазовим розузгодження за той же період дискретизації вектором струму \bar{I} буде пройдена менша відстань, збільшиться час перебування в ДО і зменшиться виліт за межі ДО. Це забезпечить зменшення частоти комутацій інвертора і підвищення точності регулювання струму. Для підвищення точності при оптимальному по швидкодії регулюванні необхідно зменшу-

вати період дискретизації, що приведе до підвищення частоти комутацій ключів інвертора.

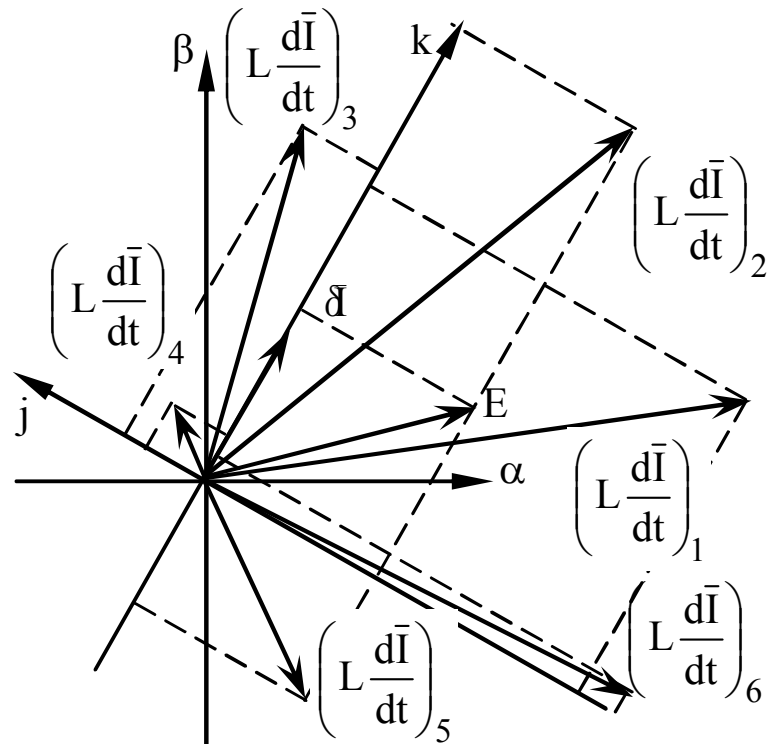


Рисунок 1.7 - Вплив вектора похідної струму на вектор помилки струму

При рішенні задачі вибору вектора напруги число даних варіантів можна скоротити до 4 (рис. 1.7) – три найближчих до вектора $\delta \bar{I}$ вектора напруги і вектор ЕРС мережі. З цих векторів один завжди самий швидкодійний, ще один має якнайменше фазове зрушення, але меншу швидкодію. Іноді швидкодія і мінімальне фазове зрушення можуть поєднуватися в одному векторі. Положення вектора ЕРС мережі впливає на вибір нульового стану АВ. Якщо вектор ЕРС однаково направлений з вектором помилки струму, то при виборі нульового стану струм мінятиметься під дією ЕРС з найменшою швидкістю, оскільки амплітуда вектора ЕРС менше ніж вектора напруги або вектора їх геометричної суми.

Таким чином, можна сформулювати порядок вибору вектора напруги АВ:

1. визначаємо положення вектора помилки струму;
2. по положенню вектора $\delta \bar{I}$ визначаємо три відповідні вектори напруги АВ і визначаємо вектора похідних струму;

3. з них знаходимо вектор з найменшим фазовим розузгодженням з вектором $\delta\bar{I}$;
4. перевіряємо паралельність вектора ЕРС мережі і вектора $\delta\bar{I}$, якщо вектори паралельні, вибираємо нульовий стан АВ по критерію мінімальних перемикачів;
5. якщо ні, вибираємо вектор напруги, який забезпечить вектор похідної струму з найменшим фазовим розузгодженням з вектором $\delta\bar{I}$.

1.4 Моделювання роботи АВ

Для дослідження роботи запропонованої системи керування активним випрямлячем була розроблена його математична модель. Для моделювання використовувався математичний пакет MATLAB та середовище візуального моделювання Simulink. Для досліджень було обрано саме цей програмний продукт тому, що він дозволяє реалізовувати моделі як у вигляді диференціальних рівнянь, які описують систему, так і у вигляді візуалізованих моделей. При цьому у складі пакету є моделі різних електротехнічних пристроїв, таких як двигуни, силові перетворювачі, елементи електричних кіл, вимірювальні пристрої тощо. Особливо корисним є те, що можливо реалізувати систему керування як у вигляді структурної схеми, так і на М-мові. М-мова являє високорівневу мову програмування і може бути інтегрованою у візуальне середовище.

На рис. 1.8 представлено модель системі АВ з запропонованим регулятором струму, яка реалізована у вигляді дискретної моделі в Simulink. При моделюванні розглядалися такі етапи:

- робота запропонованого регулятора струму;
- робота АВ у типовому режимі – передача та споживання активної потужності в усталеному режимі;
- робота АВ при коливанні напруги мережі;
- робота АВ при зміні напрямку передачі енергії.

Модель побудована у абсолютних одиницях. Як параметри мережі змінного струму використовувалися параметри трансформатора типа ТМ 25/10: опір фази

вторинної обмотки $R_T = 0,154$ Ом, індуктивність фази вторинної обмотки $L_T = 0,77$ мГн, лінійна напруга вторинної обмотки $U_L = 380$ В. Індуктивність мережевого дроселя прийнята рівною $L_{DP} = 0,0005$ Гн. Номінальний струм навантаження $I_H = 15$ А. Навантаження представлено у вигляді джерела струму. Знак струму визначає режим роботи навантаження: ”+” – генераторний (віддача енергії до конденсатора), “-” – режим двигуна (споживання енергії з конденсатора). Величина ємності ланки постійного струму $C = 5 \times 10^{-4}$ Ф. Ємність вибиралася з розрахунку 100 мкФ/кВт для двигуна 5 кВт. Напруга в ланці постійного струму стабілізувалася на рівні $U_d = 560$ В. Вихід регулятора напруги обмежений значенням максимальної амплітуди фазного струму $I_{max\phi} = 25$ А. Радіус ДО 2А.

Дослідження роботи релейно-векторного регулятора струму. Робота РВРТ оцінювалася за такими показниками:

- частота комутації ключів інвертора – середнє число перемикань в одиницю часу F_k ,
- середньоквадратичне значення помилки струму (СКВ), яке розраховується за формулою:

$$\delta = \sqrt{\left(\sum_1^n (\delta I_{\alpha i}^2 + \delta I_{\beta i}^2) \right) / (n-1)},$$

- коефіцієнт гармонік в сталому режимі K_G , вимірювався блоком Discrete Total Harmonic Distorsion,
- коефіцієнта зсуву фаз $\cos \varphi$, який обчислювався по формулі:

$$\cos \varphi = \cos \left(\sum_1^n \left(\arctg(E_{\beta i} / E_{\alpha i}) - \arctg(I_{\beta i} / I_{\alpha i}) \right)^2 / (n-1) \right).$$

Модель прораховувалася при декількох значеннях періоду дискретизації T . При моделюванні були прийняті допущення: частота живлячої напруги мережі незмінна і дорівнює 50 Гц, система фазних ЕРС симетрична, опори і індуктивності фаз рівні. Запропонований РВРС порівнювався з іншими типами релейних

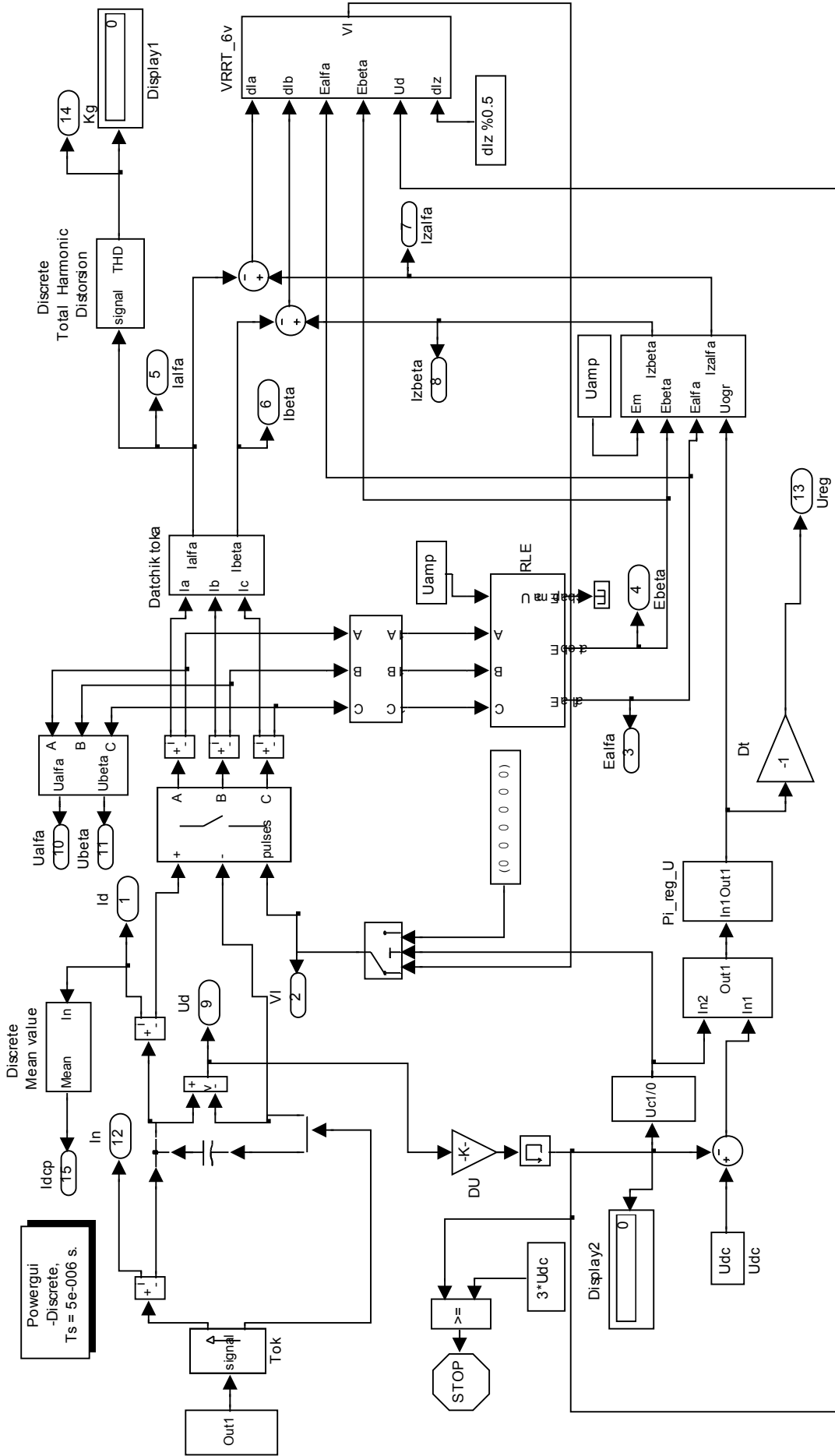


Рисунок 1.8 – Модель активного выпрямляча з системою керування

Таблиця 1.1 – Результати моделювання

	T=5 мкс				T=10 мкс				T=20 мкс			
	СКВ, А	F _k , Гц	K _r	cos φ	СКВ, А	F _k , Гц	K _r	cos φ	СКВ, А	F _k , Гц	K _r	cos φ
Запропонований РВРС	1,35	8350	0,09	0,99	2,05	6350	0,125	0,99	4,29	3500	0,25	0,98
РВРС з [11]	2,42	8300	0,12	0,99	3,63	6300	0,16	0,99	6,57	3600	0,31	0,98
3-фазний РРС	1,59	8300	0,098	0,99	2,86	6300	0,15	0,99	5,06	3650	0,255	0,98

регуляторів: релейно-векторним регулятором струму з [11] і трифазним релейним регулятором струму. Результати моделювання для різних типів регуляторів зведені в таблицю. Для того, щоб мати можливість порівнювати алгоритми, такий параметр, як частота комутації ключів інвертора для кожного розрахунку було зафіксовано. З таблиці можна побачити, що запропонований ВРРС має кращі показники, ніж інші регулятори. Це пояснюється тим, що в даному алгоритмі враховується вплив періоду дискретизації цифрової системи керування. РВРС з [11] працює за принципом найбільшої швидкодії тому має найбільшу похибку регулювання струму. Як відмічалось раніше, це пов'язано з тим, що при великій швидкості руху вектора струму за період дискретизації вектор похибки струму встигає вийти далеко за межі ДО. Трифазний релейний регулятор виконує регулювання струму у кожній фазі незалежно від двох інших (на відміну від векторних алгоритмів регулювання струму). В порівнянні з РВРС з [11] не завжди обираються такі стани інвертора, які забезпечують найбільшу швидкодію, а в порівнянні з запропонованим РВРС не завжди обираються такі стани інвертора, які забезпечують меншу швидкодію, але більшу фазову точність, і цей регулятор по показникам знаходиться у середині. Найкращі показниками точності регулювання струму має запропонований РВРС, який перевищує інші в 1,2 – 1,7 разів. Всі регулятори фактично мають однаковий коефіцієнт зсуву фаз $\cos \varphi$, але дещо різні коефіцієнти гармонік в сталому режимі K_r . Це обумовлено різним СКВ при регулюванні струму.

Робота АВ у типовому режимі передачі та споживання активної потужності в усталеному режимі.

Результати моделювання режиму зміни знаку струму навантаження із збільшенням струму до максимально допустимого значення при постійній напрузі мережі представлені на рис. 1.9. Даний режим відповідає переходу двигуна з рухового режиму в режим рекуперативного гальмування з максимально допустимим струмом. На рис. 1.10 представлені результати моделювання режиму зміни знаку струму навантаження при переході з рекуперативного гальмування до розгону з максимально допустимим струмом. Як видно з рисунків, система регулювання забезпечує кут зсуву фаз між напругою і струмом, рівним 0° в режимі двигуна і 180° в рекуперативному режимі. Форма струму синусоїдальна. Проте слід зазначити, що в перехідних режимах спостерігаються значні відхилення напруги U_d (до 30%) від заданого значення. Також видно, що перехідні процеси фактично закінчуються за один період напруги мережі.

При моделюванні даних режимів регулятор напруги не було обмежено на рівні кратності 2. Саме така кратність обмеження (частіше менша) використовується у типових промислових електроприводах. Доцільно зробити висновок, що потужності АВ і інвертора двигуна можуть бути однакові, а зовнішні регулятори мати однакові рівні обмежень завдання на струм. Це дозволило б використовувати однакові силові елементи при виготовленні систем АВ і інвертор-двигун та максимально уніфікувати процес виробництва. Однак попередні дослідження показують, що таке представлення про співвідношення потужностей може бути невірним. Проблема в тому, що при обмеженні з коефіцієнтом кратності 2 у граничних режимах регулятор напруги працює під відсічку і це може призвести до великих перенапруг (і неконтрольованому росту напруги) або провалів напруги на конденсаторі. Це пов'язано з різними сталими часу контурів напруги АВ та струму навантаження. Контур напруги більш інерційний і не встигає відпрацювати збурення, що призводить до описаних явищ. Рішення цієї проблеми розглядається далі в різних аспектах.

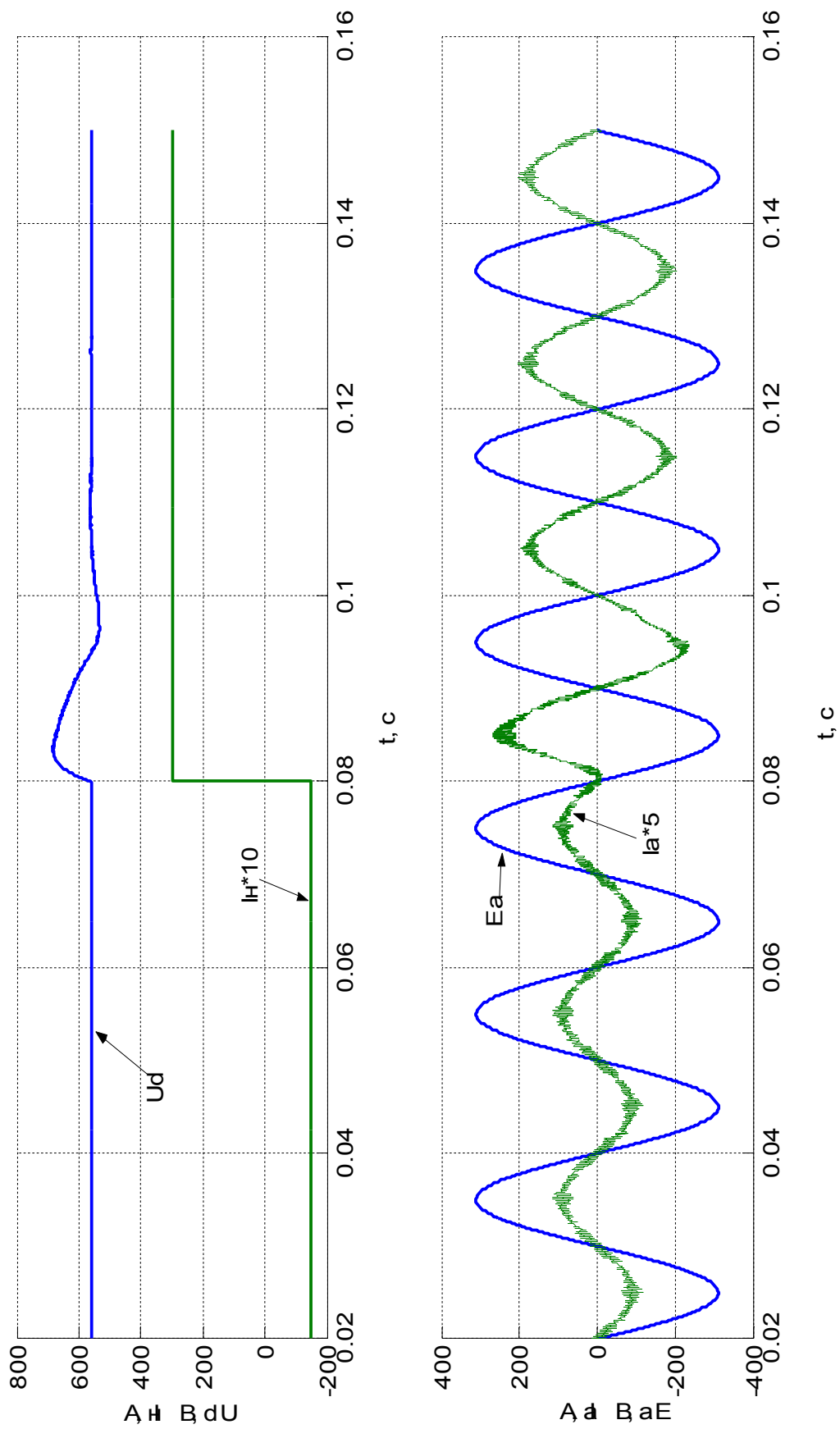


Рисунок 1.9 – Зміна струму навантаження при переході з режиму двигуна до рекуперативного

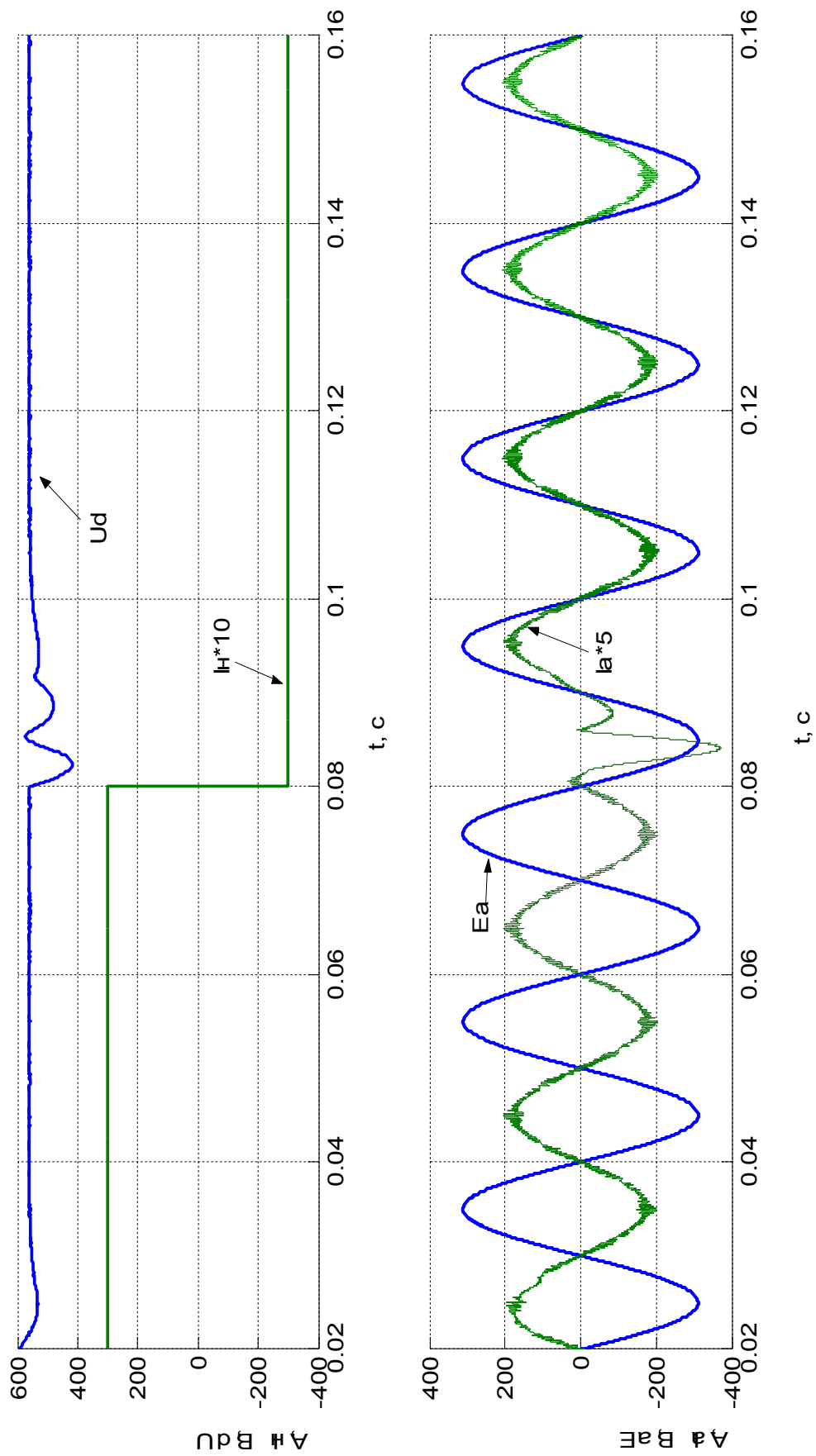


Рисунок 1.10 – Зміна струму навантаження при переході з рекуперативного режиму до режиму двигуна

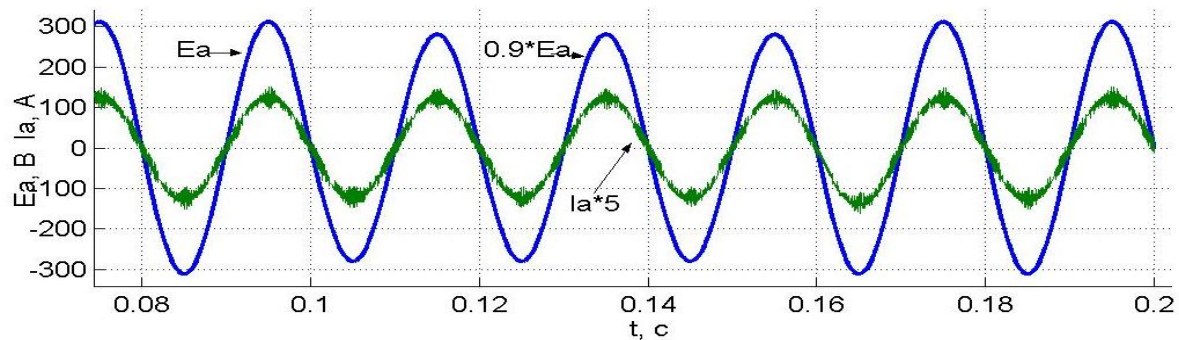
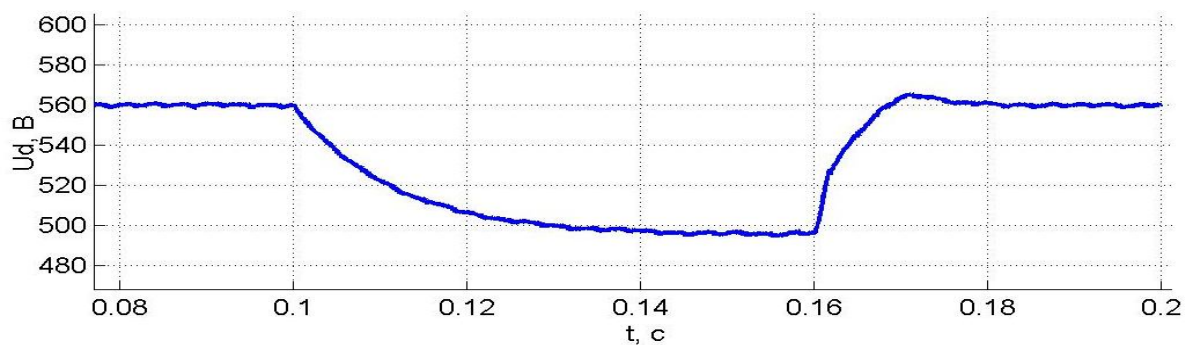
Дослідження роботи АВ при коливанні напруги мережі [15]. Оскільки активний випрямляч є проміжною ланкою між живлячою мережею і частотно-регульованим електроприводом, актуально розглянути його роботу при впливі збурюючих дій з боку мережі, таких як провали напруги і перенапруги.

Здамося діапазоном допустимої зміни напруги мережі $\pm 10\%$, що регламентується [16]. Згідно даного ГОСТу тривалість провалів напруги може сягати декількох секунд і навіть десятків секунд, а тривалість перенапружень нормується тривалістю більше 10 мс.

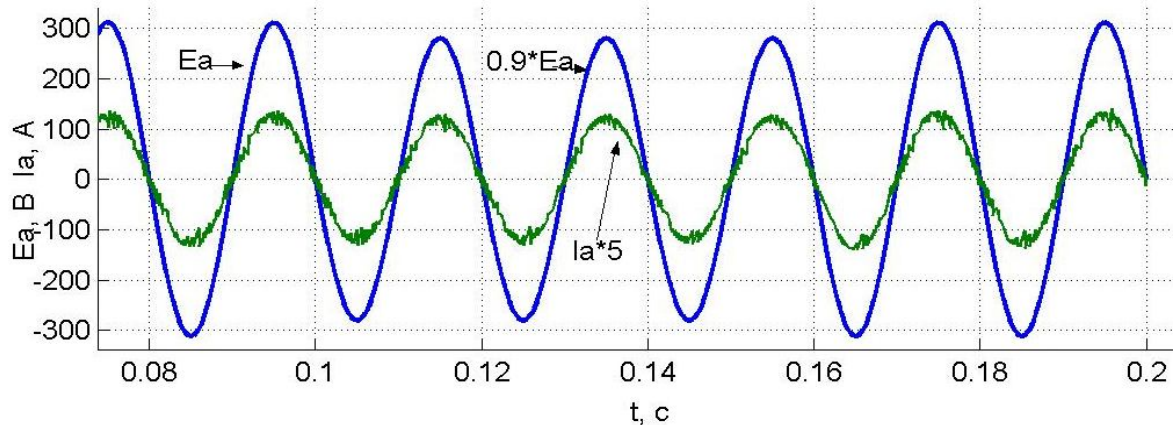
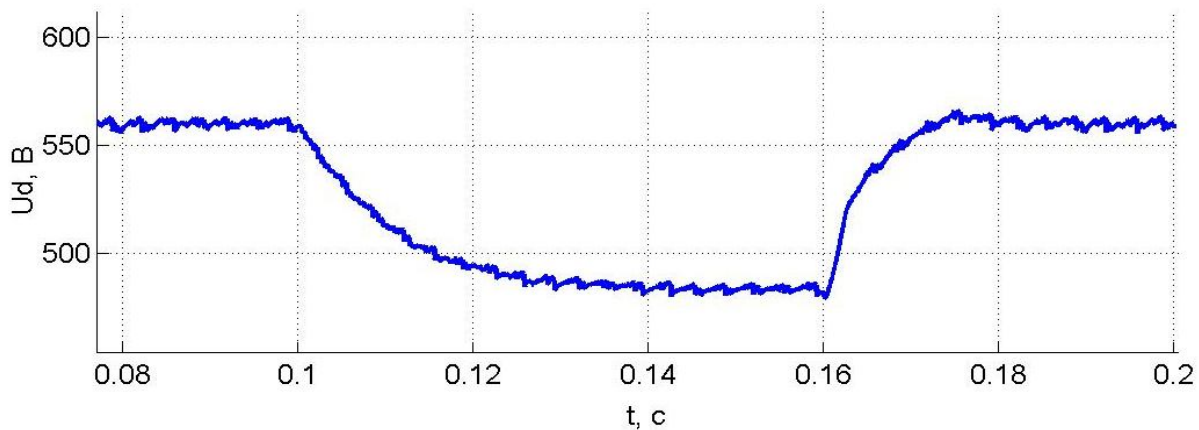
Для АВ найчастішим є режим споживання (передачі від мережі до електроприводу) активної потужності. Вважатимемо, що потужності АВ і електроприводу однакові. При цьому розглядаємо найважчий режим роботи електроприводу – пуск з максимально допустимим моментом (струмом). Втратами в каналі передачі енергії (АВ і АІН) нехтуємо. У такому режимі при прийнятій рівності потужностей можна сказати, що регулятор напруги АВ (по аналогії з регулятором швидкості АД-ПЧ) знаходиться в режимі насичення і формує завдання на максимальну амплітуду вхідного синусоїдального струму. Дослідимо на математичній моделі вплив коливань мережевої напруги на роботу системи регулювання АВ, а також вплив індуктивності вхідного дроселя на якість вхідного струму.

На рис. 1.11,а, б представлені результати моделювання провалу мережевої напруги до рівня $0,9E_{mf}$. На графіки виведені напруга на конденсаторі і напруга і струм фази А при значеннях індуктивності мережевого дроселя $L_{ДР} = 0,0005$ Гн (рис. 1.11,а) і $L_{ДР} = 0,005$ Гн (рис. 1.11,б).

Як зазначалось вище, система працює при насиченому регуляторі напруги, і це значить, що при номінальній напрузі мережі формується максимально допустимий струм. У моделі кратність обмеження струму прийнята рівною 2, що цілком відповідає використовуваній на практиці. В результаті зниження напруги мережі знижується рівень потужності, яка передається колом змінного струму. Потужність, споживана навантаженням, залишається на попередньому рівні, і це приводить до падіння напруги в ланці постійного струму до рівня, який забезпечить рівність потужностей. Це в свою чергу призводить до зменшення моменту



а)



б)

Рисунок 1.11 - Зниження мережевої напруги до рівня $0,9E_{mf}$ (а – при $L_{ДР} = 0,0005$ Гн, б - при $L_{ДР} = 0,005$ Гн)

асинхронного двигуна і зниження його перевантажувальної здатності. Очевидно, що для підтримки рівня потужності, що передається, при зниженні напруги мережі необхідно збільшити фазний струм. Визначимо, наскільки необхідно збільшити рівень обмеження струму для збереження рівня потужності до і після зниження напруги. Складемо баланс потужності при номінальній напрузі мережі і зниженій на 10% [16]:

$$\frac{3}{2} E_{mf} I_{maxf} = \frac{3}{2} \cdot 0,9 \cdot E_{mf} I_{f0,9},$$

де $I_{f0,9}$ – максимально можлива амплітуда фазного струму при зниженій на 10% напрузі мережі.

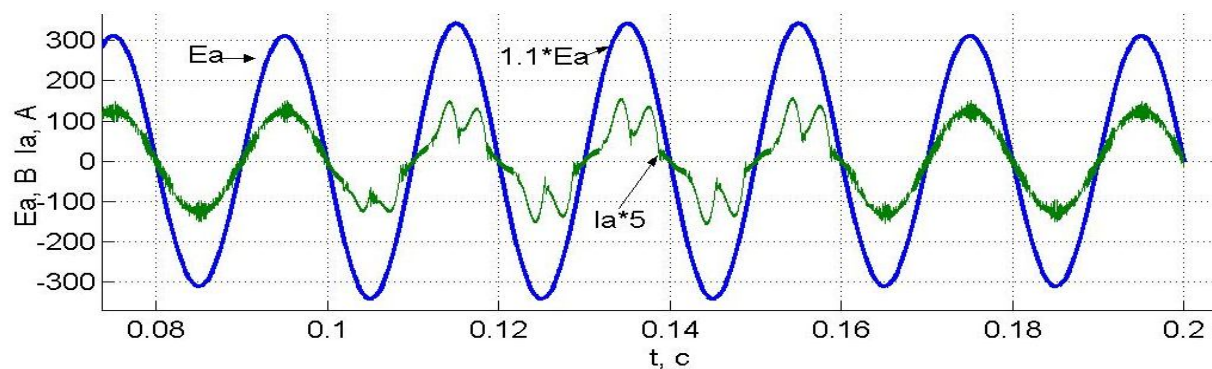
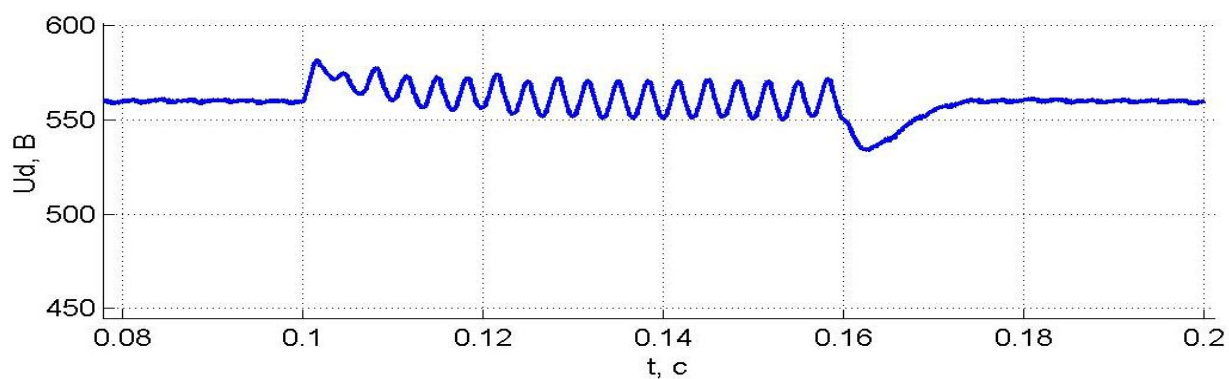
Знайдемо максимальне значення амплітуди фазного струму, яке відповідає необхідному рівню обмеження:

$$I_{f0,9} = \frac{2}{0,9} \cdot I_{mf} = 2,22 I_{mf}.$$

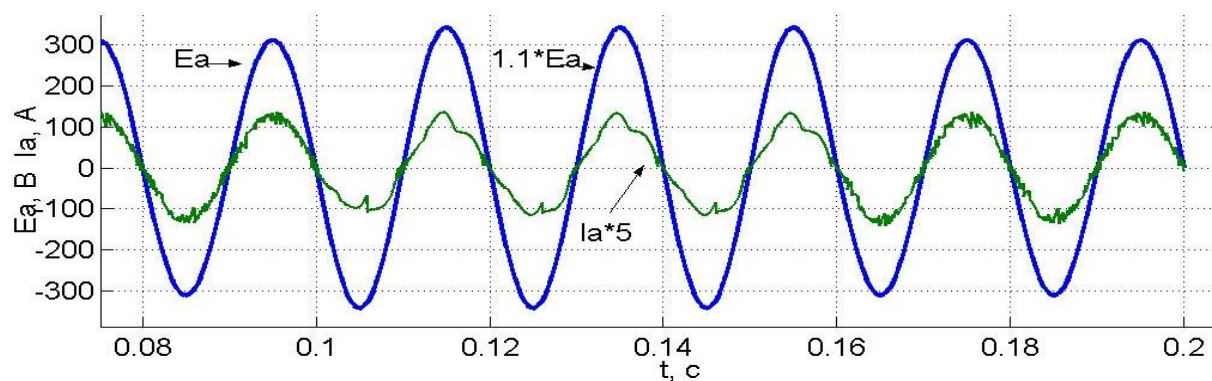
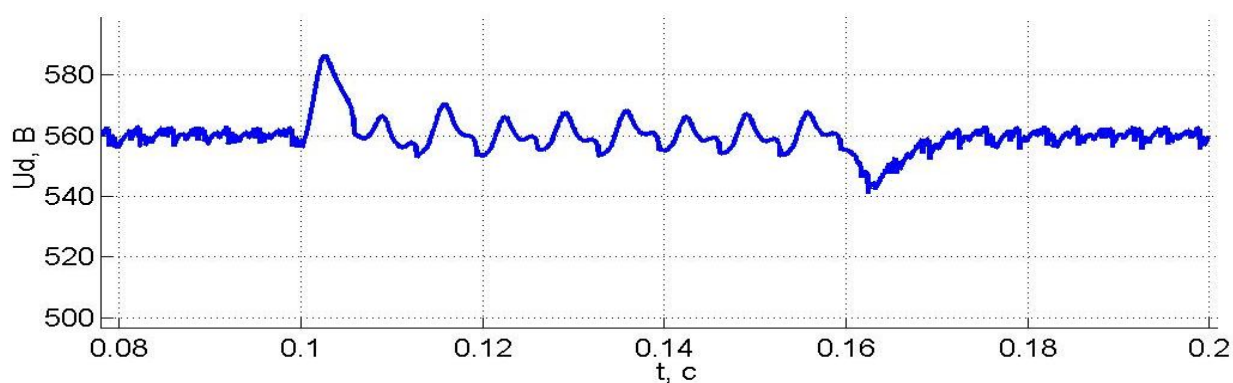
З одержаного виразу видно, що при зниженні фазної напруги на 10% рівень обмеження струму необхідно збільшити на 11-12%. Одержаний результат говорить про те, що для запобігання зниженню напруги в ланці постійного струму необхідно мати плаваюче обмеження струму або ж відразу закласти в систему регулювання підвищений рівень обмеження струму. Другий варіант є найпростішим, проте і в тому і іншому випадку необхідно збільшити потужності силових модулів, оскільки на практиці рівень зниження напруги може бути більшим ніж 10%.

Збільшення індуктивності вхідного дроселя приводить до помітного поліпшення форми струму, але при цьому спостерігається більше (приблизно на 15 В) зниження напруги в ланці постійного струму.

На рис. 1.12, а, б представлені результати моделювання підвищення мережевої напруги до рівня $1,1 E_{mf}$. На графіки виведені напруга на конденсаторі і напруга і струм фази A при значеннях індуктивності мережевого дроселя $L_{ДР} = 0,0005$ Гн (рис. 1.12,а) і $L_{ДР} = 0,005$ Гн (рис. 1.12,б). При збільшенні напруги в мережі на 10% ($U_{Л} = 418$ В) і роботі АВ в режимі некерованого випрямляча



а)



б)

Рисунок 1.12 - Підвищення мережевої напруги до рівня $1,1E_{mf}$ (а – при $L_{ДР} = 0,0005$ Гн, б - при $L_{ДР} = 0,005$ Гн)

напруга в ланці постійного струму повинна підвищитись до рівня $U_d = 590$ В, що перевищує рівень напруги, що стабілізується. Збільшення мережевої напруги також призводить до зменшення завдання на струм і виходу регулятора напруги з насичення. На графіках видно, що в перший момент часу відбувається підвищення напруги. Система управління намагається стабілізувати напругу на заданому рівні. Але через таку істотну зміну співвідношення напруг мережі і ланки постійного струму в системі немає можливості сформувати заданий струм навіть при його зниженні. Тому значно зростають коливання випрямленої напруги. При малих значеннях індуктивності вхідного дроселя форма мережевого струму нагадує струм некерованого випрямляча, що насправді і відбувається. АВ втрачає керованість і на графіку видно що він здатен і намагається працювати в області нульових напруг мережі. Збільшення індуктивності приводить до поліпшення синусоїдальної форми струму і зменшення частоти пульсацій випрямленої напруги, але негативний ефект від такого рішення – збільшення масогабаритних показників системи.

1.5 Експериментальний стенд для дослідження режимів активного випрямляча

Вимоги до стенду та його загальна структура

При розробці та реалізації експериментального стенду для нього були сформульовані наступні вимоги:

1. Доступність комплектуючих;
2. Простота технічної реалізації і наладки окремих вузлів та стенду в цілому;
3. Висока надійність;
4. Можливість швидкого і простого програмування алгоритмів керування;
5. Можливість збереження, перегляду і обробки експериментальних даних.

Оскільки експериментальний стенд призначений для дослідження і перевірки алгоритмів керування струмом електроприводів змінного струму на базі авто-

номних інверторів напруги, то для реалізації даної задачі необхідні наступні елементи:

- автономний інвертор напруги (АІН);
- ланка постійного струму зі змінною ємністю;
- мережеві дроселі;
- система керування (СК);
- датчики струму (ДС) і напруги (ДН).

Спрощена структурна схема стенду представлена на рис. 1.13. На схемі прийняті наступні позначення: R_{ϕ} , L_{ϕ} – активний опір та індуктивність фази мережі, $L_{д}$ – індуктивність вхідного дроселя, АВ з ШІМ – активний випрямляч з широтно-імпульсною модуляцією, $R_{т}$ – гальмівний резистор, $R_{з}$ – резистор для обмеження зарядного струму конденсатора, $R_{а}$ - резистор для налагодження рівня спрацювання аварійного захисту, К1 – реле, що шунтує зарядний опір у робочому режимі, К3 – реле, яке підключає навантаження до ланки постійного струму, КЗ – аварійне реле, спрацьовує при відповідному рівні перенапруги на конденсаторі, ДН – датчик напруги, ДТ – датчик струму.

Силова частина експериментального стенду

В якості активного випрямляча було використано силовий інтелектуальний модуль (СІМ) фірми Mitsubishi Electric PS11016 [1], технічні характеристики якого приведені в табл. 1.2. Структурна схема модуля приведена на рис. 1.13. У склад СІМ входять: 3-и фазний інвертор із 6-ти IGBT-транзисторів, гальмівний ключ, призначений для скидання зайвої енергії ланки постійного струму, схема узгодження рівнів напруги керування, схема захисту і блокувань, схема керування напругою живлення. Модуль має наступні захисти та сигналізації:

- сигналізація и захист від короткого замикання;
- сигналізація и захист від перенапруги;
- сигналізація и захист від зниження напруги;
- сигналізація и захист від перегріву;
- сигналізація перевантаження за струмом.

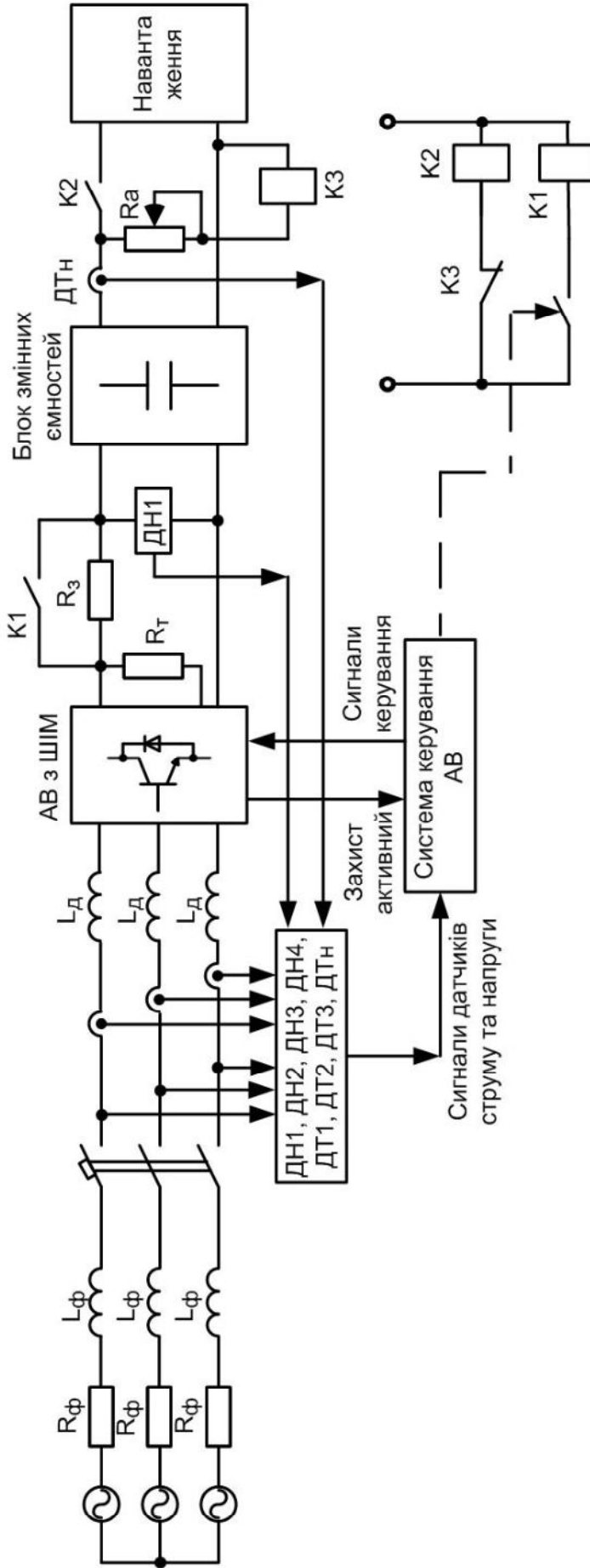


Рисунок 1.13 – Структурна схема експериментального стенду

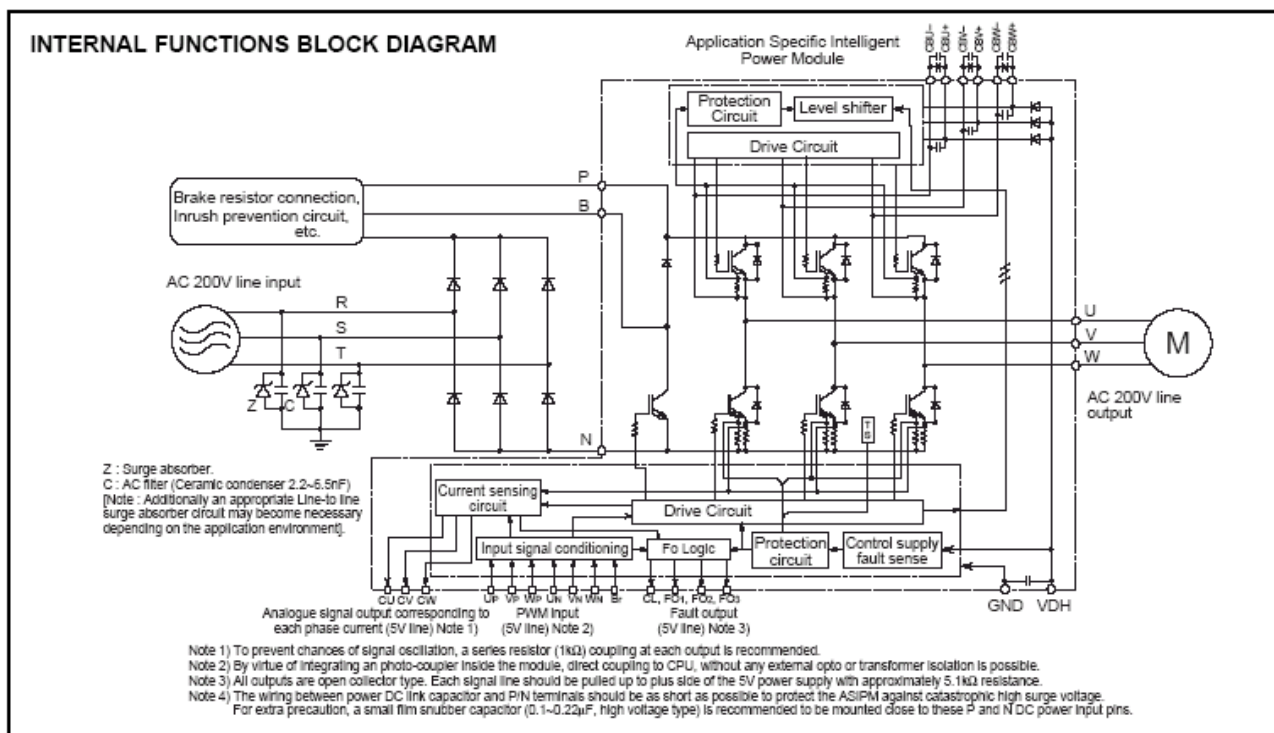


Рисунок 1.14 - Структурна схема CIM PS11016

Рівень напруги вхідних і вихідних сигналів 5В (сумісний із КМОП/ТТЛ). Усі вхідні сигнали подаються через тригер Шмітта, котрий забезпечує більш чітке розділення логічних рівнів. Як видно із рис. 1.13, використання CIM дозволило максимально спростити розробку силової частини стенду і її зв'язок із системою керування.

Таблиця 1.2 - Технічні характеристики CIM PS11016

Найменування	Рівень
Напруга живлення	до 450 В
Статична напруга колектор-емітер кожного IGBT	600 В
Струм колектора IGBT	15 А
Струм колектора гальмівного IGBT	15 А
Анодний струм гальмівного діода	15 А
Напруга живлення ланок керування і сигналізації	15 В
Напруга вхідного сигналу (сигналу керування)	0 – 5 В
Напруга вихідного сигналу похибки	0 – 5 В
Вихідний струм сигналу похибки	15 мА
Напруга виходу попередження про перевантаження за струмом (CL)	0 – 5 В
Струм виходу CL	15 мА
Аналоговий струмовий сигнал, пропорційний вихідному струму	±1

Датчики

У якості датчиків струму і напруги використовувались датчики фірми LEM, що працюють на ефекті Холла. Залучення датчиків із ефектом Холла дозволяє організувати потенціально розв'язку високовольтних силових ланцюгів і низьковольтних ланцюгів керування без використання додаткових пристроїв (модуляторів, демодуляторів, трансформаторів и т.п.). Технічні характеристики датчиків приведені в табл. 1.3 - 1.5. На рис. 1.15, 1.16 надані схеми вмикання відібраних датчиків.

Таблиця 1.3 - Датчик струму LA25-NP

Вимірювані діапазони струмів	5-6-8-12-25 А
Номинальний вхідний струм	25 А
Діапазон перетворення	± 36 А
Напруга живлення датчика	± 15 В
Діюче значення струму на виході датчика	0 - 25 мА
Напруга ізоляції	2500 В
Коефіцієнт перетворення	1-2-3-4-5:1000
Робочий температурний діапазон	$-40 + 85$ °С
Робоча напруга	600 В
Опір навантажувального резистора	150 – 325 Ом

Таблиця 1.4 - Вибір діапазону вимірювання датчика струму

Кол-во первичних витків	Первичный ток		Номинальный выходной ток I_{SN} [mA]	Коефф. трансформации K_N	Сопротивление первичной цепи, мОм	Индуктивность первичной цепи L_p , мкГн	Схема подключения
	номин. ток I_{PN} , А	макс. ток I_p , А					
1	25	36	25	1/1000	0,3	0,023	
2	12	18	24	2/1000	1,1	0,09	
3	8	12	24	3/1000	2,5	0,21	
4	6	9	24	4/1000	4,4	0,37	
5	5	7	25	5/1000	6,3	0,58	

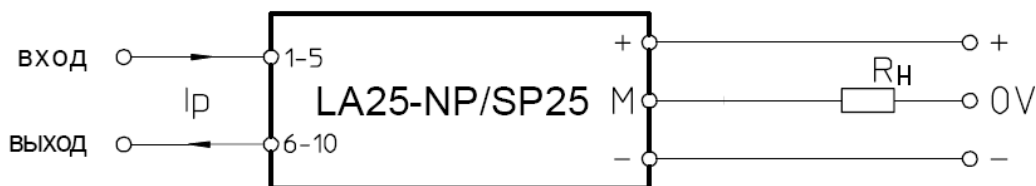


Рисунок 1.15 - Схема підключення датчика струму

Таблиця 1.5 - Датчик напруги LV25-P

Вимірювальний діапазон напруг	10-500 В
Напруга живлення датчика	± 15 В
Діюче значення струму на виході датчика	0 - 25 мА
Напруга ізоляції	2500 В
Робочий температурний діапазон	0 + 70 °С

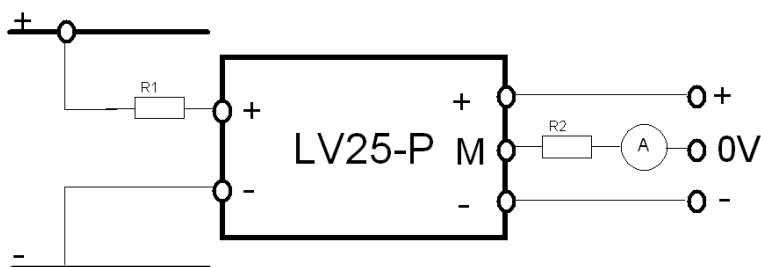


Рисунок 1.16 - Схема підключення датчика напруги

Система керування

При виборі пристрою, що реалізує систему керування, розглядалися наступні фактори:

- простота програмування алгоритмів;
- мінімум додаткових засобів, необхідних для адаптації програм алгоритмів до робочих умов;
- простота обміну інформацією поміж системою керування і об'єктом.

Фактично вибір здійснювався поміж персональними комп'ютерами (ПК), одноплатними контролерами і системами, що побудовані на базі цифрових сигнальних процесорів. Вибір був зроблений на користь персонального комп'ютера із використанням додаткових плат аналого-цифрового перетворення (АЦП) і цифрового вводу-виводу (ЦВВ) з інтерфейсом ISA.

Для реалізації системи керування був використаний ПК на базі мікропроцесора i486DX з тактовою частотою 100 МГц і вбудованим математичним співпроцесором. Оскільки система керування електроприводом працює в реальному часі, то в якості керуючої операційної системи для комп'ютера була вибрана однозадачна операційна система DOS 6.0. Дана операційна система, у відмінності, наприклад, від Windows, дозволяє безпосередньо керувати апаратними ресурсами комп'ютера (таймерами, перериваннями и т.п.), що є важливим фактором при керуванні у режимі реального часу. До того ж операційна система DOS 6.0 є досить поширеною і відомою.

Використання ПК дозволить працювати з мовами програмування високого рівня, такими як Turbo Pascal, Turbo C, C++, Delphi. Це дозволить значно прискорити програмування алгоритмів керування, так як позбавляє від необхідності знати мову асемблера, що використовується у мікропроцесорі чи мікроконтролері. Фактично всі мікропроцесори і мікроконтролери реальних цифрових систем керування не мають математичних співпроцесорів і використовують операції із цілими числами, що зменшує час на обчислення керуючих впливів. Наявність математичного співпроцесора у сукупності із використанням мов програмування високого рівня дозволить використовувати операції із плаваючою крапкою, що дещо спростить розуміння програмного коду і початкові випробування алгоритмів. Хоча багато спеціалізованих цифрових сигнальних процесорів мають вбудовані команди обчислення нелінійних функцій (корінь квадратний, піднесення у ступінь, синус, косинус и т.п.), використання мов програмування дозволить досить просто працювати як із цілими числами, так і з дрібними.

Технічні характеристики плат АЦП [2] і ЦВВ [3] приведені в табл. 1.6 і табл. 1.7. Плата АЦП є багатоканальним швидкодіючим 12-ти розрядним АЦП із гальванічною ізоляцією каналу вимірювання від шини живлення комп'ютера і призначена для роботи в ПК типу IBM PC/AT. Використання даної плати дозволяє одночасно проводити швидку оцифрування високочастотних сигналів від усіх датчиків, що використовуються, із наступною передачею даних у керуючу програму ПК. Для перетворення аналогового сигналу в цифровий

використовується 11 розрядів АЦП, оскільки старший 12-й розряд є знаковим. Це дозволяє отримати 2047 рівнів вимірюваного сигналу, що цілком задовольняє вимогам, що висуваються до експериментального стенду по точності вимірювань.

Плата ЦВВ уявляє собою пристрій гальванічно розв'язаного дискретного вводу-виводу із потужними виходами і таймерами (в залежності від модифікації) і призначена для роботи з ПК типу IBM PC/AT. В експериментальному стенді плата забезпечує формування і вивід керуючих сигналів ТТЛ рівня, що надходять на бази силових транзисторів СИМ. Плата також забезпечує ввід в керуючу програму сигналів захисту, що надходять від СИМ. Завдяки наявності потужних виходів за допомогою даної плати можливо організувати керування зовнішньою комутуючою апаратурою та іншими пристроями, що в подальшому дозволить розширити можливості стенда і зробити його більш гнучким в роботі і керуванні.

Схема узгодження сигналів СИМ і системи керування, що реалізована за допомогою плати ЦВВ, представлена на рис. 1.17.

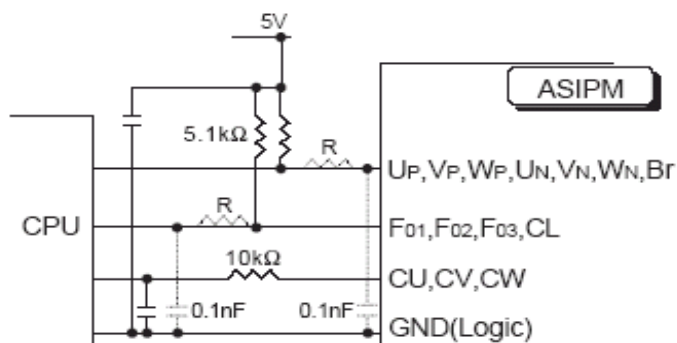


Рисунок 1.17 - Схема узгодження сигналів

У відповідності з рис. 1.14 і рис. 1.17 слід додати, що силовий інтелектуальний модуль має три аналогових сигнали CU, CV, CW, пропорційних вихідному струму модуля. До недоліків використання цих сигналів потрібно віднести їх маленький діапазон зміни (1.17 – 3.37 В) при діапазоні зміни амплітудного значення струму $\pm 200\%$. Використання даних сигналів в якості сигналів зворотного зв'язку за струмом може привести до втрати точності вимірювання струму.

Таблиця 1.6 - Плата АЦП WAD-AD12-128H

Параметр	Значення
1	2
Число вхідних каналів	до 128 недиференційних або 64 диференційних
Розрядність АЦП	12 двійкових розрядів
Формат вихідного коду	доповнюючий двійковий код
Час перетворення	1,4 мкс
ОЗУ	FIFO 2Kx16 біт
Діапазони вхідної напруги: базовий: із використанням ділення на 2 (апаратно, для всіх входів одночасно):	від -5 В до +5 В від -10 В до +10 В
Величина одиниці молодшого розряду при роботі в діапазонах від -5 В до +5 В	2.44 мВ
Інтегральна нелінійність в базових діапазонах	не більше 0.1%
Погрішність зміщення нуля при роботі без додаткового підсилення (режими +/-5 В; +/-10 В)	0.05%
Напруга зміщення, що приведена до входу	не більше 100 мкВ (тип. значення <50)
Смуга пропускання додаткових підсилювачів	не менше 200 кГц
Вхідний опір	1 МОм
Вхідна ємність	не більше 8 пФ
Гранично припустима вхідна напруга	+/-15 В
Припустимий вхідний струм при перебільшенні вхідної напруги понад +/-15 В	60 мА
Пробивна напруга ізоляції	не менше 3.5 кВ
Дискретність зміни інтервалу запуску від вбудованого таймера	0,4 мкс
Струм, що споживається від джерела +5 В	170 мА
Струм, що споживається від джерела +12 В	250 мА
Можливі базові адреси	2x0, 3x0, де x - 0...f
Лінії переривання	IRQ: 5, 10, 11, 12, 15
Режим роботи модуля	тривалий

Таблиця 1.7 - Плата ЦВВ WAD-MIO64T32H

Параметр	Значення
Гальванічно розв'язаний дискретний ввід	
Кількість входів	64 незалежно розв'язаних
Логічні рівні	ТТЛ
Ввід даних	програмний
Пробивна напруга ізоляції	5 кВ
Пробивна напруга поміж сусідніми входами	500 В
Максимальна частота зміни сигналу на входах	200 кГц
Гальванічно розв'язаний вивід	
Кількість виходів	32
Живлення	зовнішнє, +5 ... +200 В, 2 мА (max)
Напруга, що комутується	+5 В ... +200 В
Максимальний постійний струм	1 А
Максимальний імпульсний струм (Т _и < 1 мс)	5 А
Опір відкритих ключів, не більше	1 Ом
Логіка	інверсна, "0"- ключ закритий, "1"- ключ відкритий
Канали лічильників-таймерів	
Тип пристрою	i8254 (аналог - ВІ54)
Розрядність лічильників	16 біт
Загальна кількість входних лічильних ліній	6
Входи сигналів дозволу лічби (GATE)	6 (0 - заборона лічби, 1 - дозвіл)
Максимальна входна тактова частота	10 МГц
Логічні рівні	ТТЛ – "0" - 0..0,5 В; "1" - 2,7..5 В
Струм, що споживається від джерела +5 В	170 мА
Можливі базові адреси	2x0, 3x0, де x - 0...f
Лінії переривань	IRQ: 5, 10, 11, 12, 15
Джерело переривань	вибирається апаратно, вихід одного із каналів таймера

Ланка постійного струму

Ланка постійного струму складається з чотирьох конденсаторів ємністю 200 мкФ і напругою 400 В. Вони можуть з'єднуватись послідовно и паралельно у будь-яких комбінаціях. Це дозволить отримати сумарну ємність від 50 –до 800 мкФ.

Гальмівний резистор R_T призначений для додаткового розсіювання енергії конденсаторів при виникненні значних перенапруг та у аварійному режимі. Він включається у роботу за допомогою гальмівного транзистора у складі СІМ. Резистор R_a призначений для встановлення рівня напруги спрацювання аварійного реле К3 при виникненні перенапруг на конденсаторі. При спрацюванні реле К3 від ланки постійного струму за допомогою реле К2 від'єднується навантаження (рис. 1.13) і зупиняється заряд конденсатора.

1.6 Програмне забезпечення експериментального стенда

Програмне забезпечення експериментального стенда складається із набору підпрограм (функцій), котрі можна поділити на наступні групи:

- підпрограми, що призначені для настройки та обслуговування апаратної частини стенда;
- підпрограми, що реалізують алгоритми керування;
- підпрограми, що складають окремі елементи системи керування.

Підпрограми, що призначені для настройки та обслуговування апаратної частини стенду, викликаються один раз перед початком роботи основної програми. Інші програми використовуються в циклічному обчислювальному процесі.

Підпрограми настройки та обслуговування апаратної частини експериментального стенда

Даний тип підпрограм призначений для настройки режимів роботи плат АЦП, ЦВВ і різних пристроїв ПК, таких, як таймер, контролер переривань, і початкової установки СІМ.

Передача даних поміж ПК і платами АЦП и ЦВВ здійснюється по системній шині стандарту ISA. Фізичні адреси даних пристроїв обираються із можливого діапазону адрес, вказаних в табл. 1.5 и табл. 1.6 за допомогою установки відповідних перемикачів згідно [2, 3] і були встановлені наступними – ЦВВ: ввід - 36C h, вивід - 368h, АЦП – 30Ch, 303h. Нижче приведені блок-схеми і вихідні тексти підпрограм із описом функцій, що виконуються.

Функції `Bootstrep_Set()` і `Sbros_F01()` призначені для обслуговування силового модуля і виконують наступні дії при його початковому запуску:

- `Bootstrep_Set()` – виконує початкову зарядку конденсаторів, котрі використовуються в якості джерела живлення драйверів верхніх ключів інвертора. Якщо драйвери живляться від стабілізованих джерел живлення, то ця функція не використовується.
- `Sbros_F01()` – скидання захисту. Вихід F01 силового модуля використовується як сигнал захисту від короткого замикання для IGBT нижнього плеча і вхід блокування проти помилкового спрацьовування транзисторів. При початковому запуску (подачі живлення на силовий модуль) встановлюється в активний рівень 0 (ON).

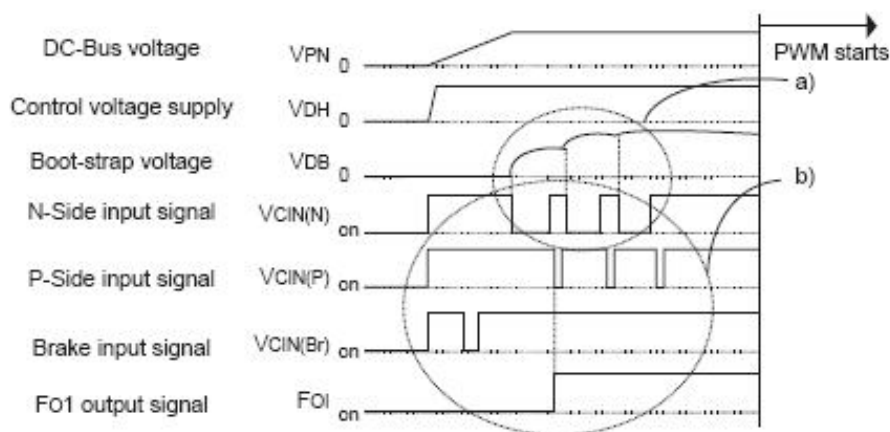
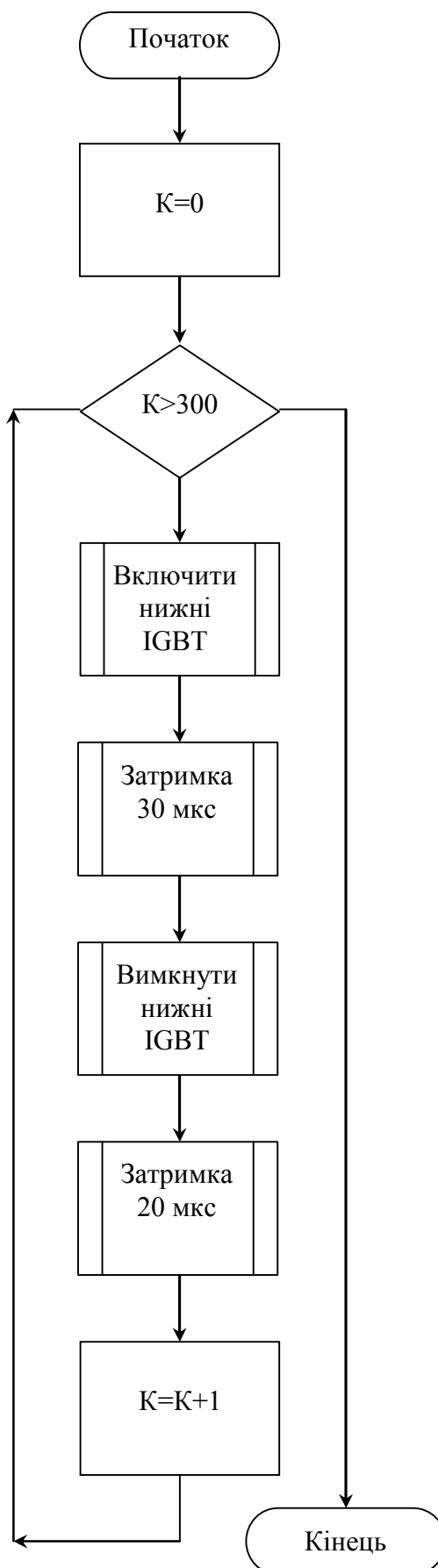


Рисунок 1.18 - Зарядка бутстрепних конденсаторів і скидання захисту F01

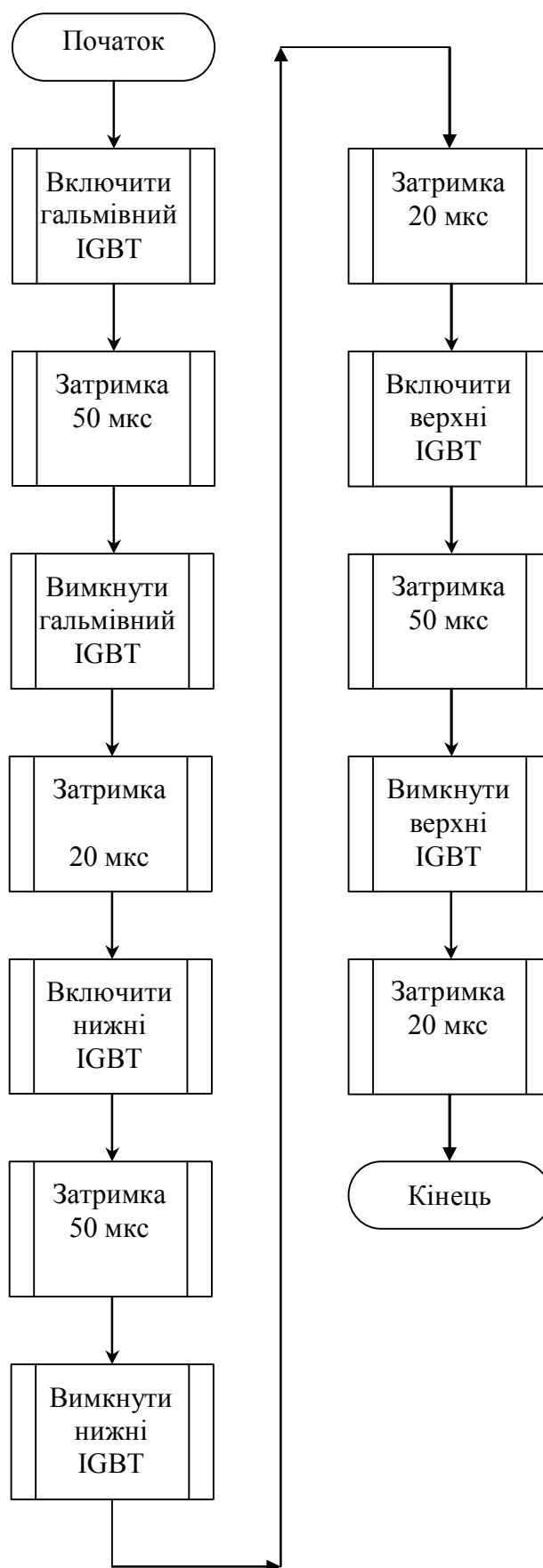
Для зарядки бутстрепних ємностей необхідно задати серію коротких імпульсів (ON) на всі входи IGBT N-сторони для зарядки відповідної ємності (ширина імпульсу 20 мкс, число імпульсів 10 – 500 в залежності від ємності). Скидання сигналу F01 виконується подачею сигналів (ON) на наступні ніжки в такому порядку: $Br \rightarrow Un/Vn/Wn \rightarrow Up/Vp/Wp$ (рис. 1.18) [1].

Блок-схема алгоритму програми зарядки бутстрепних конденсаторів

Bootstrap_Set()



Блок-схема алгоритму програми скидання захисту F01 Sbros_F01()



Текст програми Bootstrep_Set():

```
void Bootstrep_Set(void)
{ int k;
  for(k=0;k<300;k++)
  {
    Out_Data(DIO_OUT, N_IGBT_ON);
    Zadergka(30);
    Out_Data(DIO_OUT, ALL_IGBT_OFF);
    Zadergka(20);
  }
}
```

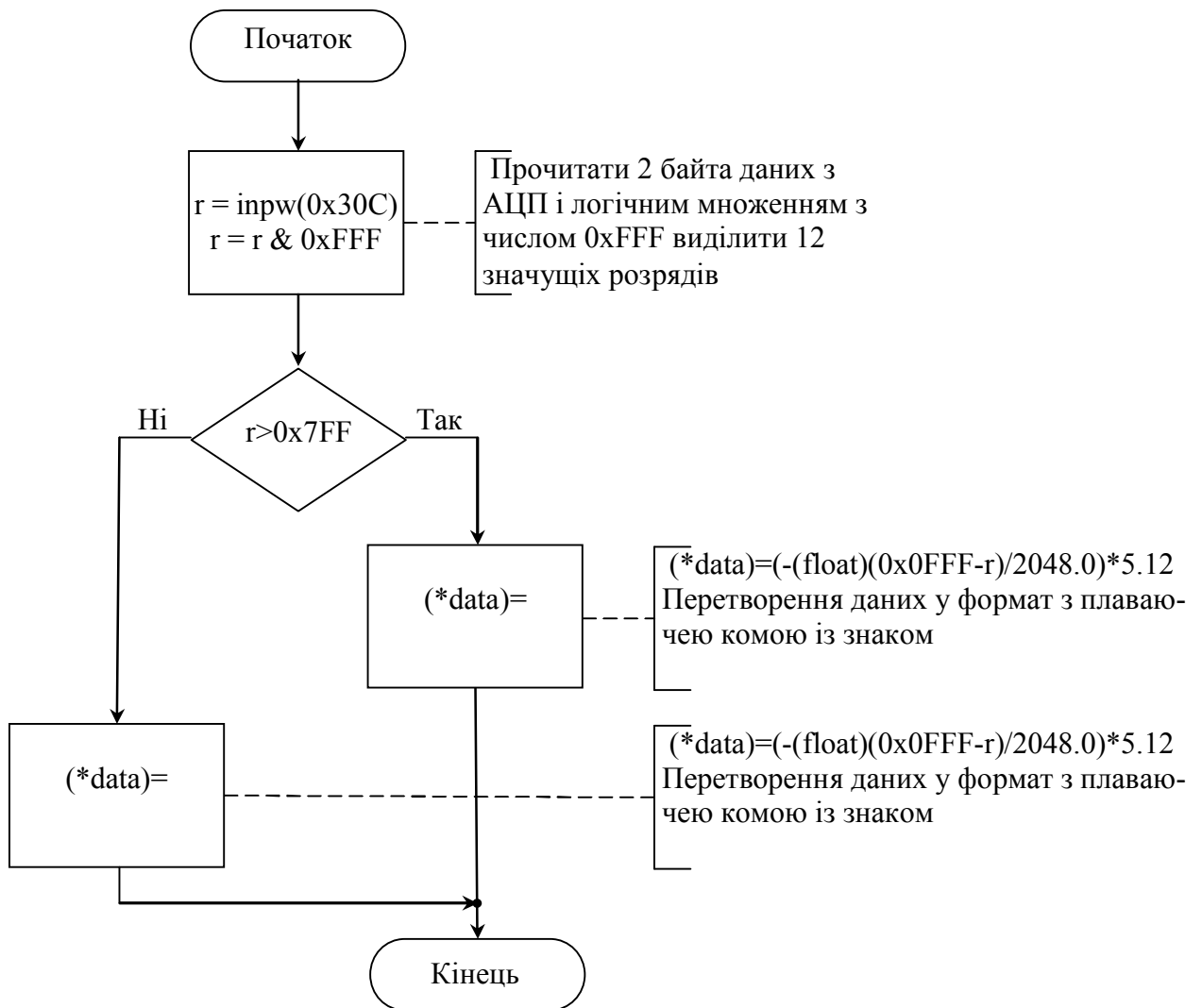
Текст програми Sbros_F01:

```
void Sbros_F01 (void)
{
  Zadergka(25);
  Out_Data(DIO_OUT, Br_ON_ALL_OFF);
  Zadergka(50);
  Out_Data(DIO_OUT, ALL_IGBT_OFF);
  Out_Data(DIO_OUT, N_IGBT_ON);
  Zadergka(50);
  Out_Data(DIO_OUT, ALL_IGBT_OFF);
  Dead_Time(20);
  Out_Data(DIO_OUT, P_IGBT_ON);
  Zadergka(50);
  Out_Data(DIO_OUT, ALL_IGBT_OFF);
  Zadergka(20);
}
```

Функція Preobr_ADC_Data призначена для зчитування даних з АЦП і їх подальшого перетворення до формату із плаваючою крапкою зі знаком. Перетворення даних пов'язане з тим, що обробка даних в програмі ведеться в форматі із плаваючою крапкою, а на виході АЦП формується додатковий код у вигляді цілих чисел, де старший біт визначає знак числа. Співвідношення між кодами в шістнадцятиричному форматі на виході АЦП і напругою на вході має вигляд [2]:

Код	Напруга
07ff	+10.24В (+5.12В)
.....
0000	0 В
0fff	-0.005 В (-0.0024 В)
.....
800	-10.24В (-5.12В)

Блок-схема алгоритму підпрограми обробки даних АЦП



Текст програми має вигляд:

```

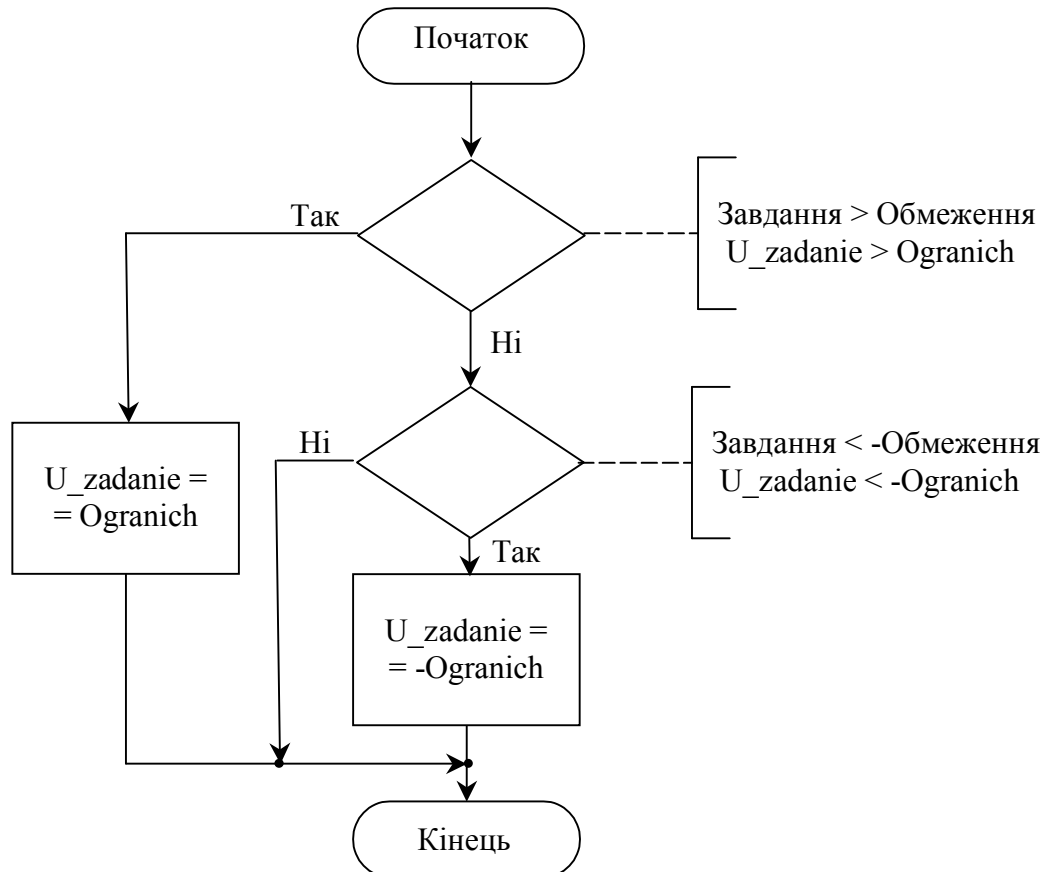
void Preobr_ADC_Data(float *data)
{ int r;
  r=(inpw(0x30c) & 0xfff);
  if(r>0x07ff)
    (*data)=-(float)(0x0FFF-r)/2048.0*5.12;
  else
    (*data)=((float)r/2048.0)*5.12;
}
  
```

Підпрограми елементів системи керування

Підпрограми даного типу утворюють елементи системи керування, такі як блок формування завдань, блок обмеження, задавачі інтенсивності і т.п.

Підпрограма Ogranichenie() реалізує нелінійний функціональний блок “обмеження”.

Блок-схема програми функції Ogranichenie()

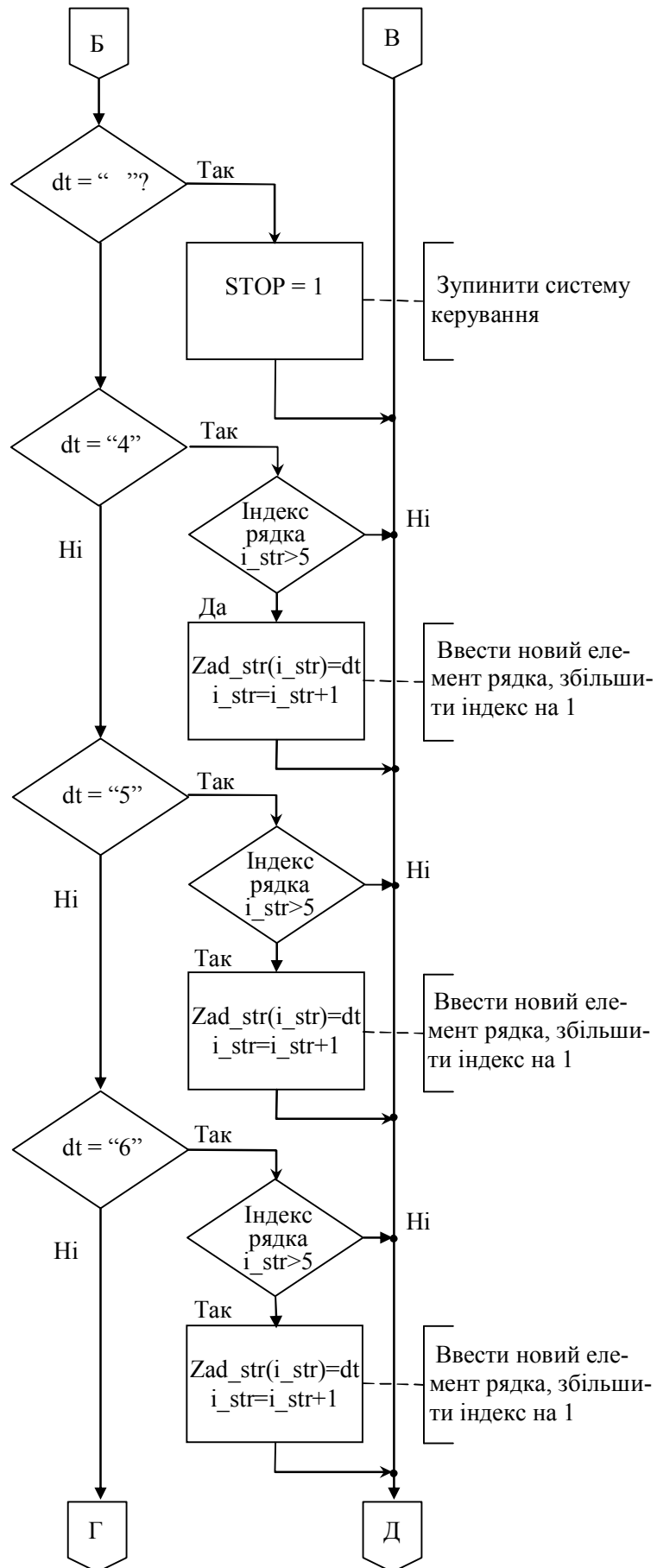


Текст програми функції Ogranichenie():

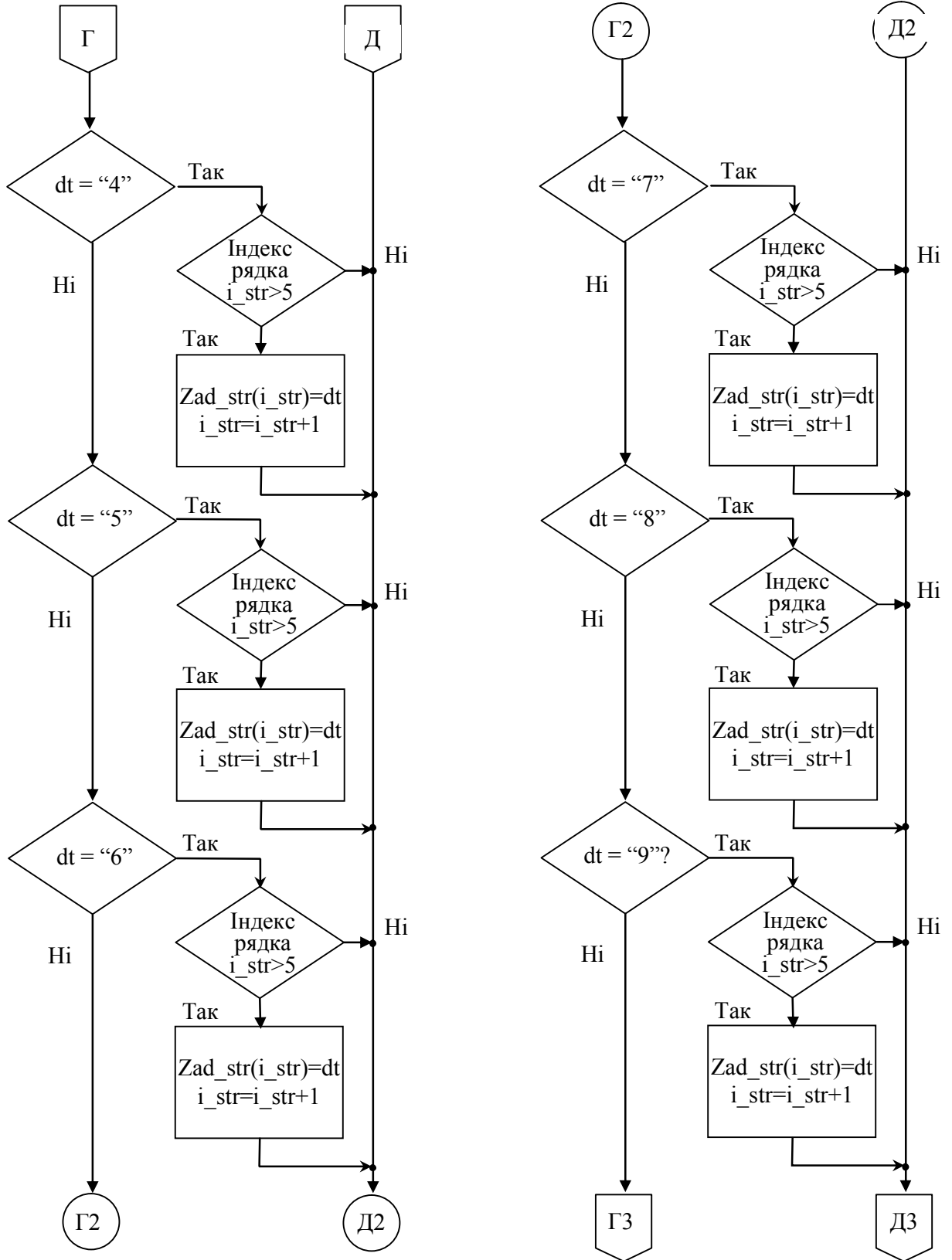
```

void Ogranichenie(float *U_zadanie)
{ if ((*U_zadanie)>Ogranich)
  (*U_zadanie)=Ogranich;
  if ((*U_zadanie)<-Ogranich)
  (*U_zadanie)=-Ogranich;
}
  
```

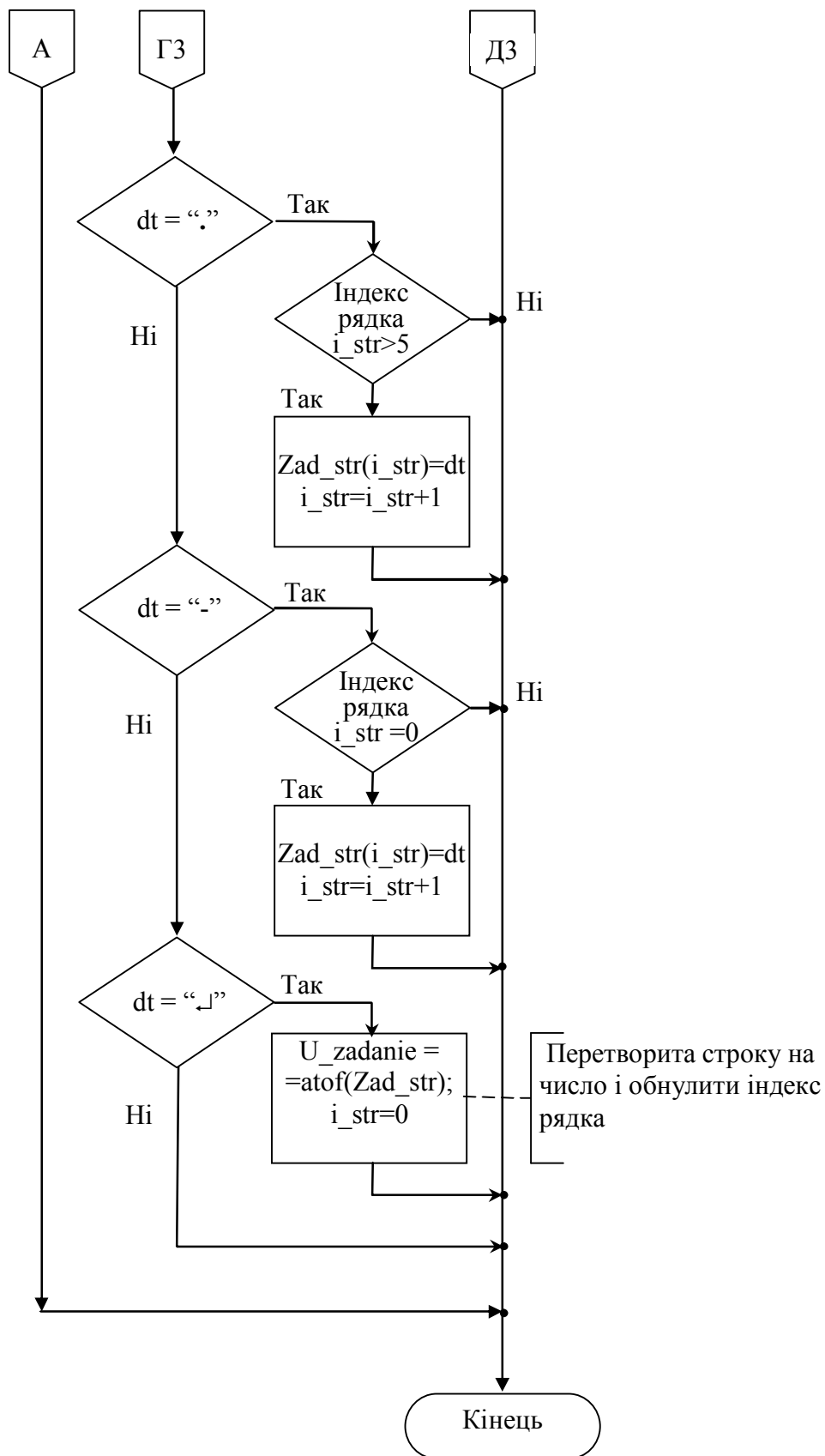

Продовження блок-схеми програми функції Zadanie()



Продовження блок-схеми програми функції Zadanie()



Закінчення блок-схеми програми функції Zadanie()



Текст програми функції Zadanie():

```

void Zadanie(float *U_zadanie,char *RUN, char *STOP,char Zad_str[],char *i_str)
{ char dt;
  if (kbhit())
  { dt=getch();
    switch (dt)
    { case 'w': //'w' 119
      *U_zadanie+=d_Uzad; //yvelichit zadanie
      break;
      case 's': //'s' 115
      *U_zadanie-=d_Uzad; //ymenshit zadanie
      break;
      case 'a':
      *RUN=1; //Pusk
      // STOP=1;
      break;
      case ' ': //probel
      *STOP=0; //Stop
      // RUN=0;
      break;
      case '0':
      if((*i_str)<5)
      { Zad_str[*i_str]=dt; (*i_str)++; }
      break;
      case '1':
      if((*i_str)<5)
      { Zad_str[*i_str]=dt; (*i_str)++; }
      break;
      case '2':
      if((*i_str)<5)
      { Zad_str[*i_str]=dt; (*i_str)++; }
      break;
      case '3':
      if((*i_str)<5)
      { Zad_str[*i_str]=dt; (*i_str)++; }
      break;
      case '4':
      if((*i_str)<5)
      { Zad_str[*i_str]=dt; (*i_str)++; }
      break;
      case '5':
      if((*i_str)<5)
      { Zad_str[*i_str]=dt; (*i_str)++; }
      break;
      case '6':
      if((*i_str)<5)
      { Zad_str[*i_str]=dt; (*i_str)++; }
      break;
      case '7':
      if((*i_str)<5)
      { Zad_str[*i_str]=dt; (*i_str)++; }
      break;
    }
  }
}

```



```

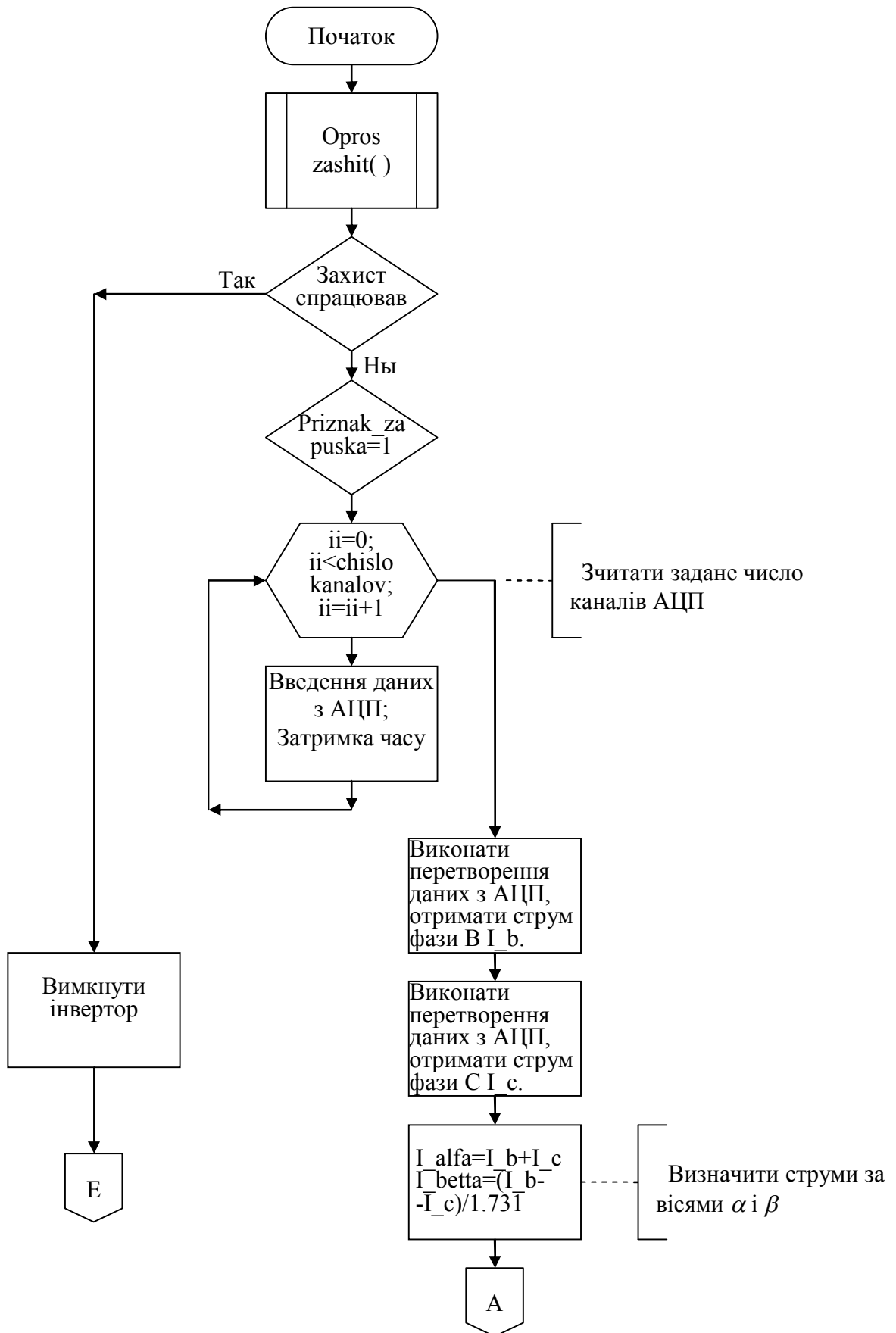
case '8':
    if((*i_str)<5)
        { Zad_str[*i_str]=dt; (*i_str)++; }
    break;
case '9':
    if((*i_str)<5)
        { Zad_str[*i_str]=dt; (*i_str)++; }
    break;
case '!':
    if((*i_str)<5)
        { Zad_str[*i_str]=dt; (*i_str)++; }
    break;
case '-':
    if((*i_str)==0)
        { Zad_str[*i_str]=dt; (*i_str)++; }
    break;
case 13: //Enter
    *i_str=0;
    *U_zadanie=(float)atof(Zad_str);
    break;
    }
}
}

```

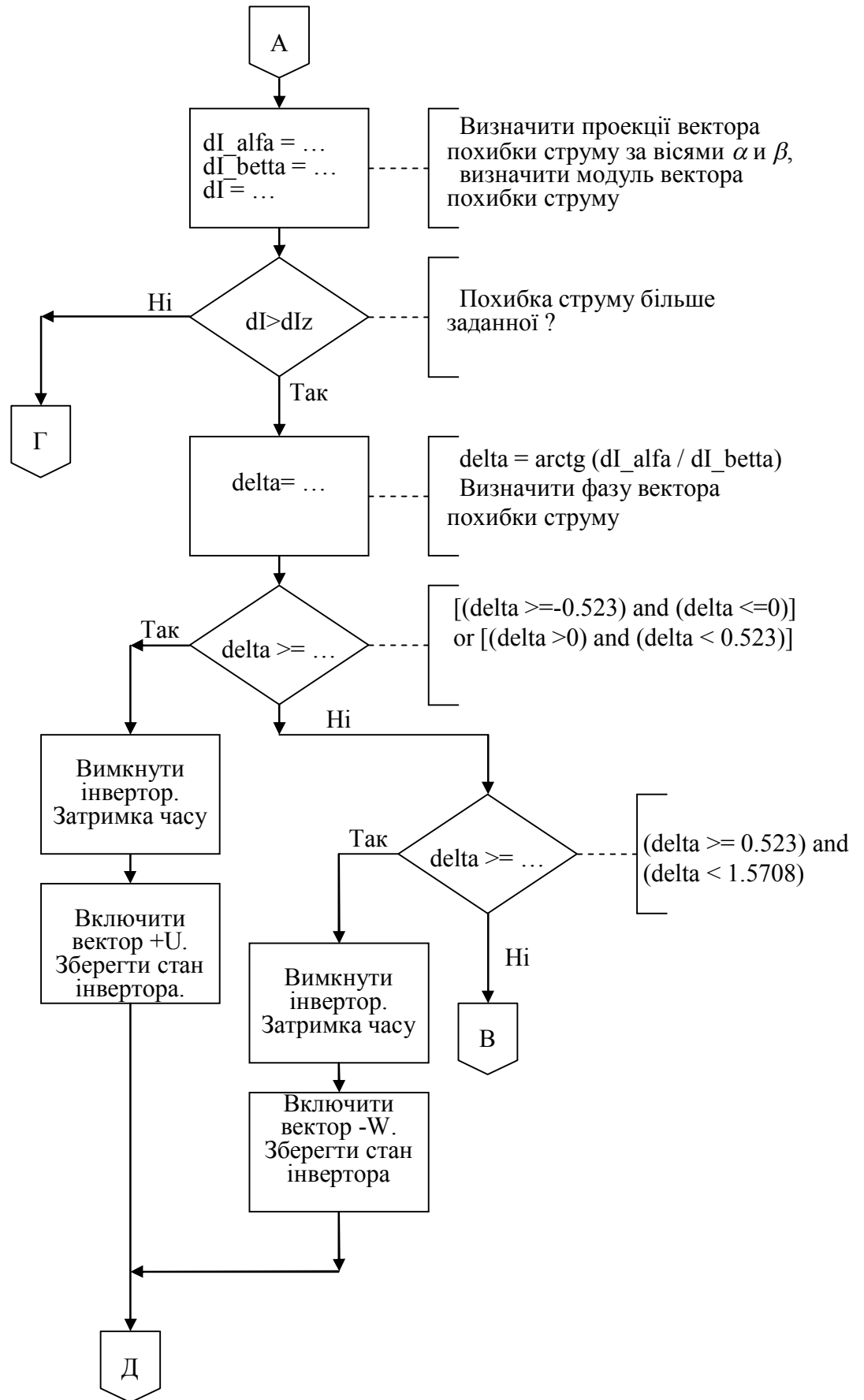
Підпрограми алгоритмів керування

Підпрограми даного типу реалізують цифрові регулятори струму і напруги. Нижче наведено приклад блок-схеми і програми векторного релейного регулятора струму, описаного у попередньому розділі. Програма регулятора може використовуватись в двох варіантах: як програма-обробник переривань таймера ПК і як функція, що викликається в головній програмі. Перший варіант забезпечує більш надійне тактування системи. Другий варіант простіший у реалізації, але потребує уточнення значення періоду дискретизації. Програма працює наступним чином. Спочатку опитуються сигнали захисту СИМ, якщо нема аварії, перевіряється признак запуску системи (команда запуску системи активна чи ні). Після цього відбувається опитування АЦП (сигнали з датчиків струму та напруги), визначення похибки регулювання струму і вибір стану інвертора.

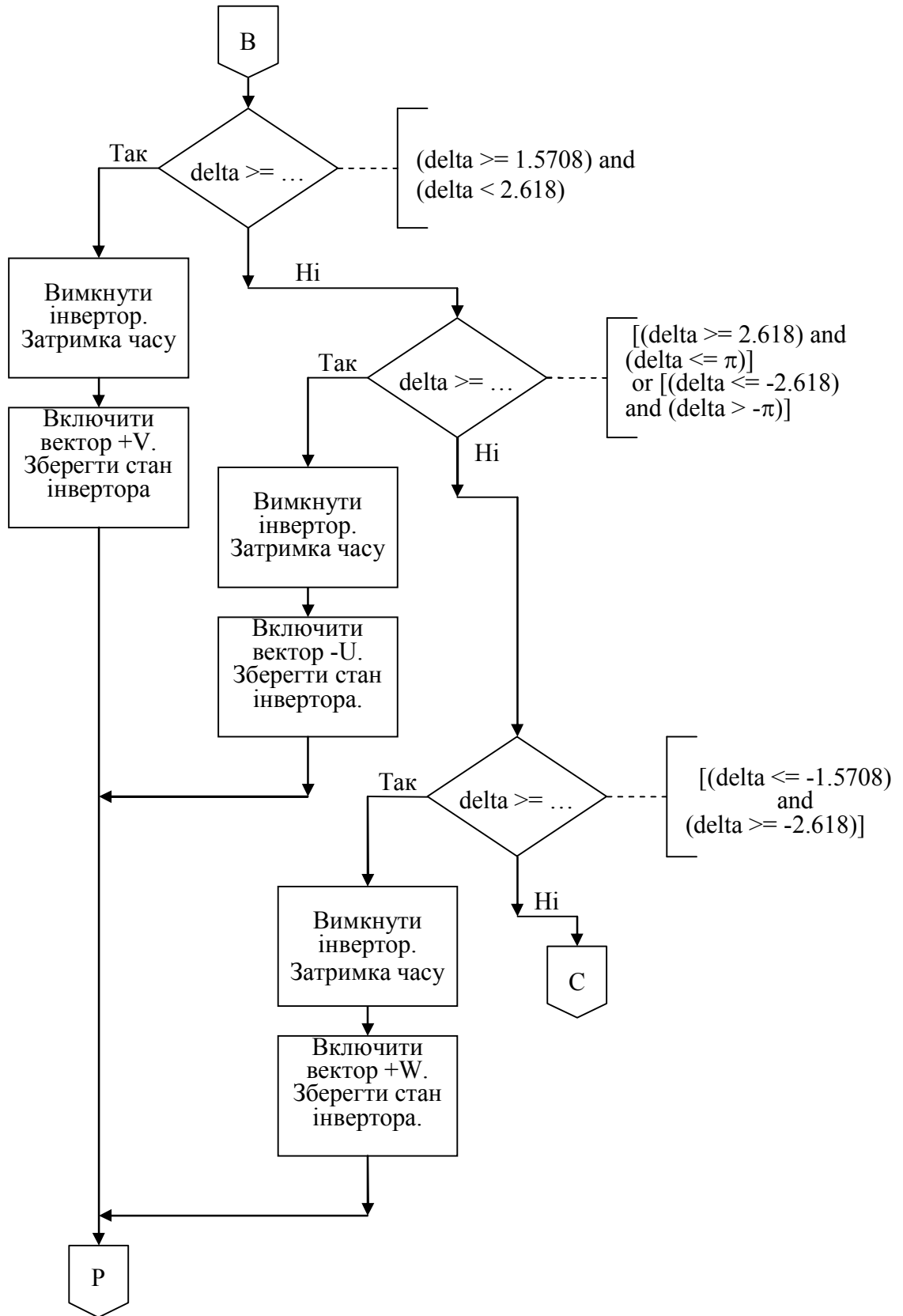
Блок-схема програми регулятора струму



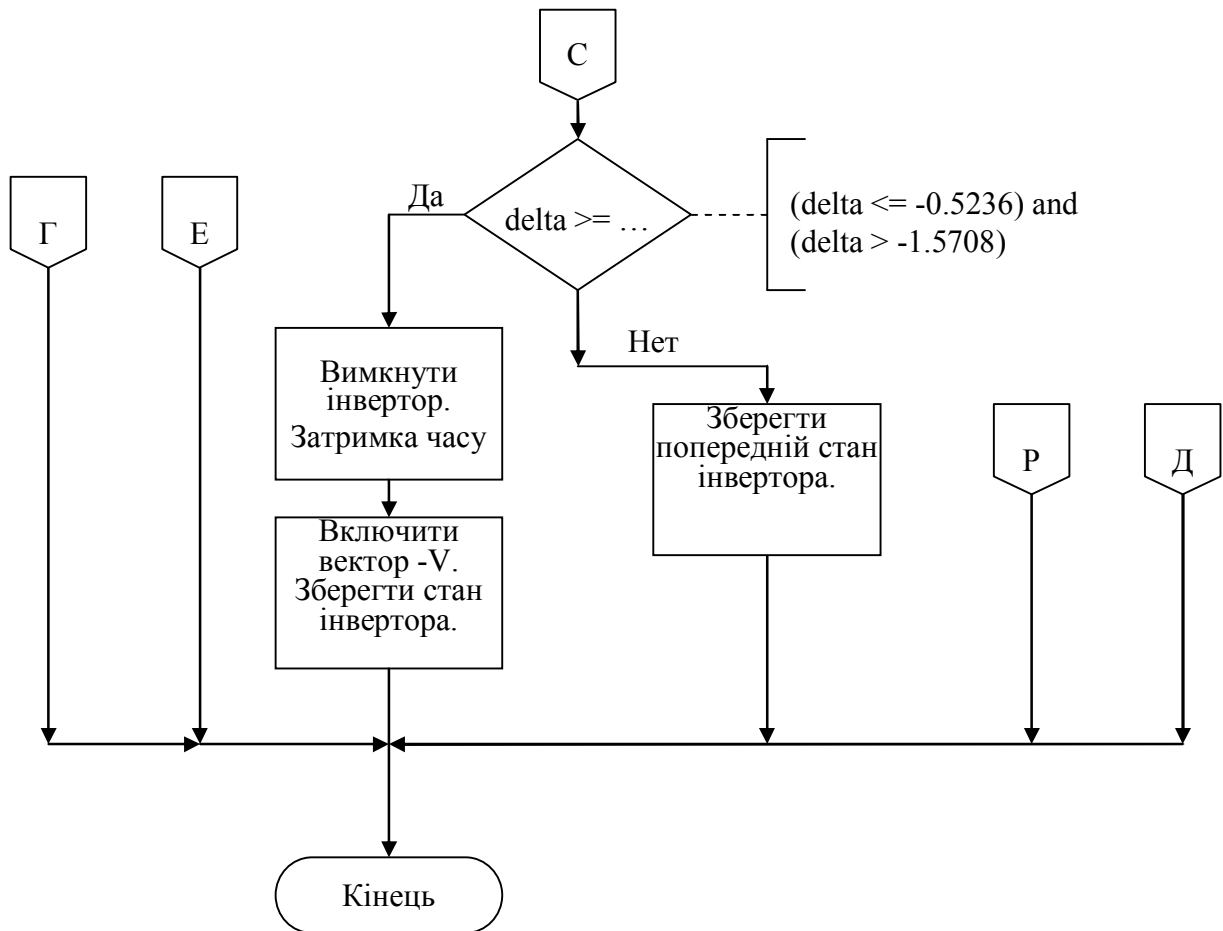
Продовження блок-схеми програми регулятора струму



Продовження блок-схеми програми регулятора струму



Закінчення блок-схеми програми регулятора струму



Текст програми функції REGULATOR():

```

void interrupt REGULATOR(...)
{ asm STI; //rabota regylatora
  if( Opros_Zashit())
  {
    if(priznak_zapyska)
    for (char ii=0;ii<chislo_kanalov;ii++)
    { output(0x30c,chanel+ii); //vibor kanalov -- zapysk
      outputb(0x303,0x34); // zadergka
      outputb(0x303,0x34); // zadergka
    }

    Preobr_ADC_Data(&l_b);
    Preobr_ADC_Data(&l_c);
    l_alfa=-(l_b+l_c);
    l_beta=(l_b-l_c)/1.732;
    dl_alfa=lz_alfa-l_alfa;
    dl_beta=lz_beta-l_beta;
    dl=sqrt(dl_alfa*dl_alfa+dl_beta*dl_beta);
    if (dl>dlz)
    {delta=atan2(dl_beta,dl_alfa);
      if (((delta >= -0.5236)&&(delta <= 0)) || ((delta > 0)&&(delta < 0.5236)))
      {

```

```

    Out_Data(DIO_OUT,ALL_IGBT_OFF);
    Dead_Time(4);
    Out_Data(DIO_OUT,Vector_U_P);    //q=[1 0 0 1 0 1]; key=0; %faza A
    LastState=Vector_U_P;
}
if ((delta >= 0.5236)&&(delta < 1.5708))
{
    Out_Data(DIO_OUT,ALL_IGBT_OFF);
    Dead_Time(4);
    Out_Data(DIO_OUT,Vector_W_N);    //q=[1 0 1 0 0 1]; key=1; %faza -C
    LastState=Vector_W_N;
}
if ((delta >= 1.5708)&&(delta < 2.6180))
{
    Out_Data(DIO_OUT,ALL_IGBT_OFF);
    Dead_Time(4);
    Out_Data(DIO_OUT,Vector_V_P);    //q=[0 1 1 0 0 1]; key=0; %faza B
    LastState=Vector_V_P;
}
if (((delta >= 2.6180)&&(delta <= pi)) || ((delta <= -2.6180)&&(delta > - pi)))
{
    Out_Data(DIO_OUT,ALL_IGBT_OFF);
    Dead_Time(4);
    Out_Data(DIO_OUT,Vector_U_N);    //q=[0 1 1 0 1 0]; key=1; %faza -A
    LastState=Vector_U_N;
}
if ((delta <= -1.5708)&&(delta > -2.6180))
{
    Out_Data(DIO_OUT,ALL_IGBT_OFF);
    Dead_Time(4);
    Out_Data(DIO_OUT,Vector_W_P);    //q=[0 1 0 1 1 0]; key=0; %faza C
    LastState=Vector_W_P;
}
if ((delta <= -0.5236)&&(delta > -1.5708))
{
    Out_Data(DIO_OUT,ALL_IGBT_OFF);
    Dead_Time(4);
    Out_Data(DIO_OUT,Vector_V_N);    //q=[1 0 0 1 1 0]; key=1; %faza -B
    LastState=Vector_V_N;
}
}
else
    Out_Data(DIO_OUT,LastState);
}
}
else
    Out_Data(DIO_OUT,ALL_IGBT_OFF);

    outport(0x20,0x20);
    asm STI; //oldhandler();
}

```

Як зазначалось раніше, програмне забезпечення реалізоване у вигляді окремих модулів (функцій). Використання такого підходу дозволило дещо спростити відладку загальної програми, а також швидко змінювати та доповнювати необхідні функції.

Всі вхідні та вихідні дані, необхідні для дослідження активного випрямляча (струми фаз, напруга фаз і ланки постійного струму, стани АВ і т.і.), зберігаються у файлах для подальшої обробки, наприклад, у системі MATLAB.

1.7 Експериментальні дослідження системи керування активним випрямлячем

У даному розділі наведені результати експериментальних досліджень системи керування струмом АВ, що працює в системах регульованого електропривода змінного струму. Розглядалася запропонована вище система керування з векторним релейним регулятором струму (ВРРС).

Мета експериментальних досліджень: перевірка адекватності розроблених математичних моделей та перевірка працездатності запропонованої системи керування напругою та струмом АВ.

Програма та порядок експериментальних досліджень

Всі дослідження проводяться на розробленому експериментальному стенді. Для співставлення запропоновані наступні режими випробувань і критерії оцінки:

1. Режим споживання енергії від мережі змінного струму.
2. Режим генерації енергії до мережі змінного струму.

Критерії оцінки: середньоквадратичне відхилення узагальненого вектора поточного струму від заданого dI , кількість комутацій силових ключів за період зміни струму $F_{ком}$, коефіцієнт гармонік K_2 та кут зсуву фаз між напругою та струмом мережі $\cos \varphi$.

Дослідження проводяться для наступних значень:

- періоду дискретизації системи керування $T = 10$ та 20 мкс,

- ємності ланки постійного струму C – 100, 200 та 400 мкФ,
- струму навантаження I_n – 2, 5 та 10 А,
- задана похибка регулювання струму – 1 А.

Всі результати вимірювань спочатку зберігалися на жорсткий диск ПК експериментального стенда у текстовому форматі, а потім оброблялися в пакеті MATLAB.

В експериментальному стенді у якості мережі використано трансформатор типу ТСУ – 4 потужністю 4 кВА і з лінійними напругами первинної обмотки 380 В, вторинної – 85 В. Приведені до вторинної обмотки параметри схеми заміщення трансформатора мають наступні значення: $R=0,063$ Ом, $L=0,00011$ Гн. У якості навантаження (рис. 1.1) використана система високомоментного двигуна з широтно-імпульсним перетворювачем ВМД-ШПІ. Використано ВМД типу ДПУ-240-1100-39. Параметри двигуна наведені в табл. 1.8 Некомпенсована стала часу ШПІ має теж саме значення що і некомпенсована стала часу АВ $T_\mu = 0,0005$ с. Це забезпечить максимальну швидкодію системи навантаження. ВМД працює у режимі стабілізації моменту на малих обертах, що дозволяє виключити вплив ЕРС навантаження при різких змінах струму навантаження I_n (струму ВМД).

Таблиця 1.8

Тип двигуна	ДПУ-240-1100-39
Номінальна напруга, В	120
Номінальний струм, А	12
Струм неробочого ходу, А	2,3
Момент номінальний, Нм	3,5
Момент максимальний, Нм	17,5
Номінальні оберти, об/хв	3000
Активний опір якоря, Ом	0,53
Індуктивність якоря, Гн	0,00053
ККД	0,75
Момент інерції, кг м ²	0,00194

У якірному колі двигуна використано додатковий дросель з індуктивністю 0,0005 Гн.

Режим споживання енергії від мережі змінного струму

Результати досліджень системи керування АВ в режимі споживання струму мережі наведені в табл. 1.9. Деякі графіки наведені на рис. 1.19 - 1.22. Аналізуючи дані із таблиці та рисунки, можна прийти до наступних висновків:

- збільшення періоду дискретизації призводить до зростання коефіцієнту гармонік та похибки регулювання струму майже у 1,5 рази, зменшенню частоти комутації (при цьому коефіцієнт зсуву фаз змінюється незначно);

- зі зменшенням струму навантаження коефіцієнт зсуву фаз зменшується, особливо при збільшенні періоду дискретизації, але в цілому він перевищує значення 0,95 і лише інколи стає меншим;

- як і очікувалося, з збільшенням індуктивності мережевого дроселя зменшилась частота комутації ключів і похибка регулювання;

- величина ємності ланки постійного струму фактично не впливає на величину похибки регулювання струму.

- Похибка регулювання струму має залежність від величини струму навантаження та періоду дискретизації. Може статися так, що при малій заданій похибці регулювання струму вона буде недосяжна. Це можна пояснити так. На періоді дискретизації після видачі керуючого сигналу цифрова система не виконує ні яких дій і струм у цей час неконтрольований. Тому похибка теж неконтрольована і на початку наступного інтервалу дискретизації значно може перевищувати задану. Тому в залежності від величини періоду дискретизації існує якась мінімальна похибка, яка може бути відпрацьована.

Для підвищення якісних показників досліджуваної системи можливо піти двома шляхами: збільшити величини пасивних елементів (дроселі) або зменшити період дискретизації. Найефективнішою буде остання пропозиція. Зменшення періоду дискретизації системи керування призведе до підвищення її швидкодії, але при цьому збільшиться частота комутації ключів АВ. Для сучасних силових елементів така частота складає приблизно 10 кГц без зменшення навантаження.

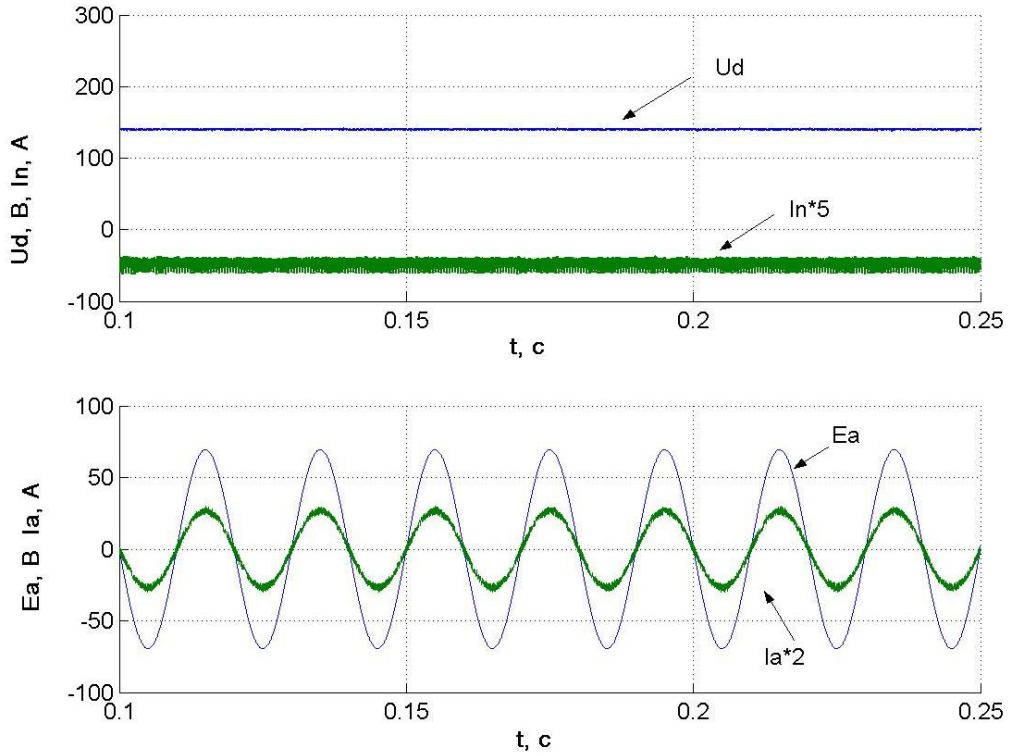


Рисунок 1.19 - Споживання струму з мережі
 ($C = 400$ мкФ, $L_d = 0,001$ Гн, $T = 10$ мкс, $I_n = 10$ А)

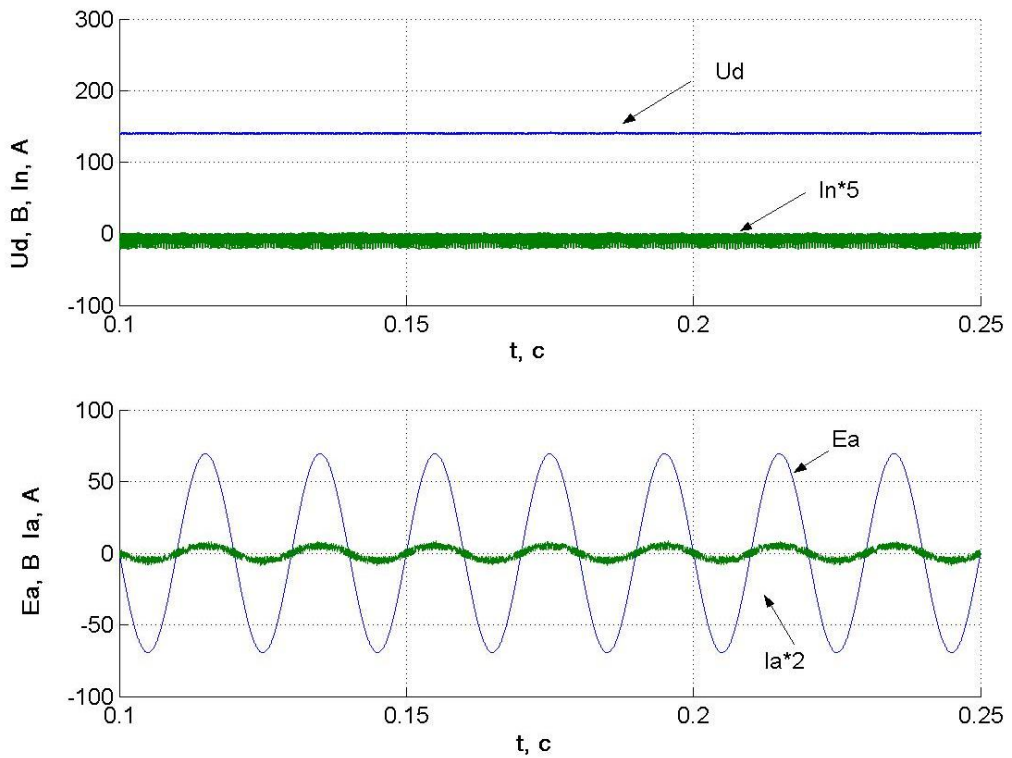


Рисунок 1.20 - Споживання струму з мережі
 ($C = 400$ мкФ, $L_d = 0,001$ Гн, $T = 10$ мкс, $I_n = 2$ А)

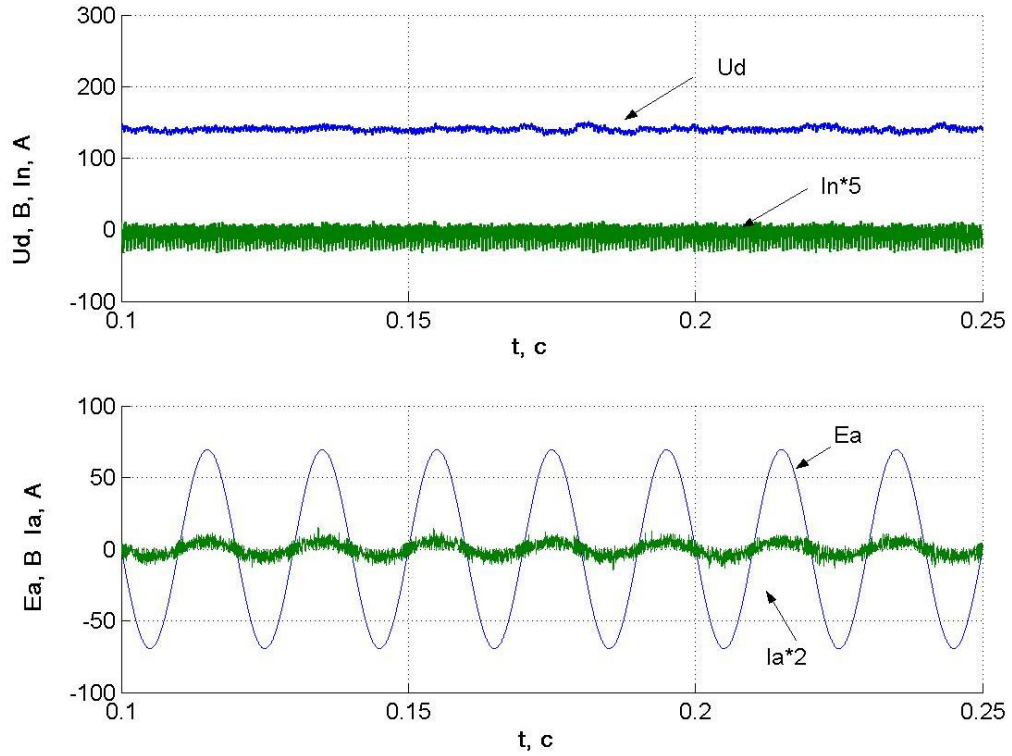


Рисунок 1.21 - Споживання струму з мережі
 ($C = 100$ мкФ, $L_d = 0,0005$ Гн, $T = 20$ мкс, $I_n = 2$ А)

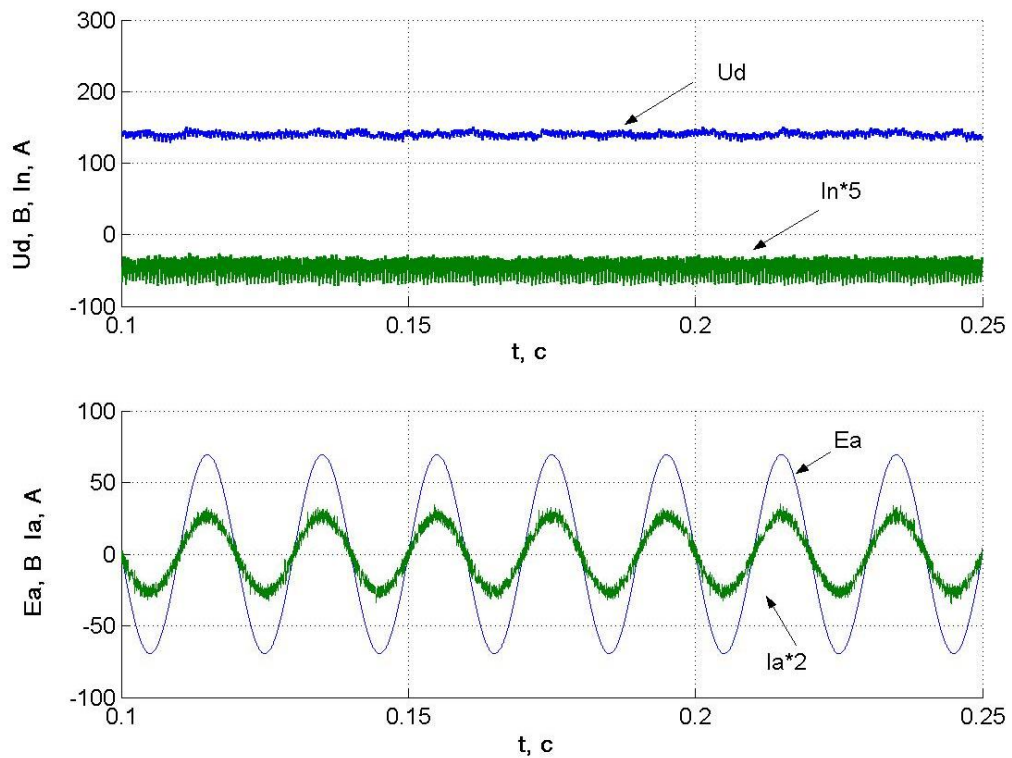


Рисунок 1.22 - Споживання струму з мережі
 ($C = 100$ мкФ, $L_d = 0,0005$ Гн, $T = 20$ мкс, $I_n = 10$ А)

Режим генерації енергії до мережі змінного струму

Результати досліджень системи керування АВ в режимі генерації струму мережі наведені в табл. 1.10. Деякі графіки наведені на рис. 1.23 - 1.26. Аналіз зроблений у попередньому розділі цілком відповідає і даному режиму роботи АВ.

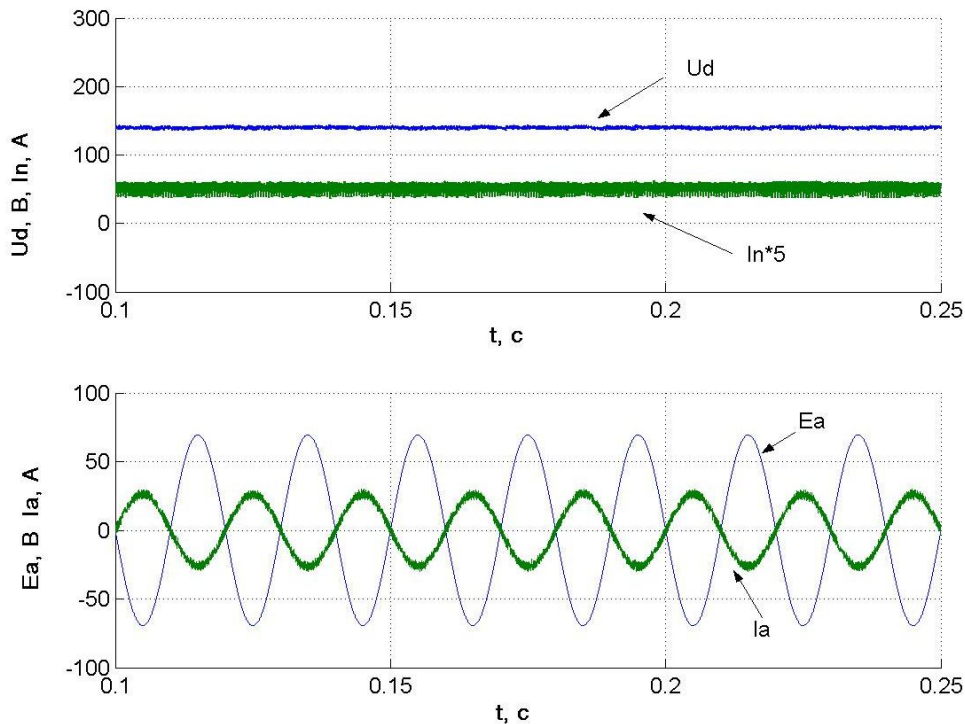


Рисунок 1.23 - Генерація струму до мережі
($C = 100$ мкФ, $L_d = 0,0005$ Гн, $T = 10$ мкс, $I_H = 10$ А)

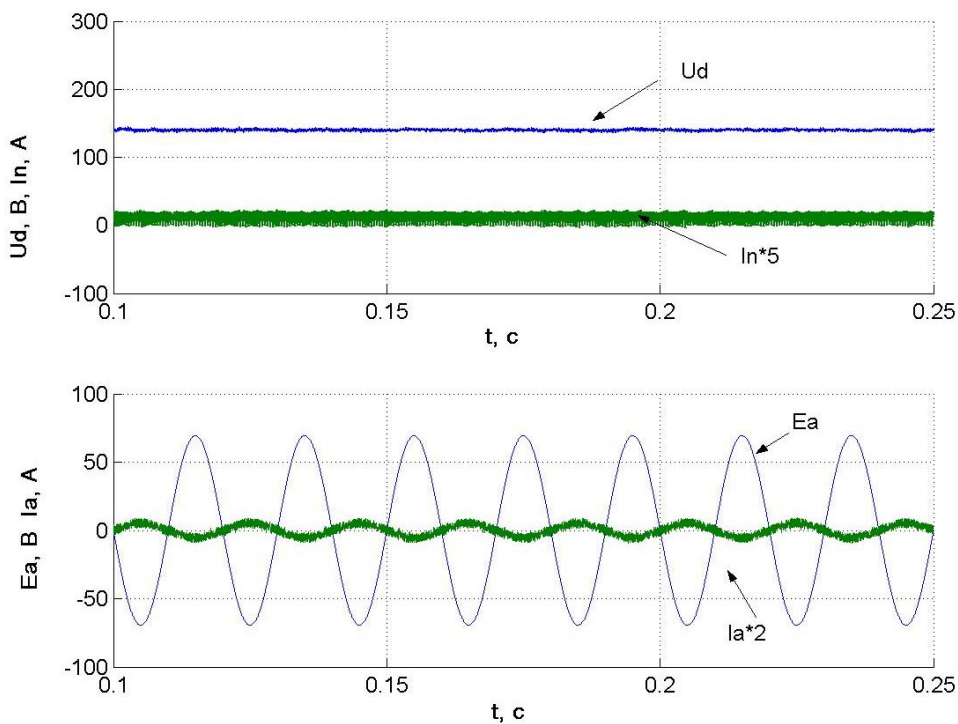


Рисунок 1.24 - Генерація струму до мережі
($C = 100$ мкФ, $L_d = 0,0005$ Гн, $T = 10$ мкс, $I_H = 2$ А)

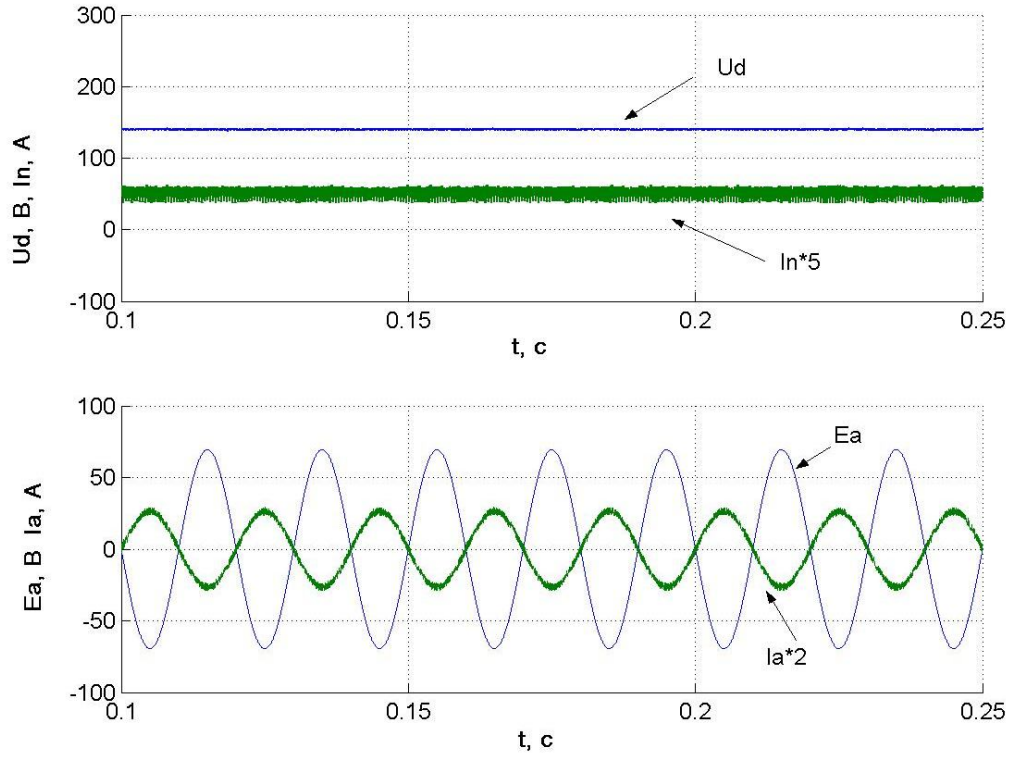


Рисунок 1.25 - Генерація струму в мережу
 ($C = 400$ мкФ, $L_d = 0,001$ Гн, $T = 10$ мкс, $I_n = 10$ А)

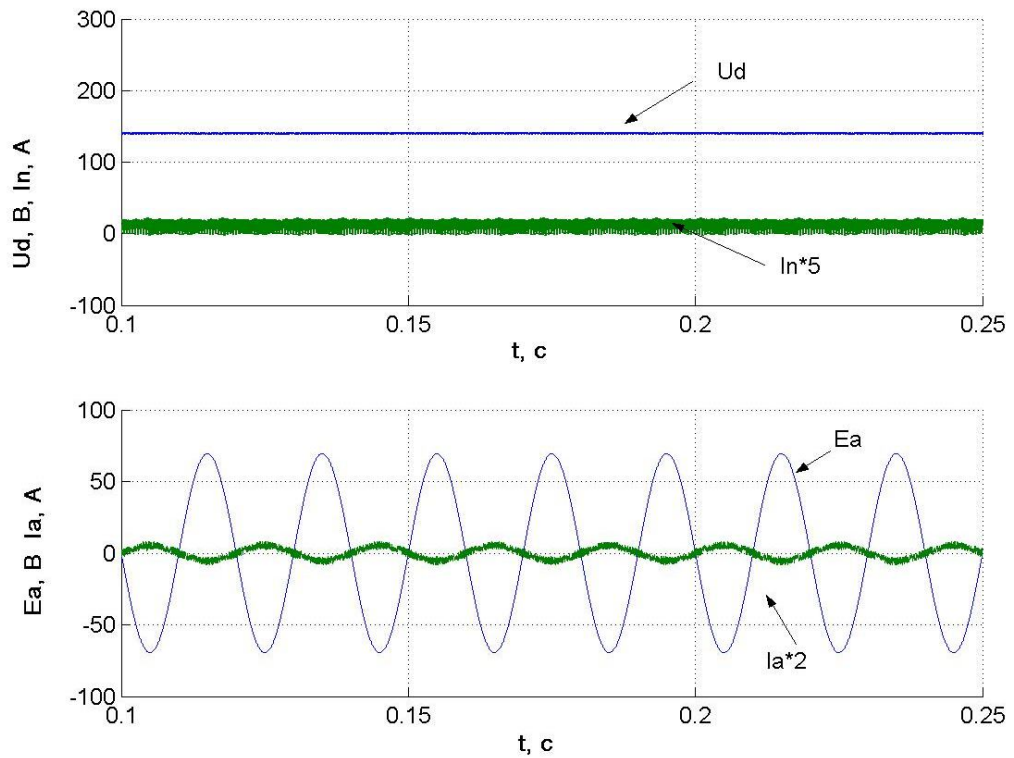


Рисунок 1.26 - Генерація струму в мережу
 ($C = 400$ мкФ, $L_d = 0,001$ Гн, $T = 10$ мкс, $I_n = 2$ А)

Режим стрибкоподібної зміни струму навантаження

Результати досліджень системи керування у зазначеному режимі наведені у табл. 1.11. Деякі результати представлені на рис. 1.27 – 1.30. У таблиці наведені результати вимірів перенапруг U_{θ} (або просядок напруги) відносно заданої стабілізованої напруги яка складає 140 В, а також час становлення напруги на заданому рівні t_{θ} . Струм навантаження прийнято максимальним. Дослідження проведено для різних напрямків протікання та зміни струму:

- напрямок зміни струму $+I_H -I_H$ – перехід від генерації струму навантаження до споживання струму (напрямок 1),
- напрямок зміни струму $-I_H +I_H$ – перехід від споживання струму навантаження до генерації струму (напрямок 2).

Таблиця 1.11 - Динамічні режими								
Дросель мережі	$I_H = 10 \text{ А}$ $I_C = 13,4 \text{ А}$ $dI_z = 1 \text{ А}$	C, мкФ	T = 10 мкс			T = 20 мкс		
			100	200	400	100	200	400
$L_d = 0,001 \text{ Гн}$	Напрямок зміни струму $-I_H +I_H$	U_{θ} , В	380	260	200	375	263	200
		t_{θ} , с	0,03	0,025	0,02	0,025	0,025	0,02
	Напрямок зміни струму $+I_H -I_H$	U_{θ} , В	15	60	90	5	55	60
		t_{θ} , с	0,13	0,042	0,022	0,12	0,05	0,03
$L_d = 0,0005 \text{ Гн}$	Напрямок зміни струму $-I_H +I_H$	U_{θ} , В	380	265	200	370	265	205
		t_{θ} , с	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,018
	Напрямок зміни струму $+I_H -I_H$	U_{θ} , В	40	75	95	16	80	94
		t_{θ} , с	0,1	0,045	0,025	0,1	0,04	0,025

Як можна побачити з таблиці та приведених графіків, при протіканні струму у напрямку 1 процес розряду-заряду носить коливальний характер на відміну від напрямку 2. Це можна пояснити тим, що при споживанні енергії з ланки постійно-

го струму з досить великим темпом напруга дуже швидко зменшується. При цьому система керування АВ втрачає керуваність за рахунок неможливості роботи транзисторів – струм проводять зворотні діоди, АВ працює як некерований випрямляч. При досягненні відповідного рівня напруги ланки постійного струму система керування АВ вмикається. Коливальність тим більша, чим менша величина ємності. З таблиці також видно. Що на рівень коливань напруги та час встановлення дещо впливає період дискретизації T .

При протіканні струму у напрямку 2 процеси в колі постійного струму більш статичні і відрізняються лише рівнем перенапруг, рівні яких залежать від ємності конденсатора та швидкодії контуру регулювання напруги. Система керування завжди залишається у робочому стані і відповідно реагує на збурення. При цьому період дискретизації майже не впливає на рівень перенапруг і незначно впливає на час встановлення напруги на заданому рівні.

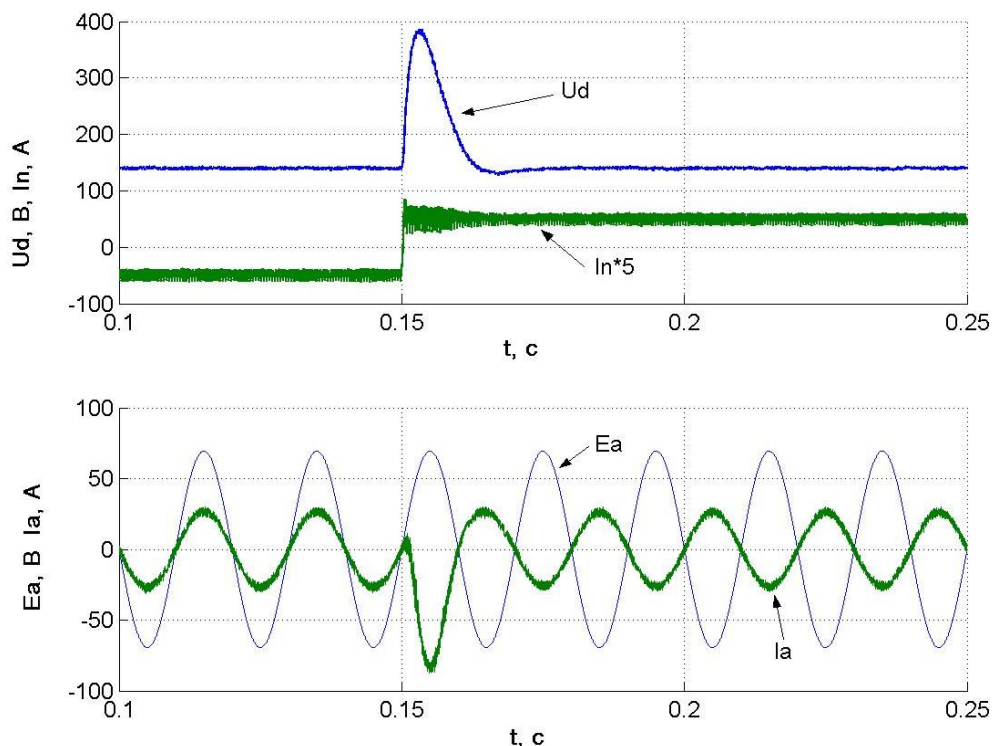


Рисунок 1.27 - Зміна струму навантаження (напрямок 2, $C = 100$ мкФ, $L_d = 0,0005$ Гн, $T = 10$ мкс)

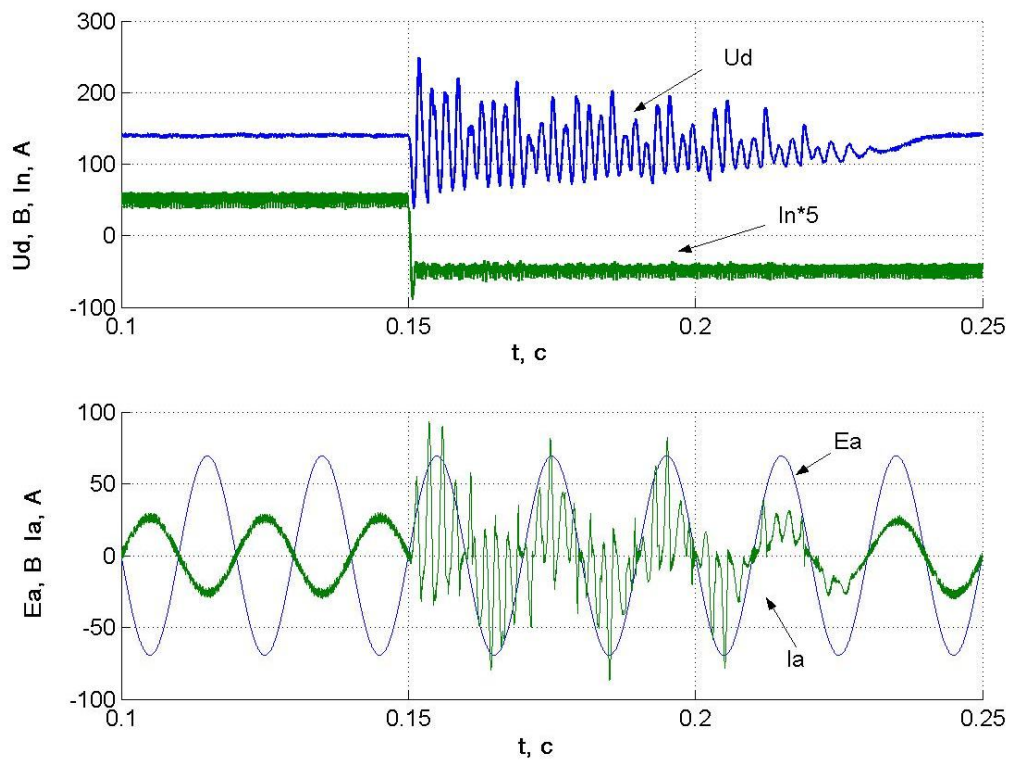


Рисунок 1.28 - Зміна струму навантаження
(напрямок 1, $C = 100$ мкФ, $L_d = 0,0005$ Гн, $T = 10$ мкс)

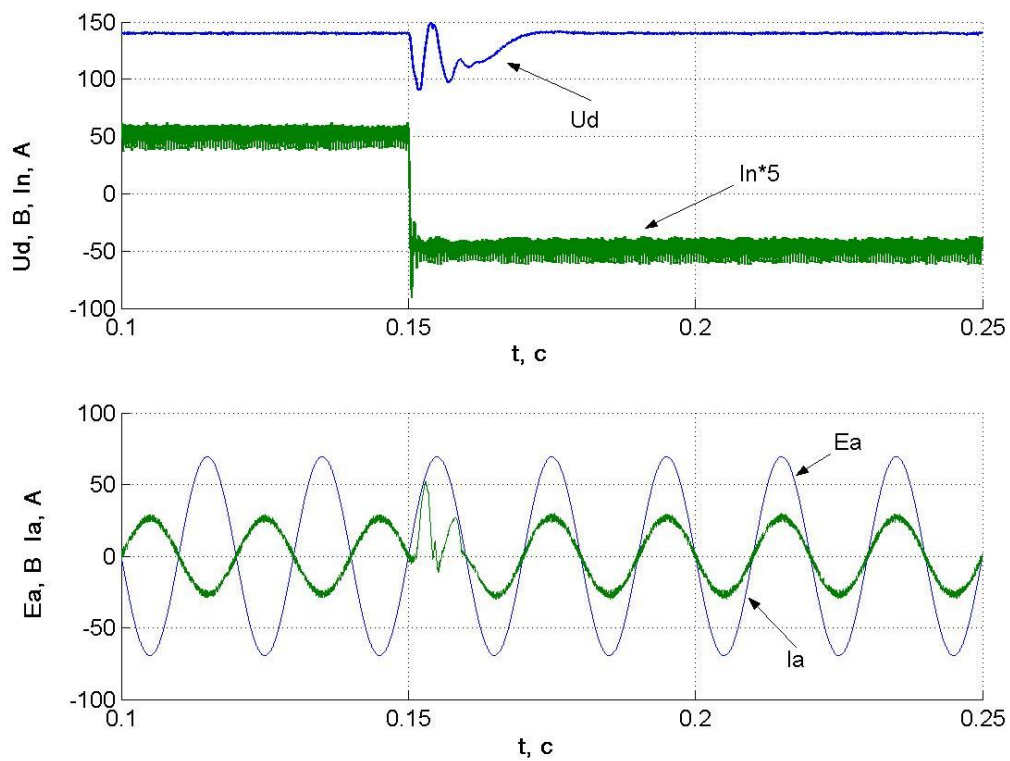


Рисунок 1.29 - Зміна струму навантаження
(напрямок 2, $C = 400$ мкФ, $L_d = 0,001$ Гн, $T = 10$ мкс)

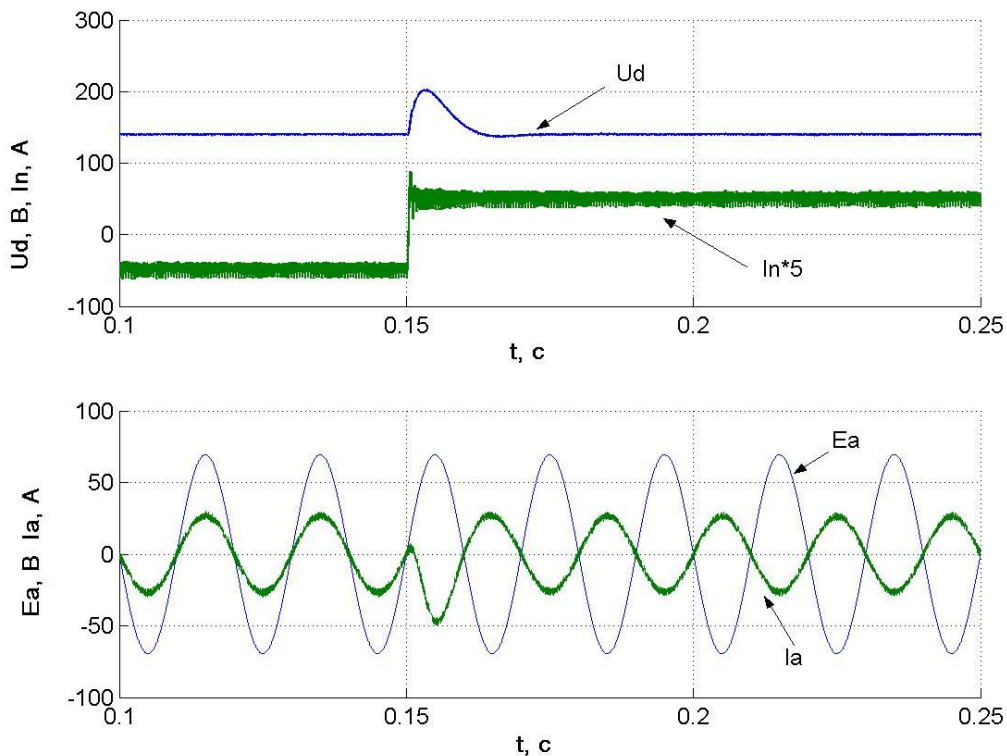


Рисунок 1.30 - Зміна струму навантаження
(напрямок 1, $C = 400$ мкФ, $L_d = 0,001$ Гн, $T = 10$ мкс)

1.8 Висновки

1. Запропоновано систему регулювання активним випрямлячем з релейно-векторним контуром струму.
2. Запропоновано релейно-векторний регулятор струму, що забезпечує зменшення числа комутацій ключів АВ, підвищує точність регулювання струму і забезпечує зменшення впливу періоду дискретизації цифрової системи на точність регулювання струму.
3. При зниженні живлячої напруги мережі на 10% і більш рівень обмеження регулятора напруги (рівень струмообмеження) повинен бути збільшений на 11-12% і більше в порівнянні з рівнем струмообмеження інвертора двигуна.
4. Збільшення рівня струмообмеження призведе до підвищення номіналів силових модулів, використовуваних в АВ, відносно модулів використовуваних в інверторі двигуна.

5. Одержані результати показують, що для нормального функціонування системи активний випрямляч – частотно-керований електропривод при різних рівнях коливання мережевої напруги, потужність АВ повинна бути більше потужності інвертора двигуна.

6. Збільшення індуктивності мережевих дроселів призводить до поліпшення форми струму у всіх розглянутих режимах роботи АВ, але при цьому збільшується рівень зниження напруги в ланці постійного струму при короткочасному зменшенні мережевої напруги.

7. Запропоновано структуру експериментального стенду для дослідження алгоритмів керування активним випрямлячем з ШІМ та обрано його елементну базу.

8. На базі персональної ЕОМ розроблений експериментальний стенд для дослідження алгоритмів керування активним випрямлячем з ШІМ.

9. Розроблено програмне забезпечення експериментального стенду у вигляді набору функцій, призначених для: настроювання і обслуговування апаратної частини експериментального стенду, реалізації алгоритмів керування, підпрограми елементів системи керування.

10. Проведено експериментальні дослідження системи керування активним випрямлячем.

11. Отримані експериментальні дані підтверджують здобуті раніше результати моделювання.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ДУГОГАСІННЯ РУХОМОГО СТРУМОЗНІМАЛЬНОГО КОНТАКТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТРУМОЗНІМАЛЬНИХ ЗАСОБІВ

2.1 Аналіз систем дугогасіння та вибір методів попередження дугоутворення рухомого струмознімального контакту

На цей час із відомих методів обмеження іскріння при струмозніманні основними є:

- 1) методи, спрямовані на підвищення надійності контакту між струмоприймачем і контактним дротом,
- 2) методи, спрямовані на запобігання поєднання електричної дуги і утворених в процесі струмознімання розжарених часток з вибухонебезпечною рудниковою атмосферою,
- 3) методи, засновані на відключенні електроспоживачів електровоза при відході струмоприймача від контактного дроту.

Серед методів, віднесених до першої групи, пропонувалася підвіска контактного дроту за допомогою шарнірно укріплених затискачів, застосування пружинних підвісок різного типу, обладнання для швидкої зміни висоти підвіски контактного дроту при осіданні покрівлі й спучуванні ґрунту виробітки [17]. Іншим напрямком підвищення надійності струмознімального контакту є вдосконалювання конструкції струмоприймача. Із цією метою робилися спроби застосування магнітів для забезпечення надійного притиснення струмознімальних елементів струмоприймача до контактного дроту, збільшення площі струмознімального контакту при скривленнях контактного дроту, паралельного включення додаткового струмознімального елемента й ін. З розробок останнього часу становить інтерес гнучкий здвоєний струмоприймач із підйомним механізмом [18], робота якого характеризується відносно малим іскрінням завдяки малій наведеній масі струмознімальних елементів, їх незначному взаємовпливу й високої стабільності притисного зусилля в широкому діапазоні зміни висоти підвіски контактного дроту

[19]. Однак всі ці пристрої недостатньо ефективні, тому що не дозволяють запобігти дугоутворенню й виключити викид вибухонебезпечних часток контактуючих матеріалів у місця можливого скупчення метану. Слід зазначити, що вдосконалення контактних мереж і струмоприймача з метою обмеження іскріння при струмозніманні залишається важливим завданням, тому що ефективність інших методів обмеження іскріння значною мірою залежить від надійності контакту між струмоприймачем і контактним дротом. Як показують результати досліджень причин іскріння струмоприймачів, значне зниження іскріння при їхньому конструктивному удосконалюванні можливо у наступних напрямках [20]: застосування декількох паралельно з'єднаних струмознімальних елементів; стабілізація зусилля притиснення кожного струмознімального елемента до контактної дроту у всьому робочому діапазоні зміни висоти підвіски дроту; виключення можливості зіткнення струмоприймача з розтяжками дроту, комунікаційними спорудженнями й кріпленням виробітки; зниження маси струмоприймача, приведеної до точки струмознімання, з метою забезпечення слідкування струмознімального елемента за профілем контактної мережі; вибір матеріалу контактної вставки, за якого іскріння мінімальне; збільшення площі струмознімального контакту, забезпечення рівномірного зношування струмознімальної дуги (для дугових струмоприймачів).

Однією з головних задач удосконалення контактних мереж є виключення різного роду нерівностей, особливо в місцях секціонування, стикових з'єднань і розгалужень. При забезпеченні достатньо рівної поверхні контактної дроту з'являється можливість експлуатації роликівих і башмачних струмоприймачів, робота яких характеризується значно меншим іскрінням у порівнянні із застосовуваними дуговими.

У числі засобів, що виключають або знижують небезпеку поєднання електричної дуги з вибухонебезпечною рудниковою атмосферою пропонувалися різні пристрої для подачі стисненого повітря й водяної пари до місця струмознімання [21], а також конструкція контактної мережі з розташуванням контактної дроту усередині оболонки, у якій створюється надлишковий тиск повітря або інертного газу [17]. Остання конструкція була застосована у сучасних закордонних і вітчиз-

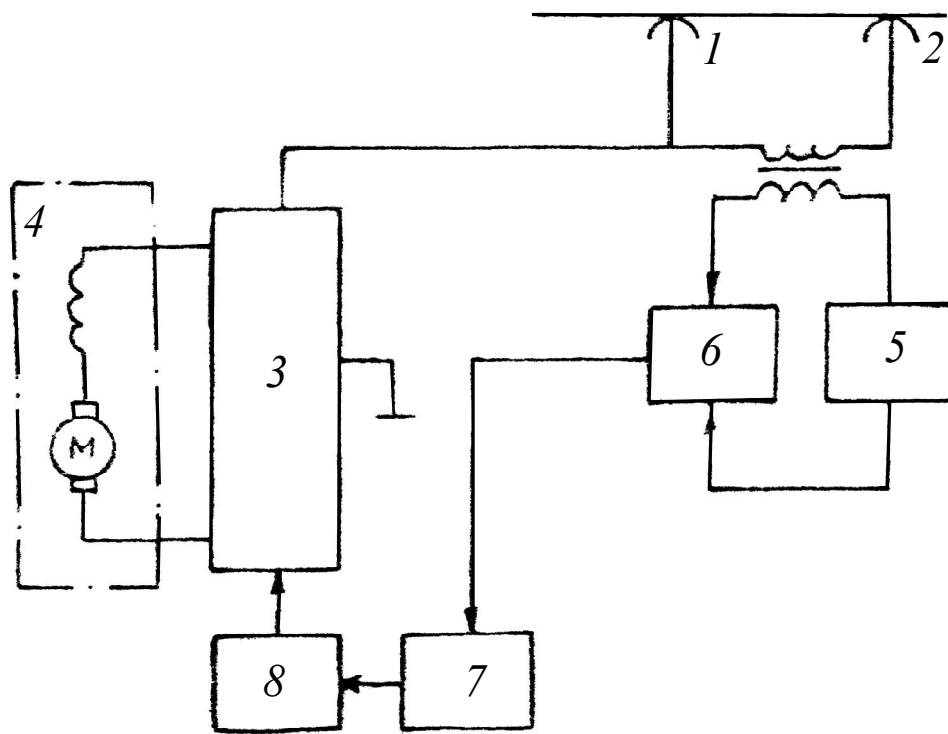
няних розробках [2-25]. У таких пристроях струмознімальний елемент струмоприймача введений у оболонку, де знаходиться контактний дріт через ущільнення, яке перешкоджає викиду розжарених часток контактуючих матеріалів, контакту дуги з рудниковою атмосферою, а також витоку газу з оболонки.

На сучасному етапі розвитку техніки ці засоби вимагають значних капітальних та експлуатаційних витрат й їх застосування було обмежене.

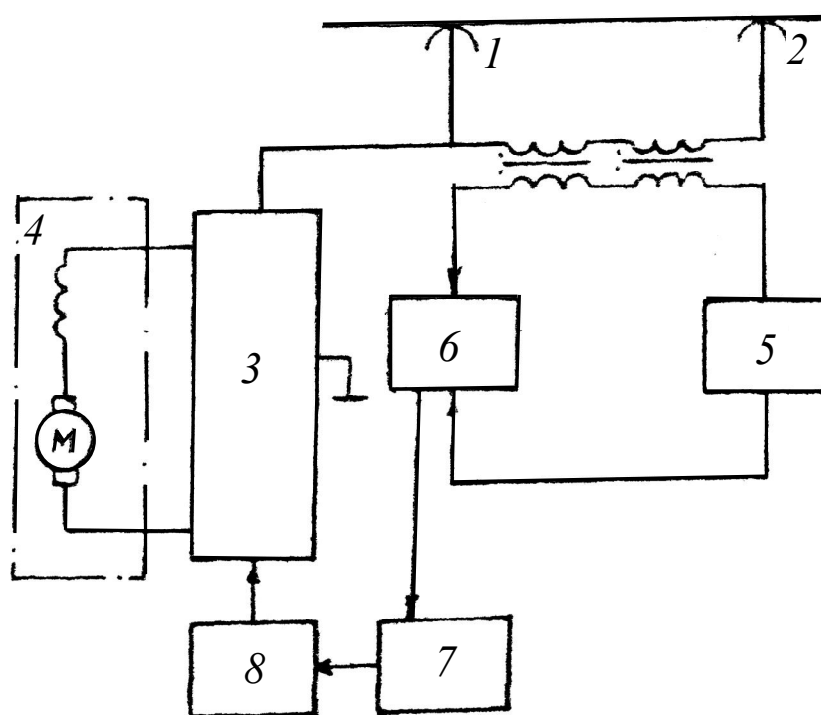
Більш перспективними є пристрої, принцип дії яких заснований на відключенні електроспоживачів електровоза при порушенні струмознімальних контактів (контакту) струмоприймача.

В системах дугогасіння струмознімальних контактів, частотним методом [17, 26, 27] контрольний перемінний сигнал відповідної частоти вводиться за допомогою трансформатора або дроселя в контур, утворений паралельними гілками струмознімача, двома струмознімальними елементами і відрізком контактного дроту між даними елементами. Розглянемо роботу цих пристроїв (рис. 2.1) на прикладі пристрою, який наведений на рис. 2.1, а. Коли струмознімальні елементи струмознімача 1 і 2 прилягають до контактного дроту, трансформатор працює в режимі короткого замикання, оскільки його вторинна обмотка замкнена через відрізок контактного дроту, укладений між струмознімальними елементами. Джерело 5 змінної напруги утворює у первинній обмотці трансформатора та в вимірювальному вузлі 6 певне значення струму. Тяговий струм тече через струмознімальні елементи струмознімача 1 і 2, силовий блок 3 і навантаження 4. При порушенні контакту одного з струмознімальних елементів з контактним дротом тяговий струм тече через інший струмознімальний елемент. Вторинна обмотка трансформатора при цьому розмикається, і трансформатор переходить в режим неробочого ходу. Струм у первинній обмотці трансформатора різко зменшується, що фіксується вимірювальним вузлом 6. Смуговий фільтр 7, налаштований на частоту джерела 5, слугує для обмеження дії змінних складових, наявних в тяговому струмі, які потрапляють до вимірювального вузла 6 через трансформатор. Сигнал з виходу смугового фільтру 7 слугує надходить до блоку управління 8, який діє

на силовий блок 3 регулювання напруги. Він здійснює відключення живлення споживача 4.



a)



б)

Рисунок 2.1 - Пристрій для обмеження дугоутворення при струмозніманні

Якщо наступне порушення другого струмознімального елемента відбудеться після повного відключення навантаження, то дугоутворення не відбудеться. Ввімкнення навантаження здійснюється після відновлення обох струмознімальних елементів струмознімача на контактному дроті.

Перевага цих пристроїв полягає в тому, що процес відключення споживачів електровоза може здійснюватися до виникнення дугоутворення, обумовленого розривом кола тягового струму, а робота системи дугогасіння майже не залежить від зміни напруги живлячої мережі.

До недоліків цих пристроїв відноситься підвищена індуктивність гілок струмоприймача, яка призводить до підвищеної енергії розряду при порушенні струмознімальних контактів, до яких підключені ці гілки, а також затримка при формуванні сигналу вимкнення. Крім цього пристрої також не попереджують небезпеку замикання секцій тягової мережі струмознімачем з паралельними струмознімальними елементами у місцях розташування ізолюючих вставок і пов'язане з цим іскріння в зазначених місцях.

На рис. 2.2 приведена схема більш досконалого пристрою обмеження дугоутворення струмознімачів з будь-якою кількістю струмознімальних елементів, в тому числі з одноконтактним струмознімачем [28]. Пристрій містить керований вимикач 1 кола тягового споживача 2, блок 3 контролю струмознімальних контактів, що складається з блоків 4-7 витоку струму, порогових блоків 8-13, сумуючих вузлів 14 і 15 і елемента 16 логічного множення (елемента I) на виході, формувача 17 вмикаючих сигналів, вентиляних блоків 18-21, датчиків 22-25 постійного струму, формувача 26 вмикаючих сигналів, який складається з блоків ділення 27-30, сумуючого вузла 31, порогових блоків 32-35, елемента 36 логічної суми (елемента $АБО$) і формувача 37 імпульсів на його виході, блоку 38 блокування формувача 17 вмикаючих сигналів, диференційного блоку 39, який складається з диференціатора 40 і порогового блоку 41, елемента 42 логічного заперечення (елемент HI).

В вихідному стані всі контактні елементи струмознімачів прилягають до контактних дротів, вимикач 1 вимкнений. При цьому через вхідні кола блоків 4...7 течуть практично однакові струми витоку, з-за чого на виходах цих блоків

виникають сигнали, що викликають до формування на виходах усіх порогових блоків 8...11 однакових сигналів, які свідчать, що наявність електричного контакту між усіма струмознімачами і контактними дротами. Порогові блоки 8...11 формують вихідні сигнали за величиною і усувають тим самим їх залежність від напруги в контактній мережі, яка в шахтних умовах може змінюватися в досить широкіх границях, а також від розкиду параметрів блоків 4...7 витоку. Вихідні сигнали порогових блоків 8...11 в подальшому сумуються у відповідних сумуючих вузлах 14 і 15, завдяки чому вихідні сигнали блоків 14 і 15 є пропорційні кількості струмознімачів, що прилягають до відповідного контактного дроту, причому ці вихідні сигнали мають максимальне значення U_{\max} , коли усі струмознімачі прилягають до контактного дроту. Вихідні сигнали блоків 14 і 15 поступають далі на виходи відповідних порогових блоків 12...13, які формують на своїх виходах сигнали лише в тому випадку, коли вхідний сигнал перевищує деяке порогове значення U_{II} . Порогове значення U_{II} вибирається завчасно, у залежності від кількості n встановлених струмознімачів в розрахунку на один контактний дріт і мінімальної кількості струмознімачів m' , що прилягають до контактного дроту, та за якої споживання тягового струму від контактної мережі є припустиме, а також виходячи з вимог до надійності пристрою. В загальному випадку порогове значення U_{II} вибирається, виходячи з умови

$$U_{\max} \cdot \frac{m' - 1}{n} < U_{II} < U_{\max} \cdot \frac{m'}{n}. \quad (2.1)$$

При цьому, чим більш високі вимоги до надійності пристрою, тим більші вибираються значення n і m' .

Зокрема, у випадку двох, паралельно з'єднаних струмознімачів ($n = 2$) та при $m' = n$ (споживання тягового струму дозволяється, якщо до контактних дротів

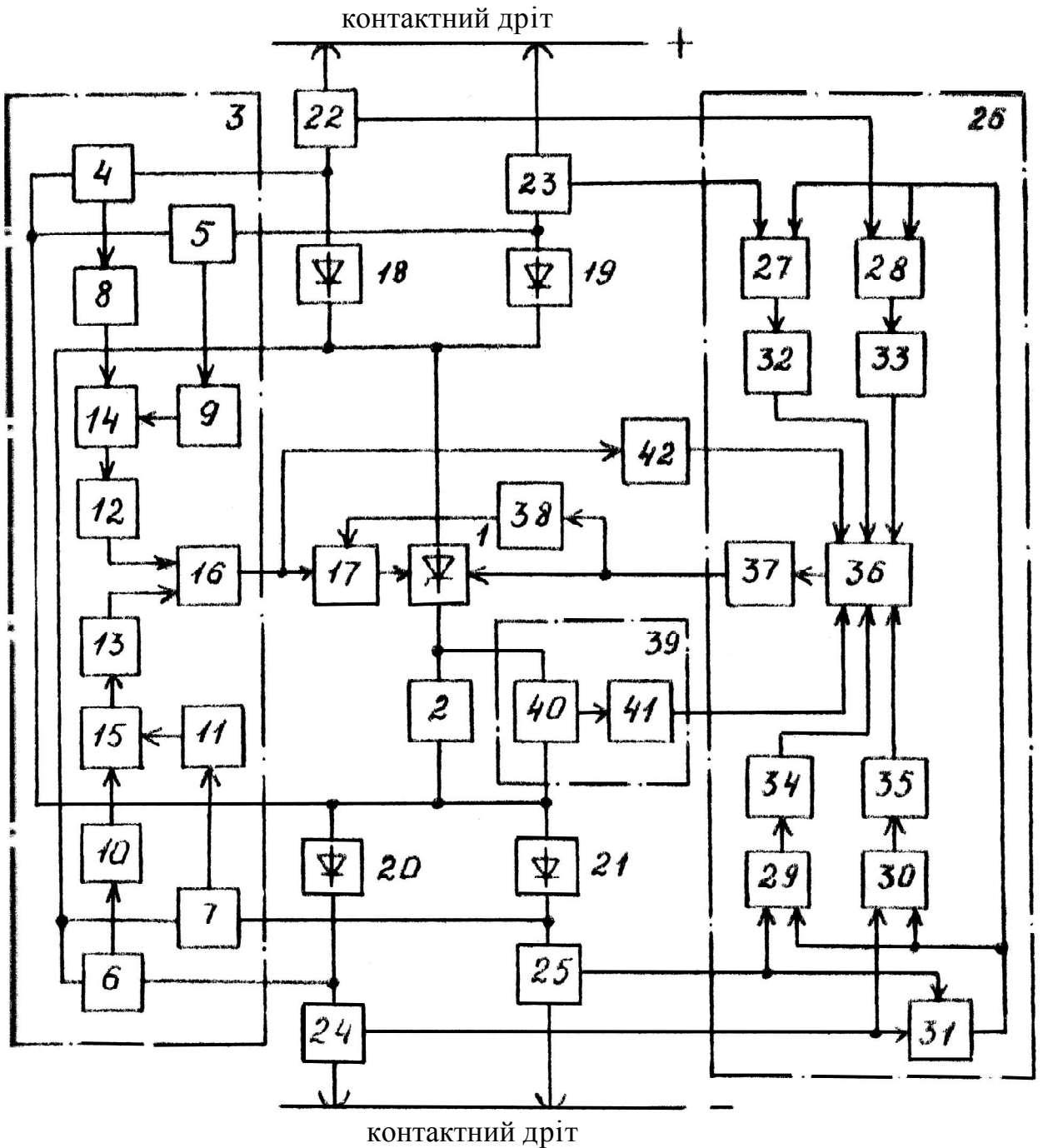


Рисунок 2.2 - Блок-схема пристрою обмеження іскріння

прилягають усі струмознімачі) порогове значення сигналу U_{II} вибирається, виходячі з умови $U_{\max} \cdot 0.5 < U_{II} < U_{\max}$. У разі, коли усі контактні елементи струмознімачів прилягають до контактних дротів, вхідні сигнали блоків 12 і 13 перевищують порогове значення I_{II} , і тому на виходах цих блоків формуються сигнали, які приводять до формування вихідного сигналу блока 3 за допомогою елемента

16 логічного множення (елемента I). Вихідний сигнал блоку 3 надходить до одного з входів формувача 17 вмикаючих сигналів і одночасно з цим на вхід логічного елемента 42 (елемента HI), завдяки чому сигнал на виході елемента 42 відсутній.

Вихідні сигнали датчиків 22...25, що виникають в результаті наявності практично однакових струмів витoku в струмознімальних гілках надходять до входів формувача 26 сигналів вимикання. За допомогою блоків ділення 27...30 визначаються відносні значення струмів в струмознімальних гілках шляхом ділення вихідного сигналу кожного датчику струму на вихідний сигнал сумуючого вузла 31, який відповідає споживаному стуму. Вихідні сигнали блоків ділення 27...30 поступають на входи порогових блоків 32...35. Кожен з порогових блоків 32...35 формує на своєму виході сигнал, який свідчить о погіршені струмознімальних контактів лише в тому випадку, коли його вхідний сигнал перевищує порогове значення I_{II} , яке вибирається завчасно також в залежності від кількості струмознімачів n і m' . У загальному випадку порогове значення I_{II} вибирається, виходячи з умови

$$\frac{I_{\max}}{n} \cdot (n - m' + 1) < I_{II} < \frac{I_{\max}}{n - 1} \cdot (n - m' + 1), \quad (2.2)$$

відповідаючого умові вибору порогового значення I_{II} , де I_{\max} - максимальне значення сигналу на виході одного з блоків ділення 27...30, що виникає у випадку наявності струму лише в одній з паралельних струмознімальних гілок. При цьому, чим більш високі вимоги до надійності до пристрою, тим менше порогове значення I_{II} вибирається. У випадку, коли усі контактні елементи струмознімачів прижаті до контактних дротів, і струми в паралельних струмознімальних гілках розподілені практично рівномірно, відносні значення струмів в струмознімальних гілках менше порогового значення, тому сигнали на виході порогових блоків 32...35 і відповідних входах логічного елемента 36 (елемента $АВО$) не виникають. На виході диференційного блоку 39 сигнал також відсутній, так як цей блок формує сигнал лише при дуже великій швидкості зменшення напруги на тяговому на-

вантажені, яка перевищує порогове значення (при стрибкоподібному зменшенні напруги). Таким чином, у розглянутому випадку сигнали на усіх входах логічного елемента 36 відсутні, тому вимикаючий сигнал на виході формувача 26 не виникає, а робота формувача 17 вмикаючих сигналів формувачем 26 не блокується. В результаті сигнал на виході блоку 3 контролю призводить до формування вмикаючого сигналу формувачем 17, після чого комутатор 1 вмикається, і струм тягового навантаження 2, розподіляючись приблизно рівномірно між струмознімальними гілками, тече через датчики 22...25 постійного струму і вентиляльні блоки 18...21.

При значному погіршенні в загальному випадку $(n - m' + 1)$ з n струмознімальних контактів, що передусє, як правило, повному порушенню цих контактів і наступному порушенню решти струмознімальних контактів, розподіл струму у струмознімальних гілках змінюється. Відносне значення струмів у гілках з нормальними струмознімальними контактами суттєво збільшуються і становляться більше обраного порогового значення. В результаті цього з'являється сигнал на виході елемента 36, який викликає формування за допомогою формувача 37 вимикаючого сигналу і наступне попереджувальне вимкнення комутатора 1 тягового споживача 2. Одночасно з цим вимикаючий сигнал на виході формувача 26 блокує через блок 38 роботу формувача 17 вмикаючих сигналів на деякий завчасно вибраний час, що перевищує час повного вимкнення тягового навантаження. При високій швидкодії комутатора 1 процес його вимкнення може супроводжуватися високою швидкістю зменшення напруги на навантаженні. В результаті цього на виході боку 39 виникає сигнал, який свідчить про розрив нерозгалуженої частини кола тягового струму і необхідність формування вимикаючих сигналів на виході формувача 26. Однак сигнал на виході блоку 39 в цьому випадку не призведе до будь-яких змін в роботі комутатора 1, тобто комутатор 1 зберігає свій вимкнений стан.

Після вимкнення комутатора 1 сигнали на виході датчиків 22...25 не зникають за рахунок струмів витоку, які створюються блоками 4...7 витоку струму, і тому формувач 26 зберігає працездатність, тобто продовжує формування вимика-

ючого сигналу і блокує тим самим роботу формувача 17 вмикаючих сигналів. При повному порушенні $(n - m' + 1)$ з n струмознімальних контактів (при відриві відповідних струмознімачів від контактного дроту) зникають струми у вхідних колах відповідних блоків витоку блоку 3 контролю і, як слідство, вихідний сигнал блоку 14 або блоку 15 стає менше порогового значення U_{II} . В результаті цього зникне сигнал на одному з входів логічного елемента 16 і на виході блоку 3 контролю. Завдяки цьому виключається формування вмикаючого сигналу формувачем 17, і формується за допомогою логічного елемента 42 дублюючий сигнал на вимкнення комутатору 1. При наступному порушенні решти паралельно ввімкнених струмознімачів від контактного дроту іскріння практично виключене завдяки вимкненому стану комутатору 1 і малому значенню струму витоку.

При розриві нерозгалуженої частини кола тягового струму, наприклад, при обриві контактного дроту з тяговим струмом, при одночасному відриві n паралельно вмикаємих струмознімачів від контактного дроту, а також в момент перемикання додаткових резисторів в системі регулювання тягових двигунів, у місці розриву цього кола стрибкоподібно впродовж 10^{-9} с виникає напруга не менше 8,5 В до появи електричної дуги [29]. Завдяки цьому на елементах кола тягового струму, що мають індуктивність, в тому числі і на затискачах тягового навантаження 2, в момент розриву цього кола відбувається зменшення напруги на декілька вольт з дуже великою швидкістю, суттєво перевищуючи можливі значення швидкості зменшення цієї напруги в звичайних режимах споживання струму від контактної мережі, наприклад, в результаті пульсації випрямленої напруги тягової підстанції. Тому на виході диференціатора 40 виникає короткий імпульс підвищеної напруги, що перевищує за значенням вибране порогове значення. У результаті на виході порогового блоку 41 виникає сигнал, який свідчить про розрив нерозгалуженої частини кола тягового струму. Вихідний сигнал диференційного блоку 39 викликає формування на початковій стадії розриву кола вмикаючого сигналу на виході формувача 26, швидке вимикання тягового навантаження 2 за допомогою комутатора 1 і запобігання небезпечного дугоутворення у місцях розриву нерозгалуженої частини кола тягового струму. Під час експлуатації електровоза мож-

ливі випадки споживання струму безреактивним колом, наприклад, колом освітлення електровозу. Для забезпечення працездатності блоку 39 у таких випадках в коло освітлення вмикається дросель (на креслені непоказаний).

Запропонований пристрій дозволяє обмежувати дугоутворення при використанні лише одного струмознімача в основному за рахунок використання диференційного блоку 39. Для цього необхідно лише змінити порогове значення сигналів U_{II} і I_{II} в блоках 3 і 26. Така необхідність може виникнути, наприклад, при пошкодженні струмознімачів, або в випадку технічної складності експлуатації багато-контактних струмознімачів в шахтних умовах.

Стосовно до однопровідних контактних мереж, які є найбільш розповсюджені в вугільних шахтах, важливою перевагою запропонованого пристрою є запобігання небезпечного дугоутворення на колесах і зчіпках рухомого складу а також на стикових з'єднаннях рейкового шляху за рахунок використання диференційного блоку 39, що сприймає порушення електричного контакту у вказаних місцях як розрив нерозгалуженої частини кола тягового струму.

Недолік пристрою – хибні спрацьовування у разі перемикавання контролера електровоза, а також із-за завад, що обумовлені комутацією на колекторі тягового електродвигуна. Такі явища викликають зниження потужності двигунів електровоза. Крім того, пристрій потребує застосування складного струмознімача, робота якого в умовах шахт може бути неефективною.

Таким чином, відомі методи попередження дугоутворення у струмознімальних контактах в шахтних умовах не завжди забезпечують надійну роботу системи дугообмеження без зниження продуктивності електровозного транспорту.

2.2 Розробка силових комутаторів для пристроїв попередження дугоутворення

Робота силових комутаторів пристроїв дугогасіння струмоприймачів рудникових електровозів має особливості. Вони повинні забезпечувати:

- 1) можливість роботи у широкому діапазоні струмових навантажень від частки амперу до 400 - 500 А при зміні напруги в мережі від 100 до 310 В;
- 2) швидкодію при перериванні тягового струму не більш ніж 3 - 4 мс;
- 3) «розсіювання» енергії, що запасається в елементах ключа в результаті переривання струму в індуктивному колі (індуктивність контактної мережі може досягати 20 мГн/км) для запобігання небезпечного перевищення напруги;
- 4) високу готовність до вимикання навантаження і його вмикання для ефективного дугогасіння і мінімізації втрат продуктивності електровозу при вимиканні тягових двигунів.

Принципова схема одного з варіантів ключів, розробленого з урахуванням пропонованих вимог до ключів пристрою дугогасіння, наведена на рис. 2.3, а [30]. Ключ має високу готовність до вимикання навантаження практично в будь-який момент часу, малий час підготовчих процесів, завдяки чому він здатний здійснювати комутацію навантаження з високою частотою. Відмінною рисою цього ключа є використання контурів індуктивного і ємнісного форсування процесів перезарядження комутуючого конденсатора [31].

Ключ працює в такий спосіб. Нехай у початковий момент часу тиристри $VS1 - VS4$ закриті, конденсатори $C2, C3$ розряджені, а конденсатор $C1$ заряджений до напруги джерела живлення. При подачі керуючого імпульсу на тиристор $VS1$ останній включається, у результаті чого починає текти струм через навантаження й послідовно з'єднані конденсатор $C3$ і обмотку I трансформатора $T1$. Одночасно з цим або з деякою затримкою подається керуючий імпульс на тиристор $VS3$, у результаті чого тиристор $VS3$ вмикається, і частина заряду, накопиченого конденсатором $C1$, практично миттєво переходить у комутуючий конденсатор $C2$ через включені тиристри $VS1$ і $VS3$. Після цього тиристор $VS3$ закривається. Далі конденсатори $C1$ і $C2$ форсовано підзаряджується від джерела через обмотку II трансформатора й діод $VD3$, а також обмотку III і діод $VD2$, завдяки імпульсам ЕРС, що наводяться в обмотках II і III при зростанні струму в обмотці I , причому діод

$VD4$ створює коло підзарядки конденсатора $C1$. Після цього практично відразу ж після вмикання тиристора $VS1$ ключ готовий до вимикання навантаження.

За необхідності вимикання навантаження подається керуючий імпульс на тиристор $VS2$, який вмикається й разом із зарядженим конденсатором $C2$ шунтує тиристор $VS1$. У результаті цього тиристор $VS1$ швидко закривається, і починається перезарядження конденсатора $C2$ від джерела живлення через навантаження Z_H і тиристор $VS2$. Далі, із заздалегідь обраною затримкою, що перевищує час закривання тиристора $VS1$, подається керуючий імпульс на тиристор $VS4$, у результаті чого тиристор вмикається, і частина заряду, накопиченого конденсатором $C1$, переходить у конденсатор $C2$ через тиристори $VS2$ і $VS4$ і значно прискорює тим самим процес його перезарядження. Прискорення процесу перезарядження комутуючого конденсатора обумовлює прискорення процесу переривання споживаного від джерела живлення струму, особливо у разі його малого значення. При перезаряджанні конденсатора $C2$ напруга на навантаженні зменшується, і тому в обмотці I починає протікати струм у зворотному напрямку, завдяки накопиченому заряду конденсатора $C3$, причому цей струм зростає протягом деякого часу, що перевищує час перезарядження конденсатора $C2$. При зростанні цього струму в обмотці II індукується ЕРС зворотного напрямку, яка замикає діод $VD3$ і тим самим забезпечує замикання тиристорів $VS2$ і $VS4$. Підживлення конденсатора $C1$ здійснюється через діод $VD3$ і обмотку II трансформатора при незначному струмі, що не спричиняє небезпечного іскріння. Для зменшення втрат енергії в ключі може бути передбачена пауза між моментом включення тиристорів $VS1$ і $VS3$ з метою забезпечення можливості підготовчого заряду конденсатора $C2$ через коло $VS1$ - $VD2$ - $T1$ (III). Із цією ж метою доцільно забезпечувати тривалість паузи між включеннями тиристорів $VS2$ і $VS4$, приблизно рівну тривалості перезаряду комутуючого конденсатора до напруги мережі в процесі вмикання значних тягових навантажень.

Найбільша ефективність роботи ключа [32] забезпечується при мінімальній індуктивності тягової мережі, коли підвищується роль індуктивного форсування процесу зарядки комутуючого конденсатора. Експериментальні дослідження ключа, у тому числі й у шахтних умовах, показали досить високу ефективність

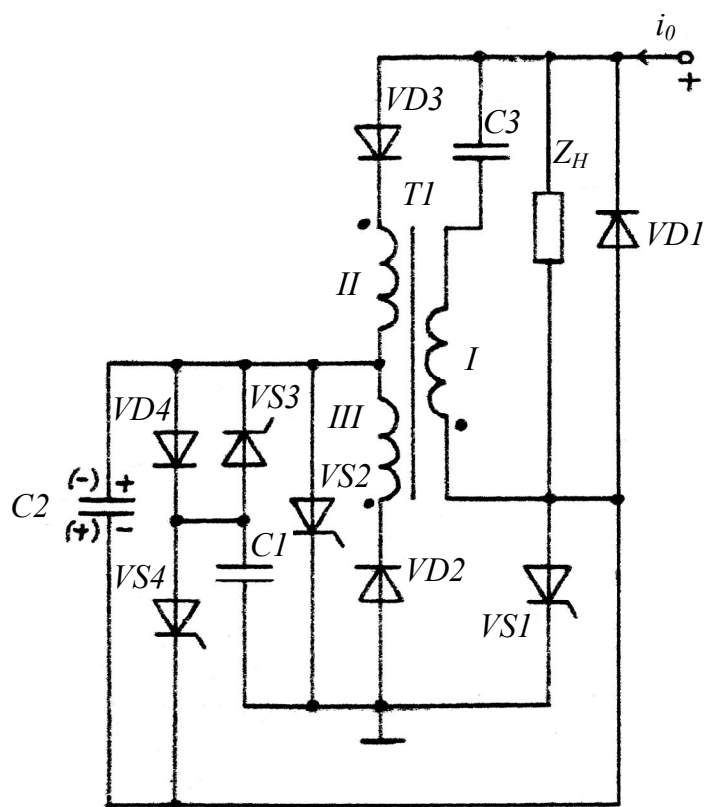
його роботи у пристрої дугогасіння. Однак необхідні параметри ключа досягаються при значних втратах енергії й досить складному схемному рішенні. Тому був розроблений новий тиристорний ключ, принципова схема якого показана на рис. 2.3, б [33].

Він містить: силовий тиристор $VS1$; контур примусової конденсаторної комутації, що має комутуючий $C1$ та форсуючий $C2$ конденсатори, дросель L_k , тиристор $VS2$, діоди $VD1$ і $VD3$; навантаження Z_H , що зашунтоване зворотним діодом $VD3$; резистор $R1$ для зарядки конденсатора $C1$ і компенсації витоку його заряду; коло, яке складається з резистора $R2$ і діода $VD2$ для забезпечення "розсіювання" зайвої енергії, запасеної конденсатором $C1$ у результаті переривання струму, споживаного від мережі, коло $VS3-L_n$ перезаряджання конденсатора $C1$; коло $R3-L_3-VD4$ заряджання конденсатора $C2$ (у найпростішому випадку може складатися з резистора $R3$ або дроселя L_3).

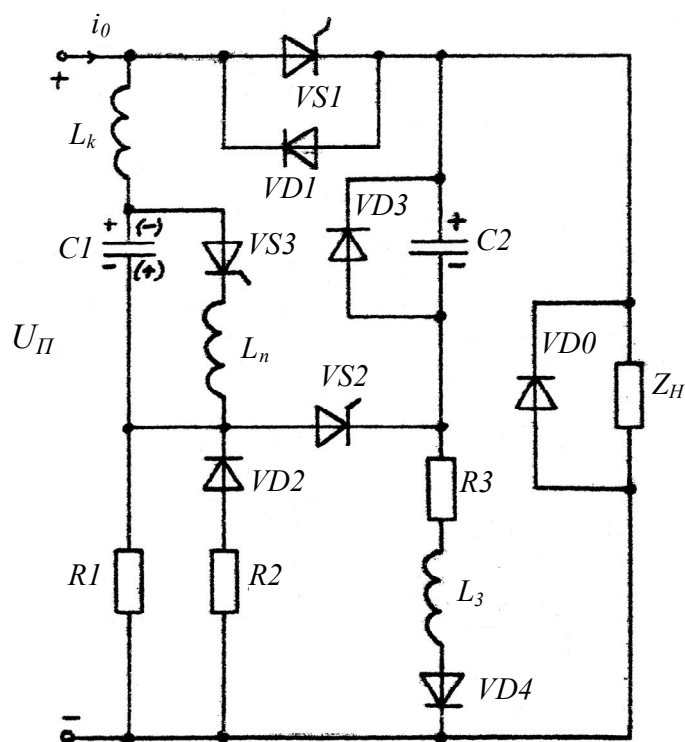
Ключ працює в такий спосіб. У вихідному стані тиристори виключені, конденсатор $C2$ розряджений, а конденсатор $C1$ заряджений до напруги джерела живлення полярністю, зазначеною на рисунку без дужок.

Для вмикання навантаження подається керуючий сигнал на тиристор $VS1$. Тиристор $VS1$ відкривається, і навантаження Z_H підключається до джерела. Одночасно із цим починається зарядка форсуючого конденсатора $C2$ по колу "+"- $VS1-C2-R3-L_3-VD4$ -"-. Зарядка конденсатора $C2$ здійснюється відносно швидко, тому що ємність $C2$ значно менше ємності комутуючого конденсатора $C1$. Діод $VD4$ у колі підзарядки запобігає довільному закриванню тиристора $VS1$ під час коливального процесу заряджання конденсатора $C2$ і розряджання його через навантаження.

Для вимикання навантаження на тиристори $VS3$ і $VS2$ подаються сигнали керування, причому сигнал керування на тиристор $VS2$ подається з деякою паузою τ' після подачі сигналу керування на тиристор $VS3$.



а)



б)

Рисунок 2.3 – Принципові схеми тиристорних ключів для пристроїв дугогасіння

У цьому випадку конденсатор $C1$ спочатку перезаряджається полярністю, зазначеною в дужках, через дросель L_n і тиристор $VS3$ протягом часу τ' , після чого тиристор $VS3$ запирається. При відкриванні тиристора $VS2$ здійснюється процес перезаряджання конденсатора $C1$ до напруги вихідної полярності спочатку по контуру $C1-VS2-C2-VS1(VD1)-L_k-C1$, потім (після повної розрядки конденсатора $C2$) по контуру $C1-VS2-VD3-VS1(VD1)-L_k-C1$ у результаті чого закривається тиристор $VS1$.

Заряд конденсатора $C2$ забезпечує компенсацію втрат енергії, що виникають у процесі перезарядження комутуючого конденсатора. Завдяки цій компенсації конденсатор $C1$ перезаряджається по вказаним контурам до підвищеної напруги. Це дозволяє суттєво скоротити час преривання струму, споживаного від мережі, у випадку малих навантажень за рахунок скорочення тривалості процесу зарядки конденсатора $C1$ через навантаження. "Розсіювання" зайвої енергії, запасеної комутуючим конденсатором $C1$ в результаті переривання споживаного від мережі струму, здійснюється після наступного вмикання тиристора $VS1$.

"Розсіювання" енергії конденсатора $C1$ по зазначеному колу запобігає процесу "збільшення" напруги на комутуючому конденсаторі. Резистор $R2$ при цьому обмежує розрядний струм конденсатора $C1$, виключаючи можливість його розрядки до неприпустимо низької напруги протягом часу зростання струму в мережі до величини струму навантаження.

Висока готовність ключа до вимикання забезпечується завдяки малому часу підготовки й безперервній підзарядці конденсатора $C1$ через високоомний резистор $R1$, який обмежує струм підзарядки цього конденсатора до величини, що викликає вибухонебезпечне іскріння між контактним дротом і струмоприймачем при піднятті струмоприймача.

Висока швидкодія ключа при перериванні струму, споживаного від джерела живлення, який змінюється в широкому діапазоні, забезпечується завдяки форсованому перезаряджанню комутуючого конденсатора незалежно від струму навантаження й компенсації втрат при перезарядках цього конденсатора.

Зазначені переваги тиристорного ключа дозволяють забезпечити ефективну роботу пристроїв дугогасіння.

Для оцінювання ефективності роботи запропонованого ключа (рис. 2.3, б) в пристроях дугогасіння розглянемо процеси в ньому при перериванні споживаного від мережі струму i_{OH} з моменту подачі вимикаючого сигналу (керуючого сигналу на тиристор $VS3$).

Після відмикання тиристора конденсатор $C1$ перезаряджається до напруги $U_{\square 1}$ зворотної полярності протягом часу $\tau_1 = \frac{\pi}{\omega_1}$, причому:

$$U_{\tau_1} = U_{C0} \cdot \exp\left(-b_1 \frac{\pi}{\omega_1}\right), \quad (2.3)$$

де U_{C0} - початкова напруга на конденсаторі; $b_1 = \frac{r_1}{2L_k}$; r_1 - еквівалентний активний опір контуру перезаряду; $\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{C1L_k} - b_1^2}$.

Після включення тиристора $VS2$ починається процес перезаряду конденсатора $C1$ по контуру $C1-VS2-C2-VS1(VD1)-L_k-C1$ протягом часу $\square\square$ до моменту розрядки конденсатора $C2$, (враховуючи, що індуктивність реактора підстанції набагато перевищує індуктивність дроселя L_k , впливом процесу перезаряду конденсатора $C1$ через коло $R3-L3-VD4$ і джерело живлення можна знехтувати).

Рівняння, що описує зміни струму при перезаряді конденсатора має вигляд:

$$i_2(t) = \frac{U_{\tau_1} + U_{C2}}{L_k \omega_2} \exp(b_2 t) \sin(\omega_2 t), \quad (2.4)$$

де $\omega_2 = \sqrt{\frac{C1 + C2}{L_k C1 C2} - b_2^2}$; $b_2 = -\frac{r_2}{2L_k}$; r_2 - еквівалентний активний опір контуру перезаряду; U_{C2} - напруга на конденсаторі $C2$ у момент включення тиристора $VS2$. Так як напруга на конденсаторі $C2$ змінюється за законом:

$$u_{C2}(t) = \frac{1}{C2} \int_0^t i_2(t) dt - U_{C2},$$

вираз для $U_{C2}(t)$ з урахуванням (2.4) має вигляд:

$$u_{C2}(t) = \frac{U_{\tau1} + U_{C2}}{L_n \omega_2 C2} \frac{1}{\omega_2^2 + b_2^2} [\exp(b_2 t) (b_2 \sin(\omega_2 t) - \omega_2 \cos(\omega_2 t)) + \omega_2] - U_{C2}. \quad (2.5)$$

Дорівнявши (2.5) нулю і, вирішуючи отримане рівняння відносно t , одержимо значення τ_2 . Напруга $U_{\tau2}$ на конденсаторі $C1$ і струм у контурі перезаряду в момент вимикання діода $VD3$ можуть бути знайдені з рівнянь (2.4), (2.5) шляхом підстановки у них значень τ_2 .

$$U_{\tau2} = \frac{U_{\tau1} + U_{C1}}{L_k \omega_2 C1} \frac{1}{\omega_2^2 + b_2^2} [\exp(b_2 \sin(\omega_2 \tau_2) - \omega_2 \cos(\omega_2 \tau_2)) + \omega_2] - U_{\tau1}; \quad (2.6)$$

$$I_{\tau2} = \frac{U_{\tau1} + U_{C2}}{L_k \omega_2} \exp(b_2 \tau_2) \sin(\omega_2 \tau_2). \quad (2.7)$$

Напруга $U_{\tau2}$ і струм $I_{\tau2}$ є початковими умовами для розрахунків наступного етапу перезаряду конденсатора $C1$ через дросель L_k тривалістю τ_3 до моменту часу, коли струм у контурі зменшиться до струму навантаження i_{OH} . Рівняння струму у контурі й напруги на конденсаторі $C1$ на цьому етапі:

$$i_3(t) = I_{\tau2} \exp(b_3 t) \left[\cos(\omega_3 t) - \frac{1}{\omega_3} \left(-b_3 + \frac{U_{\tau2}}{L_k \cdot I_{\tau2}} \right) \sin(\omega_3 t) \right]; \quad (2.8)$$

$$u_3(t) = U_{\tau2} \exp(b_3 t) \left[\cos(\omega_3 t) + \frac{1}{\omega_3} \left(-b_3 + \frac{I_{\tau2}}{C1 \cdot U_{\tau2}} \right) \sin(\omega_3 t) \right], \quad (2.9)$$

де $b_3 = -\frac{r_3}{2L_k}$; r_3 - еквівалентний активний опір контуру перезаряду;

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{1}{L_k C1} - b_3^2}.$$

Значення \square_3 може бути визначене за допомогою рівняння (2.8) шляхом підстановки замість $i_3(t)$ значення i_{OH} і розв'язку отриманого рівняння відносно t .

Після запирання діода $VD1$ починається зменшення споживаного від мережі струму до моменту запирання тиристора $VS2$, після чого споживання струму від джерела живлення припиняється. Тривалість і характер процесу зниження споживаного струму суттєво залежать від величини й характеру навантаження, а також від напруги $U_{\tau 3}$ на комутуючому конденсаторі $C1$ у момент запирання діода $VD1$. Ця напруга може бути обчислена за допомогою формули:

$$U_{\tau 3} = U_{\tau 2} \exp(b_3 \tau 3) \left[\cos(\omega_3 \tau 3) + \frac{1}{\omega_3} \left(-b_3 + \frac{I_{\tau 2}}{C1 \cdot U_{\tau 2}} \right) \sin(\omega_3 \tau 3) \right] \quad (2.10)$$

При значному тяговому навантаженні (навантажені тягові двигуни), коли впливом інших кіл електровоза можна знехтувати, подальший процес зарядки конденсатора може бути розрахований за допомогою розрахункової схеми, наведеної на рис. 2.4. На схемі через $\sum L$ позначена сумарна індуктивність у колі джерела живлення, включаючи індуктивність трансформатора підстанції, реактора, індуктивність мережі й дроселя комутації, $\sum R$ - сумарний активний опір у колі живлення контуру перезаряду, $L_{\partial\partial}$, $E_{\partial\partial}$, R відповідно еквівалентна індуктивність, ЕРС двигуна й активний опір у колі навантаження.

Рівняння, що описує процес зміни струму в колі до моменту відкриття зворотного діода $VD0$:

$$(L_{\partial\partial} + \sum L) \frac{di_4}{dt} + (R + \sum R) i_4 + U_{\tau 3} + E_{\partial\partial} = E_{\Pi} \quad (2.11)$$

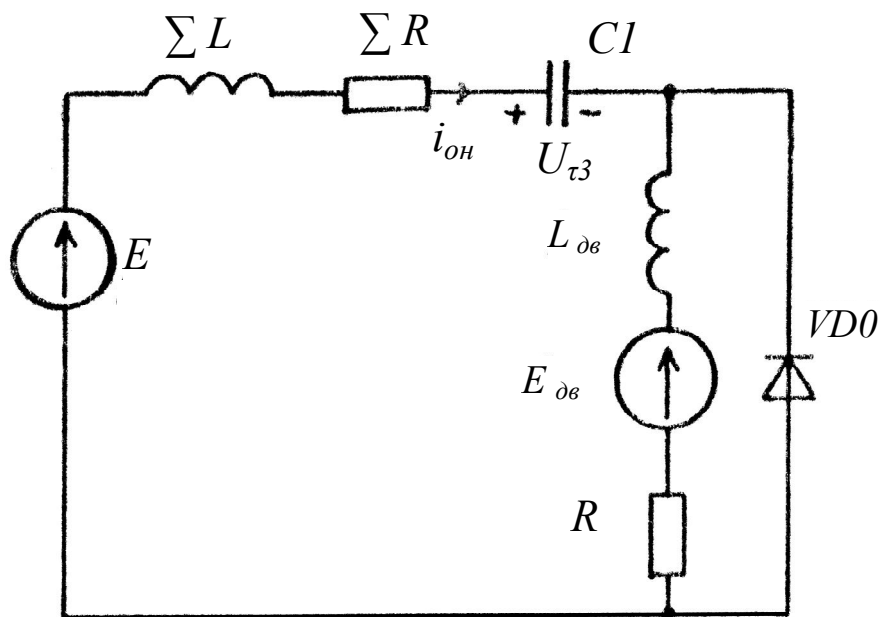


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема для визначення тривалості етапів роботи тиристорного ключа для пристроїв дугогасіння при перериванні споживаного струму

Якщо представити $E_{\delta в} = k' i_4$, рівняння (2.11) після перетворень має вигляд:

$$\frac{d^2 i_4}{dt^2} + \frac{\sum R + R + k'}{2(\sum L + L_{\delta в})} \frac{di_4}{dt} + \frac{i_4}{C1(L_{\delta в} + \sum L)} = 0, \quad (2.12)$$

де k' - коефіцієнт пропорційності між струмом двигуна і його ЕРС.

Розв'язуючи (2.12) відносно i_4 одержимо:

$$i_4(t) = i_{OH} \exp(b_4 t) \cos(\omega_4 t) + \frac{1}{\omega_4} \exp(b_4 t) \left(\frac{E_{\Pi} - U_{\tau 3}}{\sum L + L_{\delta в}} + b_4 i_{OH} \right) \sin(\omega_4 t), \quad (2.13)$$

$$\text{де } b_4 = -\frac{\sum R + R + k'}{2(\sum L + L_{\delta в})}, \quad \omega_4 = \sqrt{\frac{1}{C1(L_{\delta в} + \sum L)} - b_4^2}.$$

Приймаючи, що k' є постійна величина, з початкових умов знаходимо:

$$k' = \frac{E_{II} - i_{OH}(\sum R + R)}{i_{OH}} \quad (2.14)$$

Відмикання зворотного вентиля відбувається відразу ж після зменшення напруги на ньому до нуля, тобто коли виконується рівність:

$$L_{\partial\delta} \frac{di_4}{dt} + (k' + R)i_4 = 0 \quad (2.15)$$

Розв'язуючи (2.11) разом з (2.15) відносно $U_{\square 3}$, можна знайти величину напруги на комутуючому конденсаторі, за якої вмикається зворотний вентиль $VD0$ відразу після запирання діода $VD1$:

$$U_{\tau 3} \geq \frac{\sum L + L_{\partial\delta}}{L_{\partial\delta}} i_{OH} (k' + R) \quad (2.16)$$

або з урахуванням (2.14):

$$U_{\tau 3} \geq \frac{\sum L + L_{\partial\delta}}{L_{\partial\delta}} (E_{II} - i_{OH} \sum R) \quad (2.17)$$

Якщо нерівність (2.17) не виконується, то тривалість етапу $\tau 4$ до відкриття зворотного діода $VD0$ може бути визначена за допомогою рівнянь (2.13) і (2.15) шляхом підстановки функцій $di_4(t)/dt$ і $i_4(t)$, отриманих з (2.13) в (2.15), і розв'язання останнього відносно t :

$$\tau 4 = \frac{1}{\omega_4} \left(\arctg \frac{L_{\partial\delta} (m + b_4 i_{OH}) + E_{II} - i_{OH} \sum R}{L_{\partial\delta} \left(i_{OH} \omega_4 - \frac{b_4 m}{\omega_4} \right) - \frac{E_{II} - i_{OH} \sum R}{i_{OH} \omega_4}} + \pi k'' \right), \quad (2.18)$$

$$\text{де } m = \frac{E_{II} - U_{\tau 3}}{\sum L + L_{\partial 6}} + b i_{OH}.$$

$k''=1$, якщо виконується рівність:

$$L_{\partial 6} \left(i_{OH} \omega_4 - \frac{b_4 m}{\omega_4} \right) - \frac{E_{II} - i_{OH} \sum R}{i_{OH} \omega_4} m > 0$$

і $k''=0$, якщо нерівність не виконується.

Напруга на комутуючому конденсаторі й струм, споживаний від мережі в момент відкриття зворотного діода $VD0$ можуть бути знайдені за допомогою рівнянь (2.11), (2.13 і 2.18):

$$U_{\tau 4} = E_{II} + \exp(b_4 \tau 4) \times \left[(U_{\tau 3} - E_{II}) \cos(\omega_4 \tau 4) - \frac{b_4}{\omega_4} \left(U_{\tau 3} - E_{II} - \frac{i_{OH}}{b_4 \cdot C1} \right) \sin(\omega_4 \tau 4) \right]; \quad (2.19)$$

$$I_{\tau 4} = i_{OH} \exp(b_4 \tau 4) \left[\cos(\omega_4 \tau 4) - \frac{1}{\omega_4} \left(-b_4 - \frac{E_{II} - U_{\tau 3}}{(\sum L + L_{\partial 6}) i_{OH}} \right) \sin(\omega_4 \tau 4) \right]. \quad (2.20)$$

Надалі, після відкриття діода $VD0$ процес зниження струму може бути розрахований за допомогою розрахункової схеми, наведеної на рис. 2.5.

Рівняння для струму й напруги на конденсаторі $C1$ в операторній формі:

$$i_{\tau 5}(p) = \frac{p^2 I_{\tau 4} + p \left(\frac{E_{II} - U_{\tau 4}}{\sum L} \right)}{p^2 + \frac{\sum R}{\sum L} p + \frac{1}{\sum L \cdot C1}} \quad (2.21)$$

$$u_{\tau 5}(p) = E_{II} \frac{p^2 \frac{U_{\tau 4}}{E_{II}} + p \left(\frac{I_{\tau 4}}{E_{II} C1} + \frac{\sum R U_{\tau 4}}{\sum L E_{II}} \right) + \frac{1}{\sum L \cdot C1}}{p^2 + \frac{\sum R}{\sum L} p + \frac{1}{\sum L \cdot C1}} \quad (2.22)$$

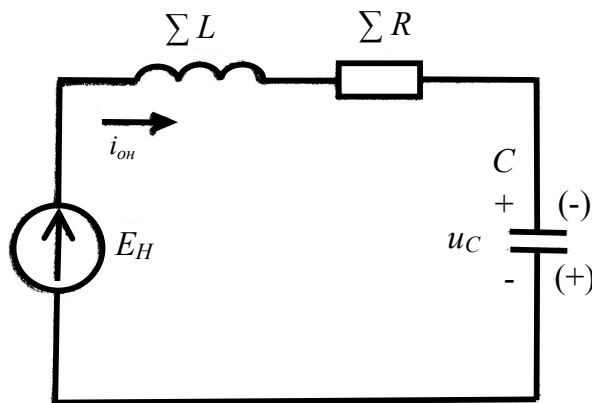


Рисунок 2.5 – Схема заміщення для розрахунку часу переривання споживаного від мережі струму

Переходячи від зображень до оригіналу:

$$i_{\tau 5}(t) = I_{\tau 4} \exp(b_5 t) \cos(\omega_5 t) - \frac{1}{\sum L \cdot \omega_5} \times \quad (2.23)$$

$$\times \left(U_{\tau 4} - E_{II} + I_{\tau 4} \frac{\sum R}{2} \right) \exp(b_5 t) \sin(\omega_5 t)$$

$$u_{\tau 5}(t) = E_{II} + \exp(b_5 t) \times \quad (2.24)$$

$$\times \left[(U_{\tau 4} - E_{II}) \cos(\omega_5 t) + \frac{1}{\omega_5} \left(-U_{\tau 4} b_5 + \frac{I_{\tau 4}}{C1} + E_{II} b_5 \right) \sin(\omega_5 t) \right]$$

$$\text{де } b_5 = \frac{\sum R}{2 \sum L}; \quad \omega_5 = \sqrt{\frac{1}{\sum L \cdot C1} - b_5^2}.$$

Тривалість процесу зменшення струму може бути знайдена з рівняння (2.23) шляхом дорівнювання його нулю. Тоді:

$$\tau_5 = \frac{1}{\omega_5} \left(\operatorname{arctg} \frac{I_{\tau 4} \sum L \cdot \omega_5}{U_{\tau 4} - E_{II} + I_{\tau 4} \frac{\sum R}{2}} + \pi k_1'' \right), \quad (2.25)$$

де $k_1''=1$, якщо виконується нерівність:

$$U_{\tau 4} - E_{II} + I_{\tau 4} \frac{\sum R}{2} > 0;$$

$k_1''=0$, якщо

$$U_{\tau 4} - E_{II} + I_{\tau 4} \frac{\sum R}{2} < 0.$$

При виконанні рівності $U_{\tau 4} - E_{II} + I_{\tau 4} \frac{\sum R}{2} = 0$

значення τ_5 визначається з виразу:

$$\tau_5 = \frac{\pi}{2\omega_5} \quad (2.26)$$

Таким чином, сумарний час переривання споживаного від мережі струму тиристорним ключем при відключенні тягового струму:

$$\tau_S = \sum_{i=1}^5 \tau_i \quad (2.27)$$

При незначному навантаженні, після запирання діода $VD1$ на процес переривання споживаного струму може суттєво впливати коло $R3-L3-VD4$. У найпростішому випадку при $L3=0$ розрахункова схема заміщення представлена на рис. 2.5, на якій $\sum R$ позначений сумарний активний опір кола, включаючи опір R_3 , паралельно включених резистора R_3 і навантаження. Рівняння для струму в операторній формі:

$$i_{\tau R}(p) = \frac{p^2 i_{OH} + p \left(\frac{E_{\Pi} - U_{\tau 3}}{\sum L} \right)}{p^2 + \frac{\sum R}{\sum L} p + \frac{1}{\sum L \cdot C1}} \quad (2.28)$$

Переходячи від зображення до оригіналу, одержимо:

$$i_{\tau R}(t) = i_{OH} \exp\left(-\frac{a}{2}t\right) \left[ch(bt) + \frac{1}{b} \left(\frac{E_{\Pi} - U_{\tau 3}}{\sum L \cdot i_{OH}} - \frac{a}{2} \right) sh(bt) \right], \quad (2.29)$$

$$\text{де } a = \frac{\sum R}{\sum L}; \quad b = \sqrt{\frac{a^2}{4} - \frac{1}{\sum L \cdot C1}}.$$

Для оцінки часу переривання споживаного струму будемо вважати, що струм миттєво переривається з моменту його зменшення до величини струму втримання $i_{y\delta}$ тиристора $VS2$ (рис. 2.3, б). Тоді тривалість процесу переривання \square_R може бути знайдена з рівняння:

$$i_{y\delta} = i_{OH} \exp\left(-\frac{a}{2}\tau_R\right) \left[ch(b\tau_R) + \frac{1}{b} \left(\frac{E_{\Pi} - U_{\tau 3}}{\sum L \cdot i_{OH}} - \frac{a}{2} \right) sh(b\tau_R) \right]. \quad (2.30)$$

Сумарний час τ_{SR} переривання споживаного струму:

$$\tau_{SR} = \sum_{i=1}^3 \tau_i + \tau_R \quad (2.31)$$

На рис. 2.6, а наведені графіки зміни струму i_k комутуючого контуру з моменту відкриття тиристора $VS2$ при різних значеннях $k = C1/C2$ і криві зміни споживаного від мережі струму (рис. 2.6, б), отримані за допомогою рівнянь (2.4)-(2.23) при наступних значеннях вхідних у них параметрів:

$$C1 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}; \quad L_k = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}; \quad r_2 = r_3 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ома};$$

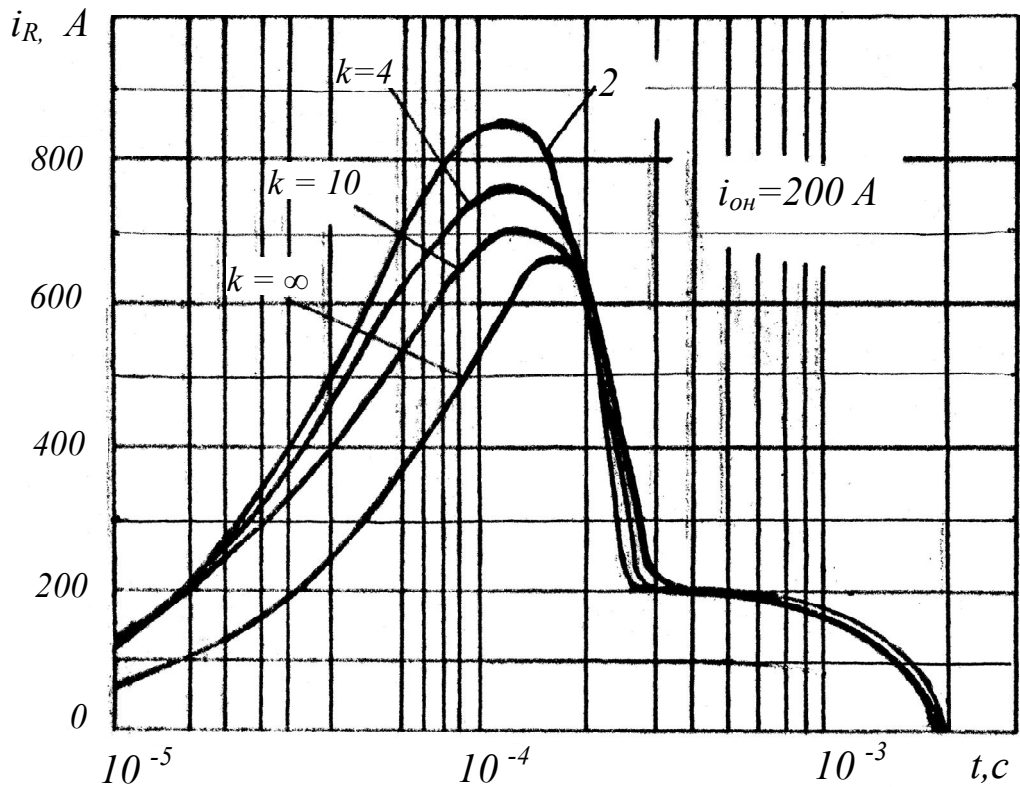
$$L_{ДВ} = 10^{-2} \text{ Гн}; U_{CO} = U_{C2} = E_{II} - i_{OH} \cdot \Sigma R; E_{II} = 275 \text{ В.}$$

Графік, наведений на рис. 2.6, а, показує, що зі збільшенням значення k збільшується максимальний струм контуру, і забезпечуються умови для комутації силового тиристора при більших значеннях струму навантаження. Криві, наведені на рис. 2.6, б, показують, що час переривання тягового струму практично не залежить від величини струму навантаження й значною мірою визначається величиною індуктивності ΣL у колах живлення. При реальних значеннях цієї індуктивності в умовах шахтних контактних мереж цей час менше необхідного часу переривання споживаного струму. На рис. 2.7, а наведені криві залежності відрізка часу τ_S від відношення $C1/C2$ при різних значеннях струму навантаження, індуктивності в колі живлення й зазначених вище параметрах елементів ключа. Криві показують, що в діапазонах зміни тягового струму 50-300 А і індуктивності контактної мережі 0,1-6 мГн вплив ємності форсуючого конденсатора на швидкодію переривання струму незначний. Відповідно до цього максимальна напруга на комутуючому конденсаторі U_{cm} після переривання струму також практично не залежить від величини ємності форсуючого конденсатора (рис. 2.7, б).

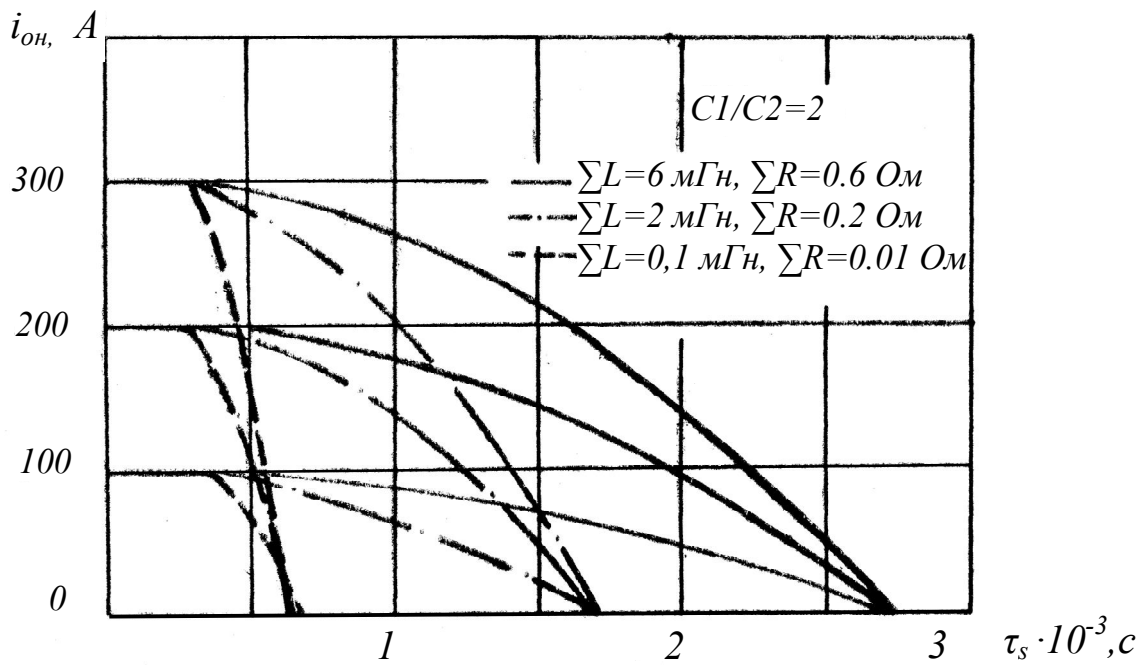
Зі зменшенням струму навантаження збільшується вплив ємності форсуючого конденсатора на тривалість процесу переривання споживаного струму τ_{SR} і при мінімальному навантаженні (кола освітлення електровоза) за допомогою форсуючого конденсатора, можливо істотне скорочення часу τ_{SR} . На рис. 2.8 наведені криві залежності $\tau_{SR} = f(k)$, отримані за допомогою рівнянь (2.3)-(2.10), (2.30), (2.31) при зазначених вище параметрах мережі й елементів ключа й $i_{OH} = 2 \text{ А}$, $i_{УД} = 0,05 \text{ А}$, $R_{\Sigma} = 10 \text{ Ом}$ і різних значеннях $R = r_1 = r_2 = r_3$.

Як видно з кривих, час переривання споживаного струму при забезпеченні відповідного значення k може бути зменшене більш, ніж в 20 разів. Мінімальне необхідне значення ємності форсуючого конденсатора (максимальне значення k), за якого забезпечується значне підвищення швидкодії ключа, суттєво залежить від величини еквівалентного активного опору (добротності) контурів перезаряду комутуючого конденсатора. Причому, чим менше цей опір (вище добротність кон-

турів), тем менше потрібна ємність форсуючого конденсатора для прискореного переривання струму, споживаного від мережі.

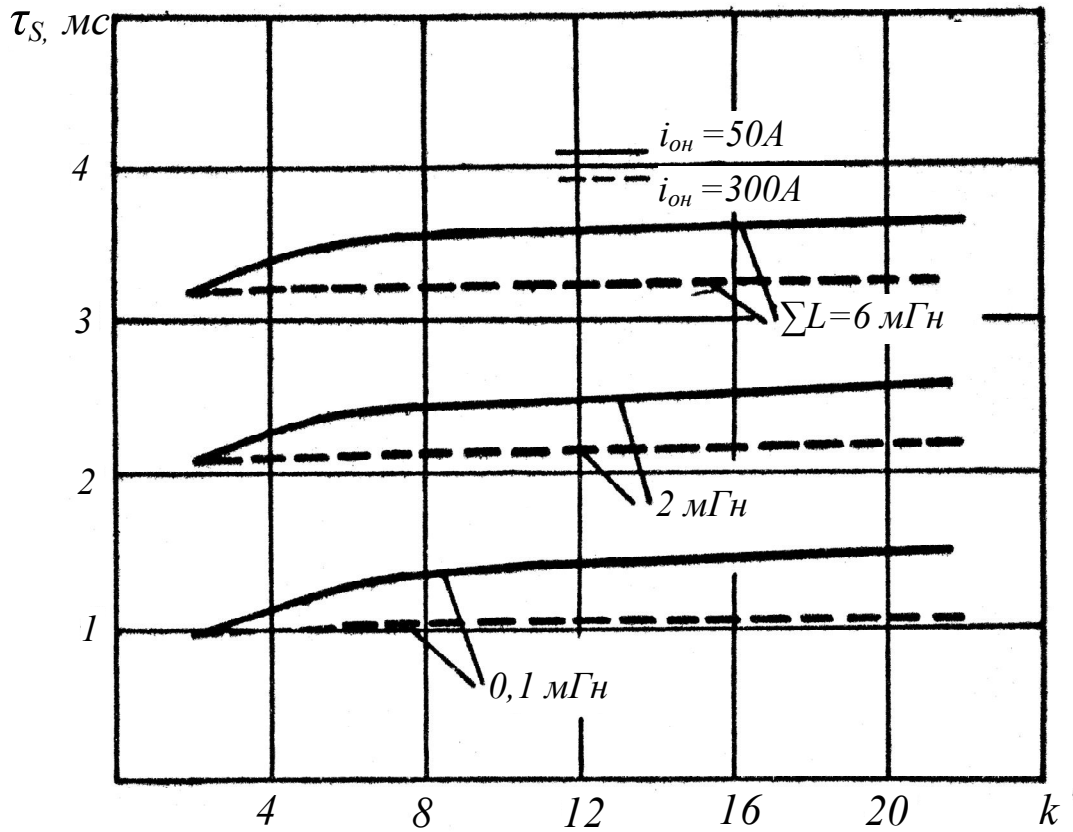


а)

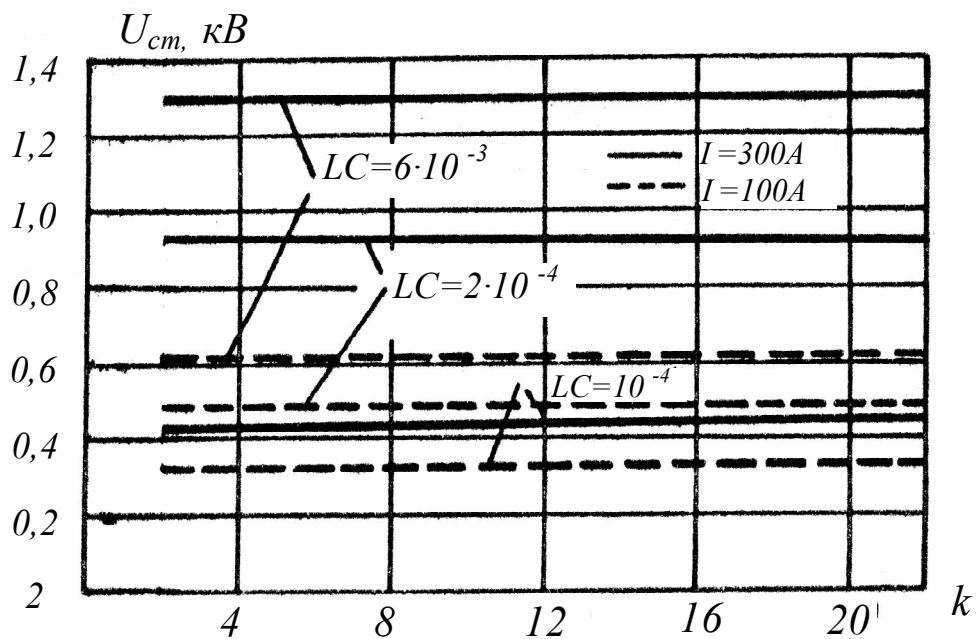


б)

Рисунок 2.6 – Криві залежності зміни струму в контурі комутації (а) і споживаного від мережі струму (б) тиристорного ключа



a)



б)

Рисунок 2.7 – Залежності зміни часу переривання споживаного струму електровоза і максимальної напруги на комутуючому конденсаторі від відношення $C1/C2$ тиристорного ключа

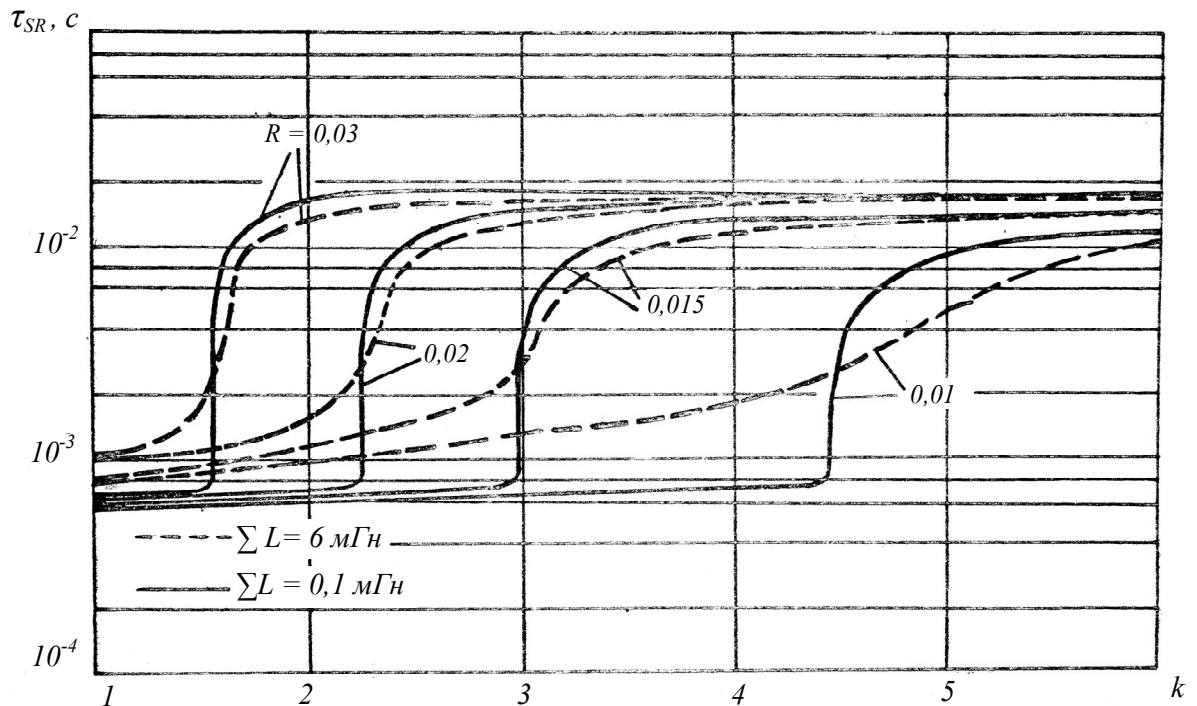


Рисунок 2.8 – Криві залежності часу переривання споживаного струму $i_{OH} = 2 \text{ A}$

2.3 Аналіз та розробка системи управління силовим комутатором та системи попередження дугоутворення транспортних засобів з рухомим струмознімальним контактом

Для надійної та ефективної роботи силового комутатора необхідно забезпечити формування і своєчасну подачу керуючих імпульсів на його входи. З урахуванням логіки роботи комутатора розроблена функціональна структурна схема його керування (рис. 2.9). Схема містить датчик дуги *ДД*, блок контролю відновлення контактів *БКВК*, формувачі імпульсів на керуючі електроди тиристорів *ФІІ* - *ФІЗ*, блок затримки сигналу формування керуючого імпульсу на тиристор *VS2* *БЗ* і блок блокування *І*.

В якості датчика *ДД* може бути застосований розроблений раніше датчик на основі інфрачервоного фотодіода [34].

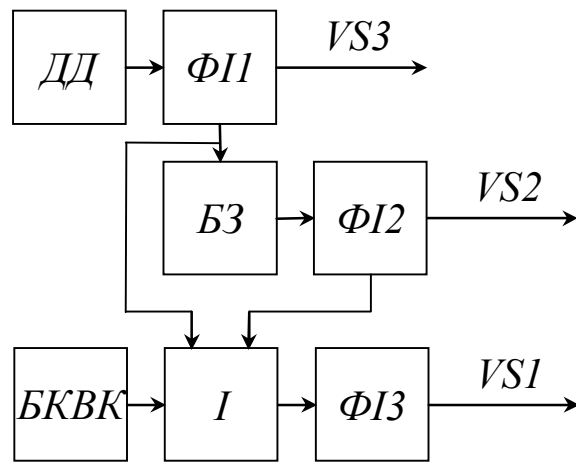


Рисунок 2.9 – Блок-схема системи управління силовим комутатором

Сигнал датчика *ДД* за допомогою формувачів *ФІІ* і *ФІІІ* перетворюється в сигнал, що забезпечує надійне вмикання тиристорів ключа *VS1* і *VS2* (рис. 2.3, б). Блок затримки *БЗ* формує необхідну паузу між сигналами, що поступають на ці тиристори в залежності від параметрів елементів ключа *C1* і L_n в діапазоні 20 - 100 мкс. Блок контролю відновлення контактів формує сигнал торкання струмоприймача до контактного дроту і в найпростішому випадку може бути виконаний на основі резистора витoku у якому тече безпечний відносно дугоутворення струм. Блок блокування *I* забезпечує можливість включення силового тиристора *VS1* тільки після завершення перехідних процесів в комутаторі для виключення «зриву» комутації силового тиристора.

Принципiальна схема блока керування наведена на рис. 2.10.

Схема мiстить елемент узгодження *D1.1* сигналу блока датчика дугоутворення i блока затримки на елементах *D1.2* i *D1.3*. Тривалiсть затримки τ визначається параметрами елементiв *C2* i *R4*. Ланцюг iз елементiв *C3* i *R5* визначає тривалiсть iмпульсу керування тиристора *VS3* 20 – 30 мкс. Вузол на елементах *D2.1* i *D2.2* забезпечує необхідну тривалiсть iмпульсу керування тиристора *VS2*, а також разом iз блоком затримки блокування сигналу включення тиристора *VS1* за допомогою елемента *D3.1*. Вхiднi кола пристрою iзолюванi вiд силового кола оп-

троном $V1$, який керується блоком контролю відновлення контактів на основі високоомного резистора $R1$.

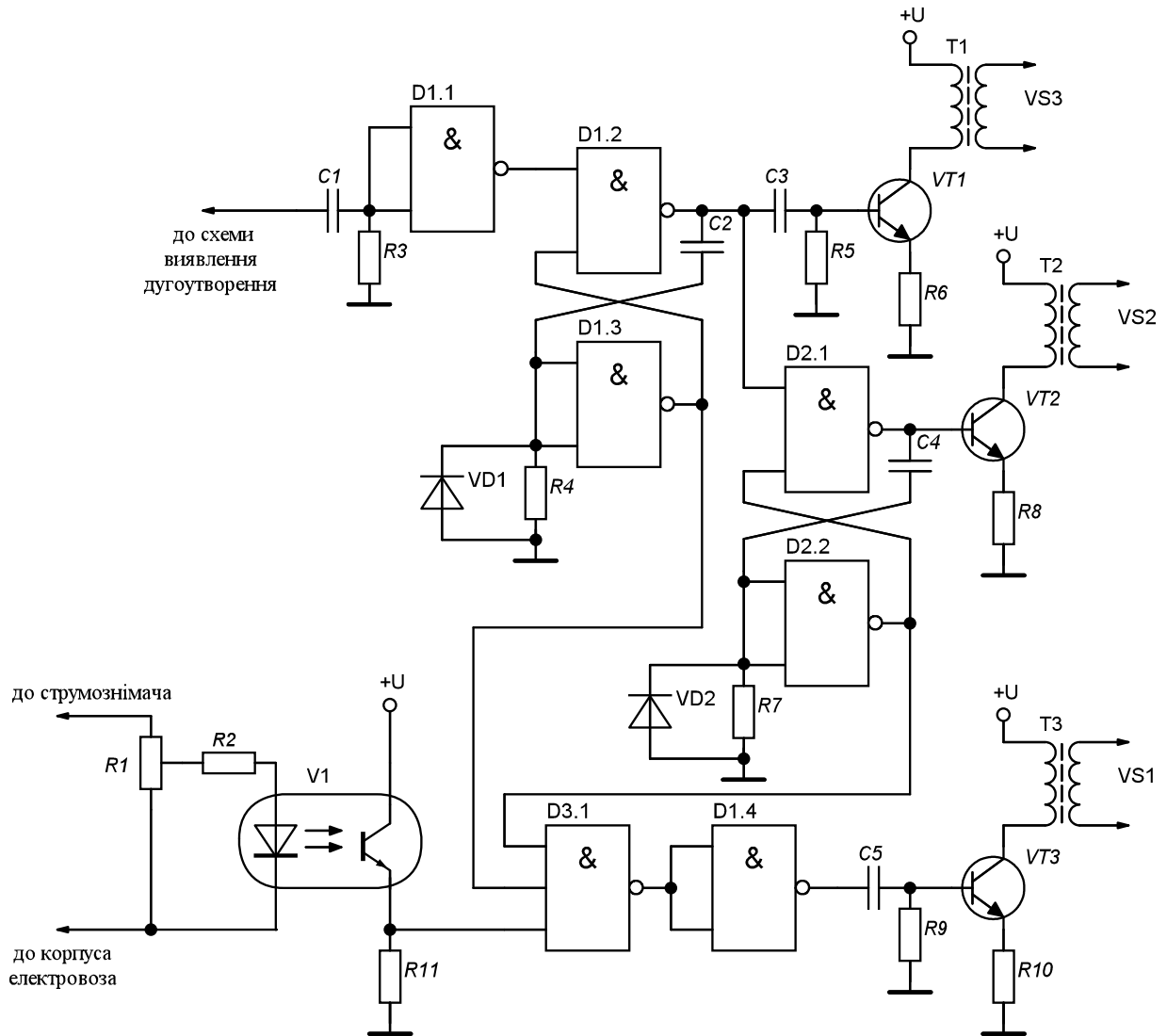


Рисунок 2.10 – Принципіальна схема системи керування тиристорним комутатором

На основі виконаних досліджень розроблено пристрій попередження дугоутворення, схема якого наведена на рис. 2.11.

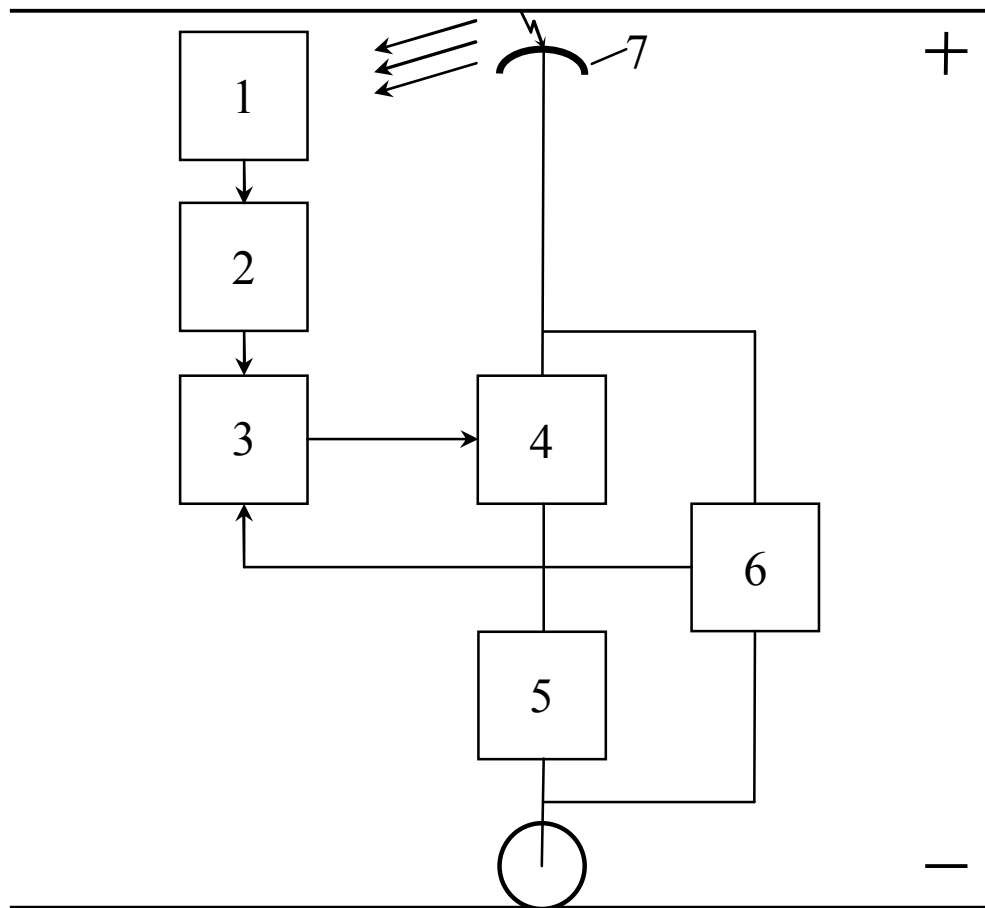


Рисунок 2.11 – Пристрій захисту від дугоутворення при струмозніманні

Схема пристрою складається з датчика випромінювання дуги 1, блоку усунення завад 2, блоку обробки та управління 3, блоку контролю струмознімального контакту 6, комутатора 4, який послідовно ввімкнений між струмознімачем 7 та навантаженням 5, крім того блок контролю струмознімального контакту 6 підключено паралельно до комутатору 4 та навантаження 5.

Пристрій реалізується в такий спосіб.

Датчик випромінювання дуги 1, наприклад, інфрачервоний, який розміщується на струмознімачі 7 або в корпусі електровозу та орієнтується на місце дугоутворення, забезпечує виявлення випромінювання на початковій стадії дугоутворення. У разі виникнення дуги, яка випромінює у широкому спектрі частот, включаючи інфрачервоний, сигнал з датчика випромінювання дуги 1 надходить до блоку усунення завад 2, наприклад, до фільтра високої частоти. Блок усунення за-

вад 2 забезпечує захист від хибних сигналів датчика випромінювання дуги 1 в діапазоні низьких частот, обумовлених зміною освітленості, як від сонячного випромінювання, так і від ламп накаливання й денного світла, а також забезпечує усунення перешкод, які обумовлені пульсаціями напруги в контактній мережі в результаті випрямлення шестифазною мостовою схемою. З блоку усунення завад 2 сигнал надходить до блоку обробки та управління 3, який при втраті контакту між струмознімальним елементом та контактним дротом подає сигнал комутатора 4 на відключення навантаження 5 від струмознімача 7, завдяки чому здійснюється дугогасіння. Блок контролю струмознімального контакту 6 контролює відновлення контакту між струмознімачем 7 та контактним дротом, і у разі відновлення контакту на виході блоку контролю струмознімального контакту 6 формується сигнал, який через блок обробки та управління 3 надає дозвіл на підключення комутатором 4 навантаження 5 до струмознімача 7.

Перевагами пристрою захисту є:

- усунення дугоутворення при струмозніманні;
- підвищена надійність щодо усунення комутаційних завад у мережі пов'язаних з стрибкоподібною зміною напруги мережі, завад пов'язаних з перемиканням контролера електровоза, а також до завад, які обумовлені комутацією на колекторі тягового електродвигуна та забезпечення захисту від хибного спрацювання пристрою, що може бути обумовлене зміною освітленості, як від сонячного випромінювання, так і від ламп накаливання й денного світла, а також забезпечення усунення перешкод, які обумовлені пульсаціями напруги в контактній мережі в результаті випрямлення шестифазною мостовою схемою.
- можливість контролю стану струмознімального контакту при відключеному навантаженні;
- досягнення стабільного рівня потужності двигунів незалежно від завад та надійність захисту від дугоутворення при струмозніманні.

На основі наведених принципових і блок-схем розроблено і випробувано пристрій попередження дугоутворення. В якості рухомих струмозніма-

льних контактів використовувалися контакти автоматичного вимикача АП-50 (рис. 2.12) при швидкості їх розриву до 15 м/с.

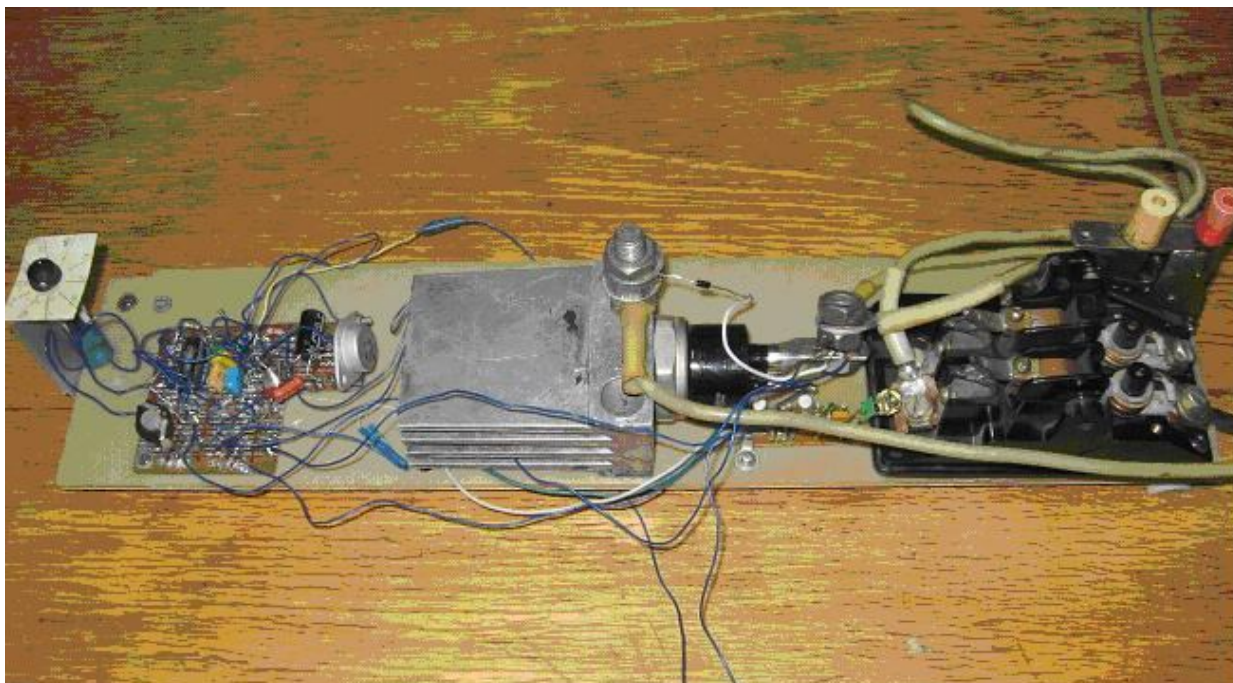


Рисунок 2.12 – Пристрій попередження дугоутворення
(допоміжні елементи комутатора не показані)

Обмеження за потужністю силового тиристора (ТЧ-100) і автоматичного вимикача обумовлені короткочасними процесами їх включення, а також попередженням дугоутворення на контактах, перешкоджаючим їх ерозії.

Попередні експериментальні дослідження в лабораторних умовах показали можливість ефективного попередження дугоутворення і розлітання розжарених часток метала при тривалості переривання струму не більш ніж 3 – 4 мс.

2.4 Висновки

1. В результаті виконання роботи проведено аналіз відомих методів та засобів визначення порушень рухомого струмоznімального контакту струмоприйма-

чів. Встановлено, що відомі засоби визначення цих порушень для одноконтактних струмознімачів недостатньо надійні.

2. Проведено аналіз електромагнітних процесів при дугоутворенні та визначено діапазон хвиль випромінювання дуги, який може бути використаний при контролі її виникнення. Встановлено, що інфрачервоний діапазон є найбільш придатним для виявлення дугоутворення порівняно з ультрафіолетовим та видимим.

3. Проаналізовано можливість використання різноманітних фотоприймачів. Розроблено метод виявлення дугоутворення на основі використання інфрачервоних фотодіодів, який забезпечує усунення завад від сторонніх джерел випромінювання.

4. Розроблено пристрій формування сигналу при порушенні струмознімального контакту на його початкових стадіях.

5. Проаналізовано системи дугогасіння та вибрано метод попередження дугоутворення рухомого струмознімального контакту, який заснований на відключенні електроспоживачів електровоза при порушенні струмознімального контакту струмоприймача.

6. Розроблено силові комутатори для пристроїв попередження дугоутворення із урахуванням вимог до цих комутаторів. Ефективність роботи комутаторів у пристроях дугогасіння досягається завдяки форсуванню перехідних процесів елементів комутатора і розсіюванню зайвої енергії.

7. Проаналізовано та розроблено системи управління силовим комутатором та системи попередження дугоутворення транспортних засобів з рухомим струмознімальним контактом. Випробування пристрою попередження дугоутворення на основі одноконтактного струмоприймача показали можливість ефективного попередження дугоутворення.

3.1 Теоретичне обґрунтування методів автоматичного контролю параметрів ізоляції та дугогасного пристрою

У процесі експлуатації систем електропостачання з ряду причин і в першу чергу з метою прогнозування рівня електробезпеки та надійності електричних мереж і установок необхідно знати стан їхньої ізоляції. Надійність і безпека роботи систем електропостачання багато в чому залежить від значень активного й реактивного опорів ізоляції електричної мережі відносно землі. У мережах з компенсацією ємнісних струмів замикання на землю на зазначені характеристики систем електропостачання істотний вплив робить режим настроювання компенсуючого пристрою [1]. Для одержання більше достовірної інформації про стан ізоляції фаз мережі відносно землі й непрямой оцінки експлуатаційних характеристик систем електропостачання необхідно робити безперервний моніторинг параметрів ізоляції й режиму настроювання дугогасних реакторів під робочою напругою. Це дозволить відслідковувати появу небезпечних станів системи та при наявній технічній можливості, давати випереджальні керуючі команди, що дозволяють мінімізувати можливий збиток.

Для цілей автоматичного й селективного контролю параметрів ізоляції (активного, реактивного й при необхідності повних опорів відносно землі) у розподільних мережах пропонується використовувати метод безперервного виміру значень складових опорів ізоляції мережі відносно землі під робочою напругою, що ґрунтується на використанні накладених на мережу оперативних струмів промислової частоти (рис. 3.1). Суть запропонованого методу безперервного й оперативного контролю параметрів ізоляції відносно землі електричної мережі і її елементів полягає в тому, що на електричну мережу одночасно накладаються два оперативних синусоїдних сигнали, частоти яких не рівні між собою та відрізняються від промислової. На контрольованих ділянках (лінії або приєднанні), а також у місці підключення оперативного джерела встановлюються пристрої, приз-

наченням яких є зняття параметрів оперативних сигналів і їхня відповідна обробка з метою визначення в відповідних значень оперативних струмів і напруг.

Застосування мікроЕОМ або мікроконтролерів дозволяє запропонований метод використовувати для оперативної оцінки рівня активного і ємнісного опору ізоляції як всієї мережі в цілому, так і кожного з приєднань розподільної мережі, а також для оперативного виміру значення індуктивності дугогасного реактора та автоматичного настроювання компенсуючого пристрою у резонанс із ємністю розподільної мережі. Крім того, запропонований спосіб дозволяє реалізувати систему вибіркової сигналізації або захисту від витоків і замикань на землю в розподільних мережах напругою 6 - 10 кВ систем електропостачання незалежно від конфігурації й режиму роботи нейтралі мережі.

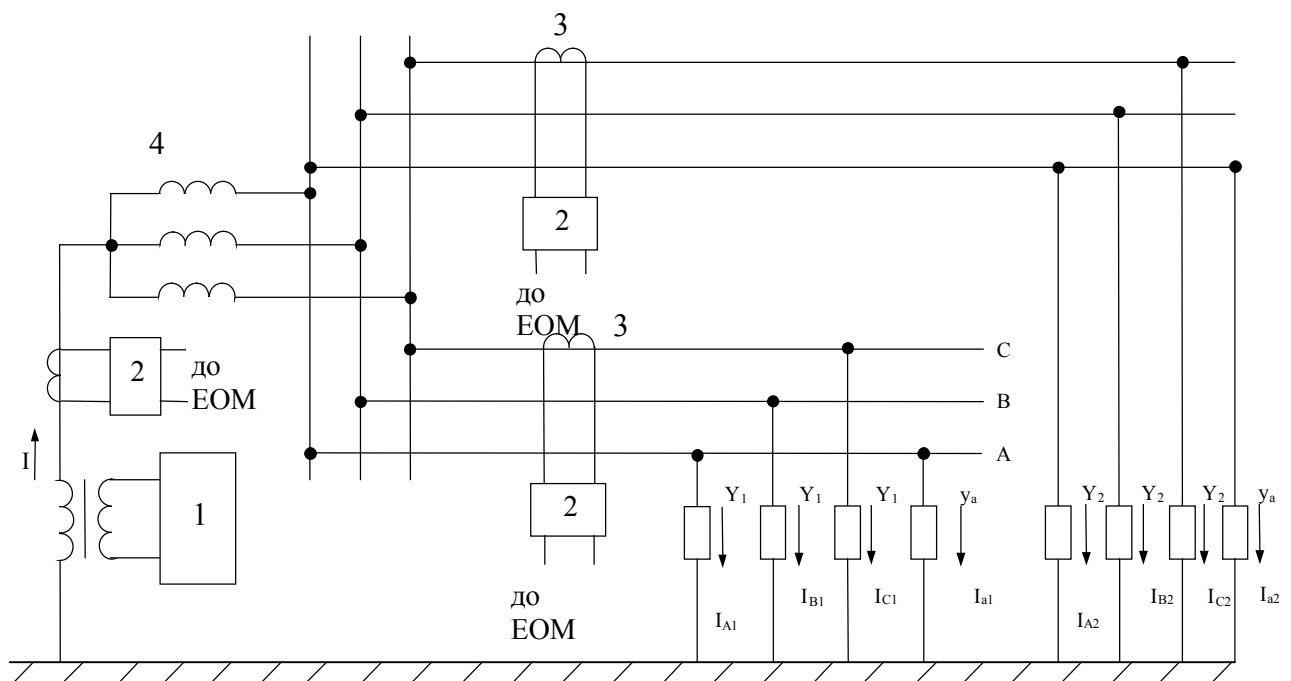


Рисунок 3.1 - Схема, що пояснює метод безперервного контролю параметрів ізоляції розподільної мережі.

1 - генератор синусоїдальних сигналів непромислової частоти (джерело оперативного струму); 2 - пристрій виділення оперативних сигналів заданих частот; 3 - трансформатор струму нульової послідовності; 4 - вторинна обмотка силового трансформатора.

У загальному випадку відповідно до рис.3.1 значення накладається на розподільну мережу оперативного синусоїдного струму визначається значеннями напруги оперативного джерела U і провідності відносно землі всієї розподільної мережі (або, при необхідності, контрольованого ділянки):

$$\underline{I} = \underline{U} \underline{Y}, \quad (3.1)$$

де $\underline{Y} = \frac{I}{R} + j\omega_{on} C$, або $\underline{Y} = \frac{I + j\omega_{on} CR}{R}$ комплексна провідність ізоляції мережі або ділянки для оперативної частоти ω_{on} ; R і C – відповідно значення активного опору і ємності відносно землі ізоляції трьох фаз контрольованої ділянки або мережі.

Комплексний опір оперативному струму визначиться за виразом:

$$\underline{z} = \frac{1}{\underline{Y}} = \frac{R}{1 + j\omega_{\ddot{r}} CR} = \frac{R(1 - j\omega_{\ddot{r}} CR)}{1 + \omega_{\ddot{r}}^2 C^2 R^2}, \quad (3.2)$$

а струм через наведений опір буде дорівнювати

$$\underline{I} = \frac{U}{R} (1 + j\omega_{\ddot{r}} CR), \quad (3.3)$$

або його діючі значення:

$$I = \frac{U}{R} \sqrt{1 + \omega_{\ddot{r}}^2 C^2 R^2}. \quad (3.4)$$

Якщо на електричну мережу накладаються одночасно два оперативних сигнали з різними частотами, тоді від кожного оперативного джерела будемо мати струми:

$$I_1 = \frac{U_1 \sqrt{1 + \omega_1^2 C^2 R^2}}{R}, \quad I_2 = \frac{U_2 \sqrt{1 + \omega_2^2 C^2 R^2}}{R}, \quad (3.5)$$

де I_1 , U_1 , ω_1 – струм, напруга й частота першого оперативного джерела; I_2 , U_2 , ω_2 – струм, напруга й частота від другого оперативного джерела.

Розв'язавши рівняння (5) відносно R одержимо:

$$R = \sqrt{\frac{U_1^2}{I_1^2 - U_1^2 \omega_1^2 C^2}}, \quad R = \sqrt{\frac{U_2^2}{I_2^2 - U_2^2 \omega_2^2 C^2}}. \quad (3.6)$$

Припустимо, що значення активного опору ізоляції контрольованої ділянки (мережі) не змінюється за час виміру, тобто $R = const$, дорівнюємо й праві частини виражень (6)

$$\frac{U_1^2}{I_1^2 - U_1^2 \omega_1^2 C^2} = \frac{U_2^2}{I_2^2 - U_2^2 \omega_2^2 C^2},$$

і вирішивши нове рівняння відносно C , одержимо вираження для сумарної ємності трьох фаз всієї мережі або відповідної контрольованої ділянки (приєднання) відносно землі:

$$C = \frac{1}{U_1 U_2} \sqrt{\frac{U_2^2 I_1^2 - U_1^2 I_2^2}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}}. \quad (3.7)$$

Аналогічним чином, припустивши, що значення ємності відносно землі контрольованої ділянки або мережі не змінюється ($C = const$), виконуючи необхідні перетворення, одержимо вираз для активного опору ізоляції відносно землі трьох фаз всієї мережі або відповідної контрольованої ділянки (приєднання):

$$R = U_1 U_2 \sqrt{\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{U_2^2 I_1^2 \omega_2^2 - U_1^2 I_2^2 \omega_1^2}}. \quad (3.8)$$

Метод одночасного накладення на мережу двох оперативних сигналів може також використовуватися для оперативного виміру значення індуктивності дугогасного реактора (компенсуючого пристрою) з метою автоматичного (або ручного) настроювання заданого режиму компенсації у мережі з компенсованою нейтраллю. Комплексний опір дугогасного реактора оперативному струму дорівнює:

$$\underline{z}_e = \frac{\omega L_e R_e}{R_e + j\omega L_e}, \quad (3.9)$$

де R_e й L_e – активного й індуктивна складового опору дугогасного реактора.

Тоді струм через дугогасний реактор при накладенні двох сигналів неромислових частот:

$$I_1 = \frac{U_1 \sqrt{R_e^2 + \omega_1^2 L_e^2}}{\omega_1 L_e R_e}, \quad I_2 = \frac{U_2 \sqrt{R_e^2 + \omega_2^2 L_e^2}}{\omega_2 L_e R_e}, \quad (3.10)$$

де I_1 , U_1 , ω_1 – струм, напруга й частота для першого оперативного сигналу;

I_2 , U_2 , ω_2 – струм, напруга й частота для другого сигналу.

Прийнявши до уваги, що значення активного опору дугогасного реактора є однаковим ($R_k = const$) для оперативних сигналів різних частот, та виконуючи перетворення одержимо вираз для розрахунку індуктивності дугогасного реактора на основі контрольованих параметрів оперативних сигналів, що накладаються на мережу:

$$L_e = \frac{U_1 U_2}{\omega_1 \omega_2} \sqrt{\frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{U_1^2 I_2^2 - U_2^2 I_1^2}}. \quad (3.11)$$

Індуктивна і ємнісна провідності:

$$B_L = \frac{1}{\omega L_e}, \quad B_C = 3\omega C. \quad (3.12)$$

3.2 Технічна реалізація методів автоматичного контролю параметрів ізоляції та дугогасного пристрою

Найбільш оптимальною схемою побудови практично будь-якої мікропроцесорної системи є схема з модульним принципом компонування, оскільки така модель передбачає можливість подальшого розширення й модернізації системи при найменших конструктивних змінах або навіть дозволяє обійтися колишньою конструкцією.

Мікропроцесорна система, що реалізує метод безперервного контролю під робочою напругою значень складові ізоляції в розподільних мереж напругою 6 - 35 кВ, складається з функціональних блоків:

- блок накладення на мережу оперативних струмів непромислової частоти;
- блок зняття й перетворення оперативних сигналів;
- блок сполучення й зовнішніх комутацій
- мікроЕОМ;
- блок керування й сигналізації.

Блок накладення на мережу оперативних струмів непромислової частоти може бути реалізований за допомогою спеціальних трансформаторів, включених у нейтраль мережі, або за допомогою дугогасних реакторів, до вторинних обмоток яких підключають генератори із заданими оперативними частотами.

Блок зняття й перетворення оперативних сигналів у найпростішому варіанті реалізуються за допомогою вимірювальних трансформаторів струму й трансформаторів напруги /2,3/. Функціональна схема системи безперервного виміру параметрів ізоляції відносно землі всієї розподільної мережі або її елементів без зняття робочої напруги наведена на рис.3.2.

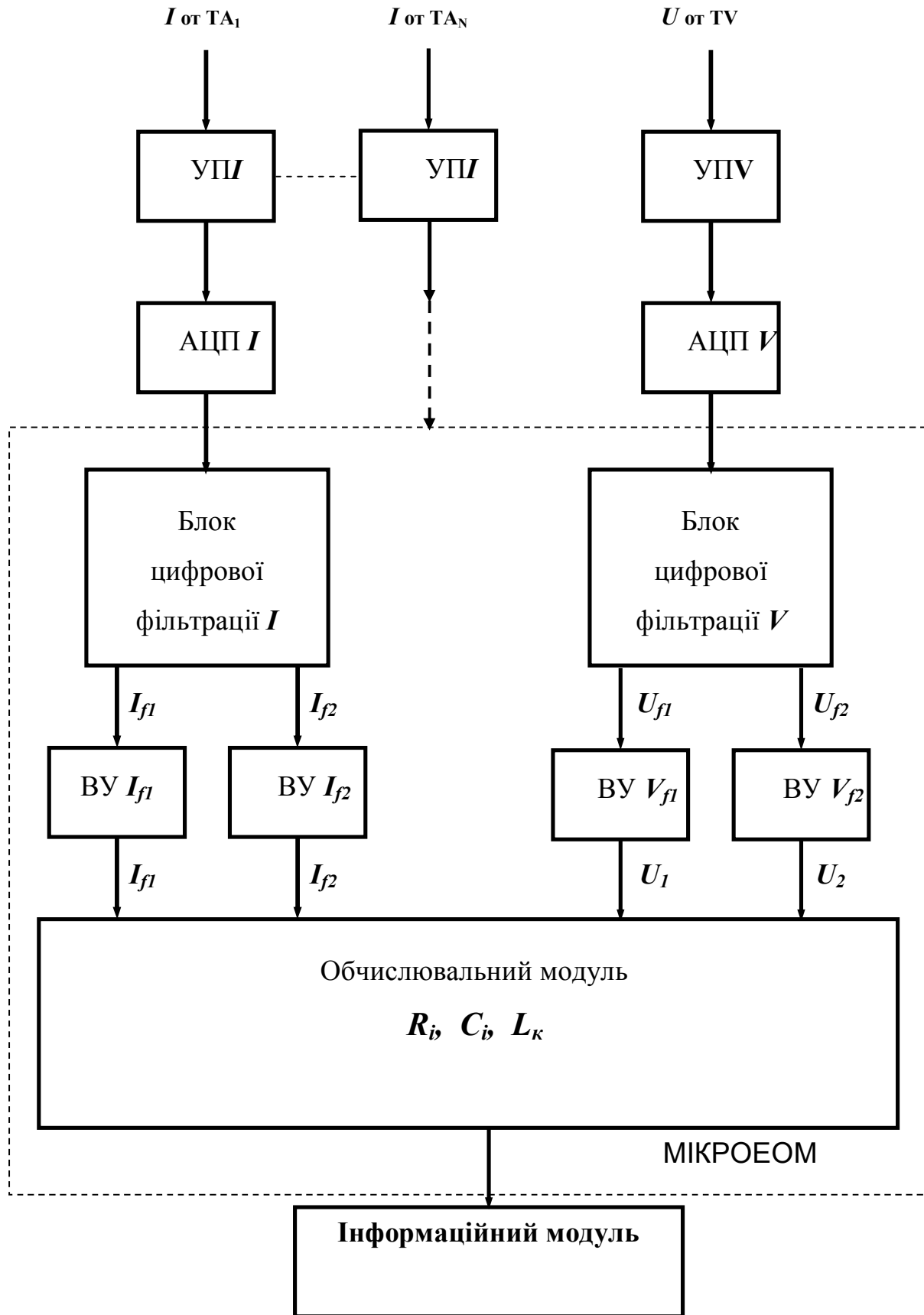


Рисунок 3.2 - Функціональна схема системи безперервного виміру параметрів ізоляції відносно землі.

Елемент перетворення сигналу складається із двох кіл, що розрізняються частотою виділюваного сигналу.

МікроЕОМ реалізує функції:

- збору, первинної обробки, зберігання інформації про стан контрольованих параметрів;
- програмно-командного й логічного керування;
- регулювання технологічних параметрів;
- відображення інформації;
- сполучення з ЕОМ верхнього рівня.

Блок керування й сигналізації виконує функції: візуального й звукового оповіщення, видачу керуючих сигналів на виконуючі пристрої.

До пристрою подаються два сигнали:

- струмовий, від трансформатора (фільтра) струму нульової послідовності;
- напруги, від фільтра напруги нульової послідовності, підключеного до шин розподільної підстанції.

Схема пристрою містить два практично однакових канали, у яких послідовно виконуються наступні операції: вхідні аналогові сигнали перетворюються в цифрові; відповідними блоками цифрових фільтрів виділяються складові сигналів оперативних частот; сигнали вимірюються і їхні значення вводяться в обчислювальний блок. Названі канали відрізняються вхідними блоками (согласуючими пристроями), що забезпечують сполучення аналого - цифрових перетворювачів і відповідних вимірювальних трансформаторів.

Обчислювальний блок на підставі одночасно обмірюваних і зафіксованих значень оперативних струмів і напруг за виразами (3.7), (3.8) і (3.11) з урахуванням коефіцієнтів трансформації вимірювальних трансформаторів струму й напруги робить обчислення:

- сумарної ємності трьох фаз всієї мережі або відповідної контрольованої ділянки (приєднання) відносно землі

$$R_i = \frac{U_1 U_2}{k_V k_{Ai}} \sqrt{\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{U_2^2 I_{1i}^2 \omega_2^2 - U_1^2 I_{2i}^2 \omega_1^2}};$$

- активного опору ізоляції відносно землі трьох фаз всієї мережі або відповідної контрольованої ділянки (приєднання)

$$C_i = \frac{k_V k_{Ai}}{U_1 U_2} \sqrt{\frac{U_2^2 I_{1i}^2 - U_1^2 I_{2i}^2}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}};$$

- індуктивності дугогасного реактора

$$L_k = \frac{U_1 U_2}{k_V k_{Aop} \omega_1 \omega_2} \sqrt{\frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{U_1^2 I_{2op}^2 - U_2^2 I_{opi}^2}}.$$

Інформаційний блок призначений для подання результатів обчислення в зручній для конкретних умов формі або формування повідомлення й відправлення його енергодиспетчерові й іншим зацікавленим службам.

Структура системи припускає один канал напруги та декілька (за кількістю контрольованих приєднань) каналів струму. Канал напруги, на вхід якого сигнал надходить із давача напруги TV (вимірювального трансформатора напруги) підключеного до шин розподільного пристрою, призначений для зняття, обробки й виміру значень оперативних напруг U_{f1} і U_{f2} і передачі їх в обчислювальний модуль для подальшого використання. Струмові канали, на входи яких сигнали надходять від відповідних давачів струму ТА_i (вимірювальних трансформаторів струму) установлених на відхідних приєднаннях, також призначені для зняття, обробки та виміру значень оперативних струмів I_{f1} і I_{f2} відповідних ділянок розподільної мережі й передачі їх в обчислювальний модуль.

Названі канали відрізняються вхідними блоками (пристроями узгодження) УП, що забезпечують сполучення аналого-цифрових перетворювачів і відповід-

них вимірювальних датчиків (трансформаторів). При обробці сигналів системою послідовно виконуються наступні операції: вхідні аналогові сигнали перетворюються в цифрові (АЦП); відповідними блоками цифрової фільтрації (призначені для виділення програмними методами із загального струмового сигналу сигналів оперативних частот) виділяються й розділяються сигнали складових оперативних частот; сигнали вимірюються (ВУ - кількісна оцінка сигналів відповідних частот) і їхнього значення вводяться в обчислювальний модуль системи.

У загальному випадку застосування мікро-ЕОМ або контролерів у системі контролю ізоляції дозволяє запропонований метод використовувати:

- для оперативної оцінки рівня активного опору ізоляції як всієї мережі в цілому, так і кожного із приєднань розподільної мережі незалежно від режиму роботи нейтралі;

- для оперативної оцінки рівня ємнісного опору ізоляції як всієї мережі в цілому, так і кожного із приєднань розподільної мережі незалежно від режиму роботи нейтралі;

- для виконання вибіркової сигналізації або захисту від замикань і витоків на землю в системах електропостачання незалежно від конфігурації й режиму роботи нейтралі мережі;

- для цілей автоматичного настроювання пристрою, що компенсує, у заданий режим (не тільки резонансний) стосовно ємності відносно землі розподільної мережі.

3.3 Методика непрямого визначення параметрів провідності ізоляції мережі відносно землі

Розрахунок значень провідності ізоляції мережі відносно землі в системі з ізольованою нейтраллю при не повній симетрії фазних напруг виробляється в наступній послідовності.

1. Фіксуються значення лінійної U_L та фазної $U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$ напруг досліджуваної мережі.

2. Вибираються й підготовляються додаткові провідності Y_{d1} й Y_{d2} , які необхідні для створення штучного зсуву нейтралі мережі.

3. Виміряються значення напруг $U_0; U_A; U_B; U_C$, що відповідають нормальному режиму роботи системи електропостачання.

4. Розраховуються кути нахилу векторів відповідних напруг до дійсної вісі (відлічені проти годинникової стрілки від осі до вектора) і значення відповідних функцій відповідно до таблиці 3.1.

5. Розраховуються активні й реактивні складові відповідних напруг для нормального режиму роботи системи електропостачання:

$$\underline{U}_0 = U_0 \cdot \cos \alpha + j U_0 \cdot \sin \alpha$$

$$\underline{U}_A = U_A \cdot \cos \beta + j U_A \cdot \sin \beta$$

$$\underline{U}_{\hat{A}} = U_{\hat{A}} \cdot \cos \gamma + j U_{\hat{A}} \cdot \sin \gamma$$

$$\underline{U}_{\tilde{N}} = U_{\tilde{N}} \cdot \cos \theta + j U_{\tilde{N}} \cdot \sin \theta$$

6. Розраховуються коефіцієнти системи рівнянь для нормального режиму роботи системи електропостачання:

$$a_{11} = \underline{U}_A - \underline{U}_0$$

$$a_{12} = \underline{U}_{\hat{A}} - \underline{U}_0$$

$$a_{13} = \underline{U}_{\tilde{N}} - \underline{U}_0$$

$$\hat{a}_1 = 0$$

7. Підключаємо до фази А додаткову провідність Y_{d1} .

8. Вимірюються значення напруг $U_0; U_A; U_B; U_C$, що відповідають режиму роботи системи електропостачання із включенням додаткової провідності Y_{d1} у фазу А.

Таблиця 3.1 - Розрахунок кутів нахилу векторів напруг до дійсної осі

Кут	Розрахункова формула	Значення		
		Кута	Cos	Sin
α	$\arccos \frac{U_{\phi}^2 + U_0^2 - U_A^2}{2U_{\phi}U_0}$ <p>якщо $U_B > U_C$</p> $360^\circ - \arccos \frac{U_{\phi}^2 + U_0^2 - U_A^2}{2U_{\phi}U_0}$ <p>якщо $U_B < U_C$</p>			
β	$330^\circ + \arccos \frac{U_A^2 + U_L^2 - U_C^2}{2U_AU_L}$ <p>якщо $U_B > U_C$</p> $\arccos \frac{U_A^2 + U_L^2 - U_C^2}{2U_AU_L}$ <p>якщо $U_B < U_C$</p>			
γ	$270^\circ - \arccos \frac{U_B^2 + U_L^2 - U_C^2}{2U_BU_L}$			
θ	$90^\circ + \arccos \frac{U_C^2 + U_L^2 - U_B^2}{2U_CU_L}$			

9. Виконують дії передбачені пп. 4-6 для режиму роботи системи електропостачання із включенням додаткової провідності Y_{d1} у фазу А, у результаті чого одержуємо нові коефіцієнти системи рівнянь /4/:

$$a_{21} = \underline{U}_{A1} - \underline{U}_{01}$$

$$a_{22} = \underline{U}_{\hat{A}1} - \underline{U}_{01}$$

$$a_{23} = \underline{U}_{\tilde{N}1} - \underline{U}_{01}$$

$$\hat{a}_2 = -Y_{d1}(\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{01}) = -Y_{d1} \cdot a_{21}$$

10. Підключаємо до фази А додаткову провідність Y_{d2} замість Y_{d1} .

11. Вимірюються значення напруг $U_0; U_A; U_B; U_C$, що відповідають режиму роботи системи електропостачання із включенням додаткової провідності Y_{d2} у фазу А.

12. Виконують дії передбачені пп. 4-6 для режиму роботи системи електропостачання із включенням додаткової провідності Y_{d2} у фазу А, у результаті чого одержуємо нові коефіцієнти системи рівнянь

$$\begin{aligned} a_{31} &= \underline{U}_{A2} - \underline{U}_{02} \\ a_{32} &= \underline{U}_{\hat{A}2} - \underline{U}_{02} \\ a_{33} &= \underline{U}_{\tilde{N}2} - \underline{U}_{02} \\ \hat{a}_3 &= -Y_{d2}(\underline{U}_{A2} - \underline{U}_{02}) = -Y_{d3} \cdot a_{31} \end{aligned}$$

Якщо третій вимір виконуємо при включенні опору (провідності Y_d) у фазу В, то коефіцієнт

$$\hat{a}_3 = -Y_d(\underline{U}_{\hat{A}2} - \underline{U}_{02}) = -Y_d \cdot a_{32}.$$

13. Складається система трьох рівнянь із трьома шуканими невідомими

$$\begin{cases} a_{11}Y_A + a_{12}Y_B + a_{13}Y_C = \epsilon_1 = 0 \\ a_{21}Y_A + a_{22}Y_B + a_{23}Y_C = \epsilon_2 \\ a_{31}Y_A + a_{32}Y_B + a_{33}Y_C = \epsilon_3 \end{cases}.$$

14. Відповідно до (2.21) вирішується система рівнянь і визначаються провідності ізоляції фаз мережі відносно землі:

$$\begin{aligned} Y_A &= G_A + jB_{\hat{A}} \\ Y_{\hat{A}} &= G_{\hat{A}} + jB_{\hat{A}}. \\ Y_{\tilde{N}} &= G_{\tilde{N}} + jB_{\tilde{N}} \end{aligned}$$

Практичне застосування представленої методики визначення параметрів провідності фазної ізоляції мережі відносно землі значно спрощується при використанні персонального комп'ютера. У цьому випадку в комп'ютер вводяться тільки вихідні дані $U_{Л}$, Y_{d1} і Y_{d2} , а також результати вимірів напруг $U_0; U_A; U_B; U_C$ у досліджуваній мережі.

3.4 Розробка алгоритмів для автоматизації процесу визначення параметрів ізоляції високовольтних мереж

На рисунках 4.1 - 4.3 наведені блок-схеми алгоритмів розрахунку значень складових провідностей ізоляції відносно землі окремих фаз трифазної мережі. У загальному випадку програма може має два напрямки: 1 - визначення параметрів ізоляції в симетричній трифазній системі; 2 - визначення параметрів ізоляції в несиметричній трифазній системі. Ступінь несиметрії мережі, при якій спрацьовується програма другого напрямку задається як обмежуюча умова.

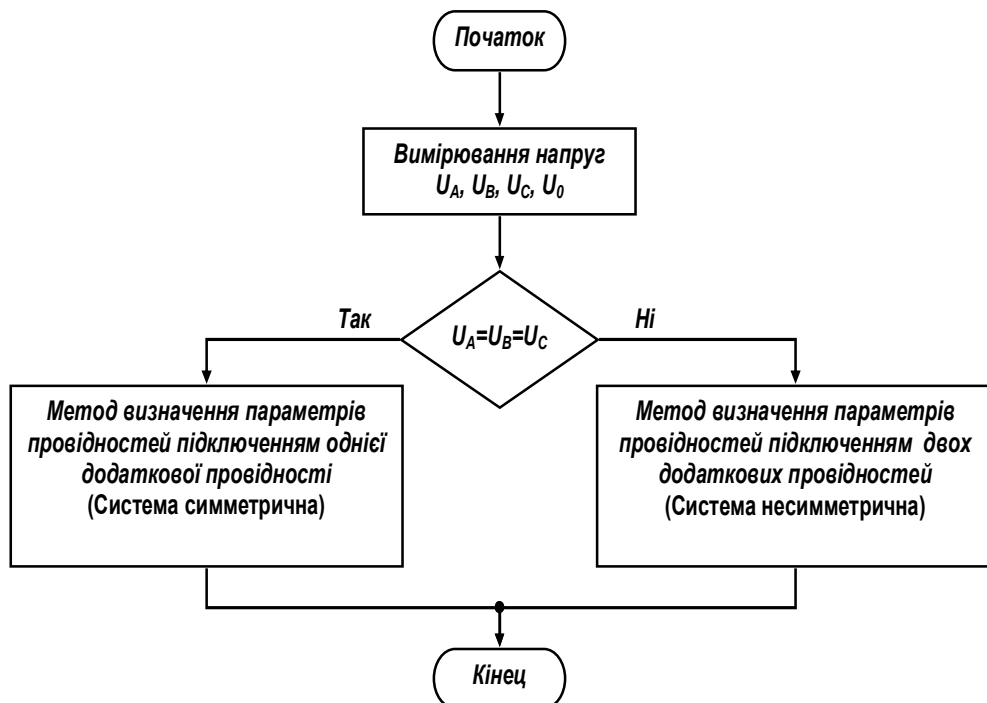


Рисунок 3.3 – Загальна блок-схема алгоритму визначення параметрів провідності ізоляції мережі

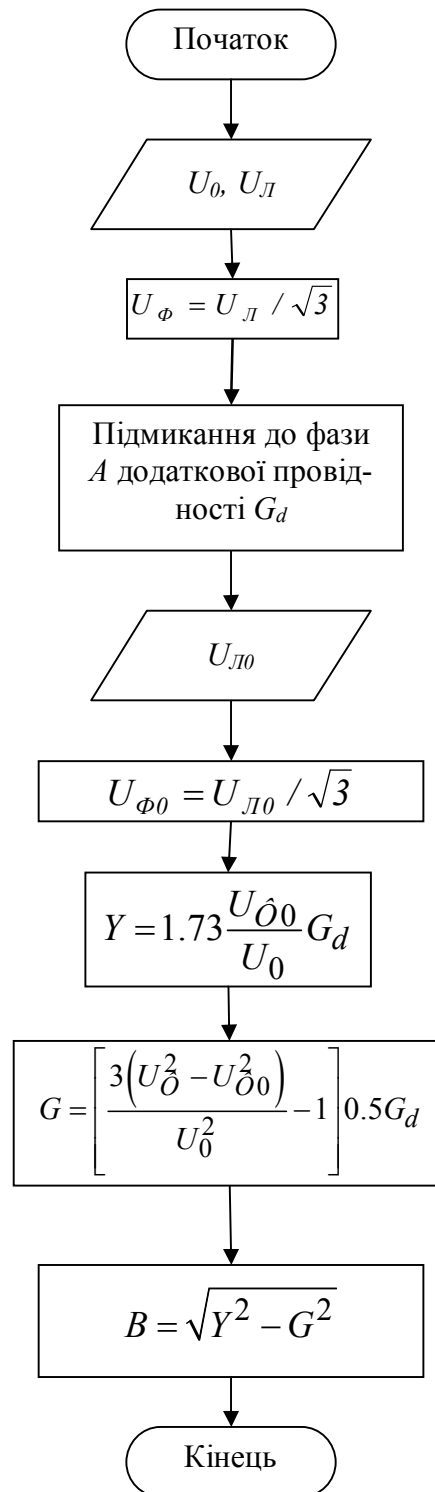


Рисунок 3.4 - Блок-схема алгоритму визначення параметрів провідності ізоляції мережі при підключенні однієї додаткової провідності

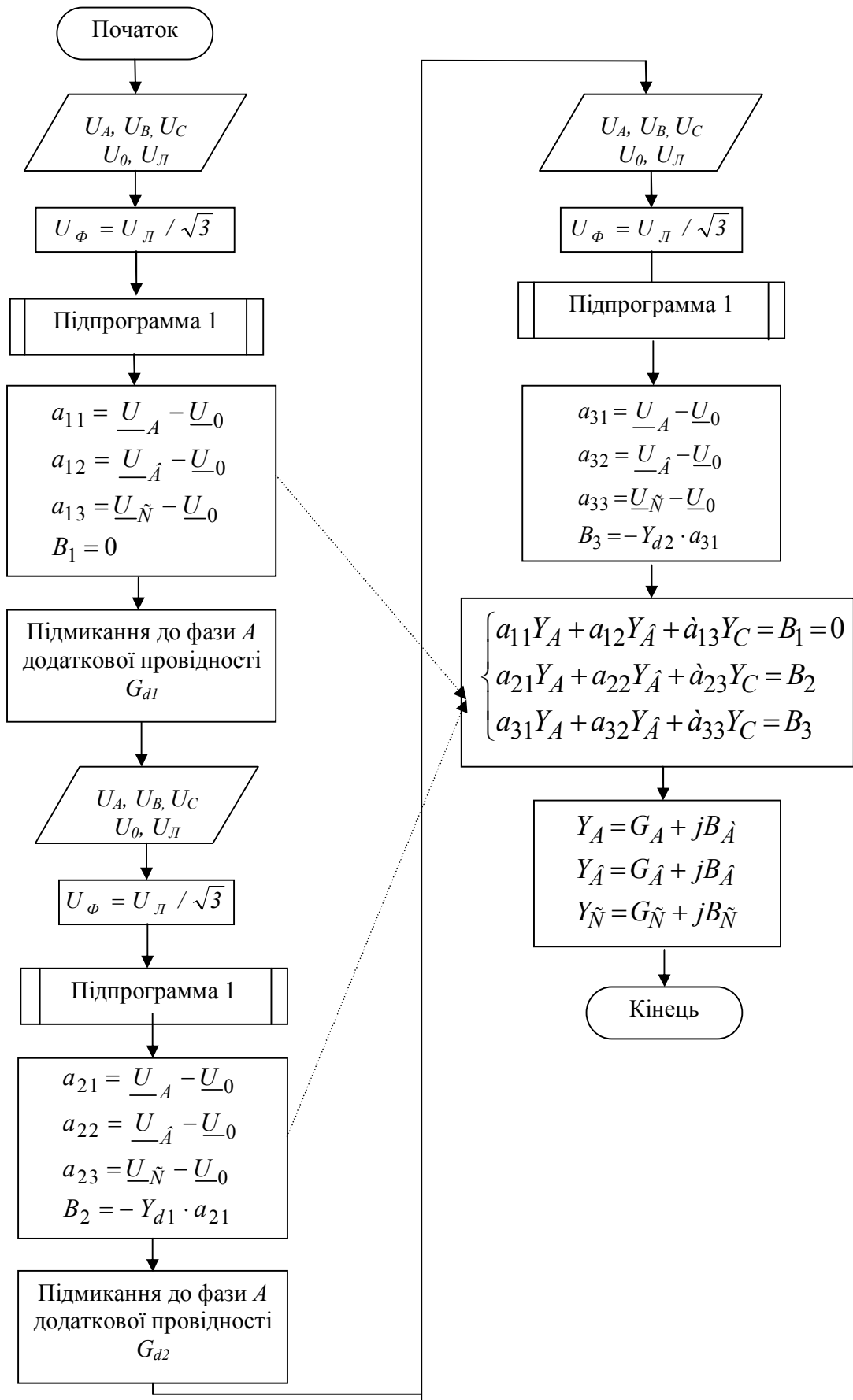


Рисунок 3.5 - Блок-схема алгоритму визначення параметрів провідності ізоляції мережі при підключенні двох додаткових провідностей

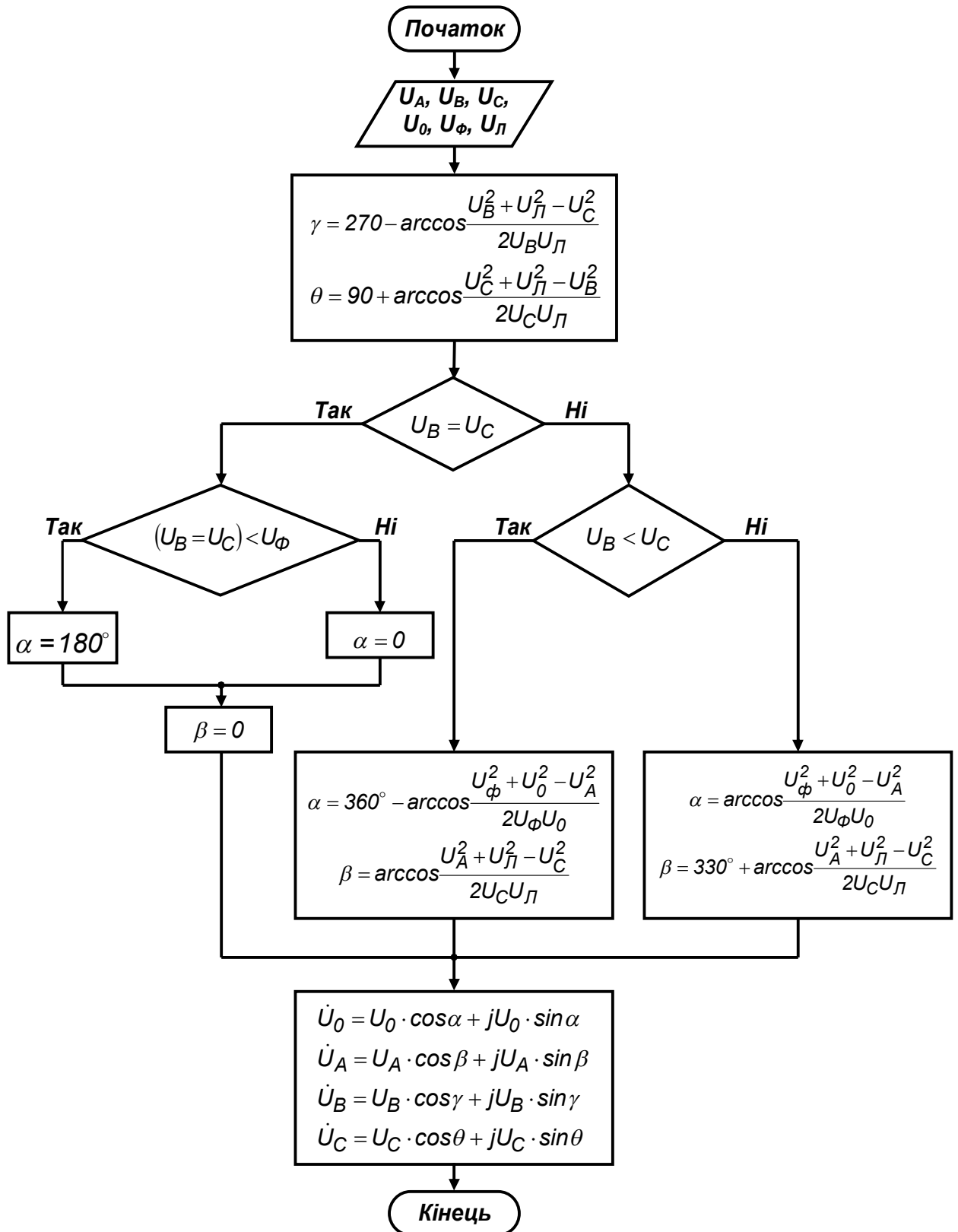


Рисунок 3.6 – Блок-схема алгоритму визначення кутів між векторами

3.5 Розробка алгоритмів для системи автоматичної компенсації складових струму однофазного замикання на землю

У ряді випадків, при проектуванні нових пристроїв, що компенсують, ставиться завдання загальної компенсації активної та ємнісної складових струму однофазного замикання на землю. Для рішення даної проблеми доцільно розробити ефективний алгоритм роботи, створивши універсальний метод компенсації в пристрої керування. Основна ідея методу полягає в тім, що за викладеним вище формулами визначаються параметри мережі відносно землі R й C , а також параметри дугогасного реактора L_{δ} й R_{δ} . На підставі цих даних визначається умова резонансу струмів і величина напруги компенсації. Рівень напруги нульової послідовності, використовується як для знаходження величини напруги компенсації, так і значення регульованої індуктивності, необхідної для дотримання умови струмового резонансу.

Блок-схема роботи керуючого органа при компенсації ємнісної й активної складових струму замикання представлена на рисунку 3.7.

Послідовність операцій виконується в такий спосіб. У нормальному режимі роботи мережі виміряються значення струму, частоти й напруги сигналів промислових частот. За допомогою отриманих значень обчислюються величини параметрів відносно землі мережі й параметри дугогасного реактора. На підставі отриманих значень визначаються ємнісний й «базовий» індуктивний струм мережі. Напруга нульової послідовності відсутня. При переході в режим однофазного замикання на землю виконується умова $U_0 > 0$.

Рівень напруги нульової послідовності фіксується, для визначення регульованої індуктивності L_{δ} й напруги компенсації \underline{U}_{δ} . Формується керуючий сигнал на виконавчий блок реактора, виходячи з виразу $I_{nod} = f(L_p)$ для настроювання в резонанс і через витримку часу, сигнал на джерело додаткової напруги.

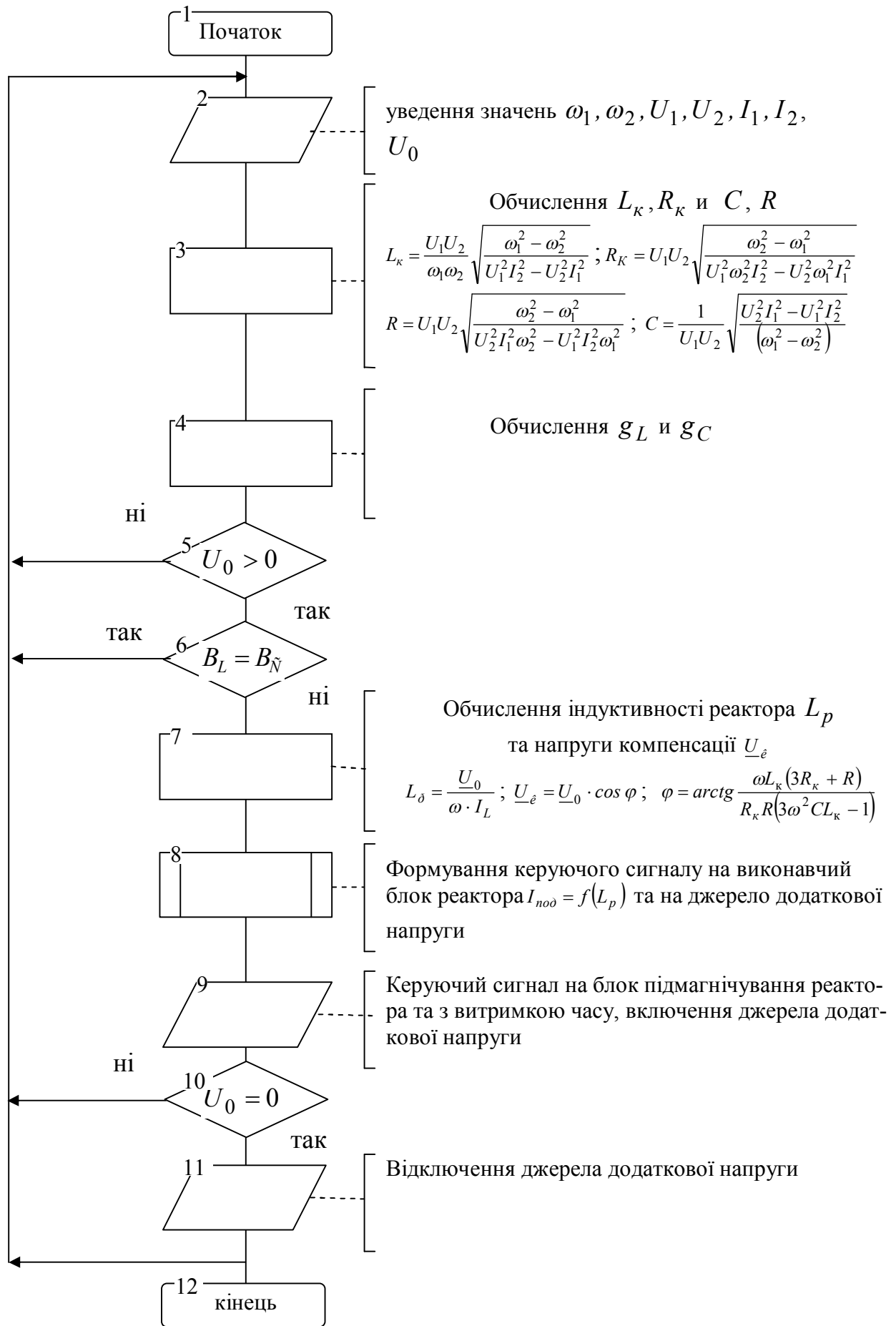


Рисунок 3.7 – Блок-схема роботи керуючого органа при компенсації ємнісної та активної складових струму замикання на землю

Коли ізоляція фази відновиться, необхідно зняти прикладену напругу. Тому після виконання умови $U_0 = 0$ формується сигнал на відключення джерела додаткової напруги.

Комплексний підхід при рішенні завдань компенсації струму однофазного замикання на землю доцільно застосовувати при проектуванні й розробці сучасних систем компенсації. Розглянутий алгоритм із виконаним синтезом різних методів, дозволяє розробити ефективну систему компенсації, що відповідає сучасному рівню розвитку технічних засобів.

3.6 Функціональна схема системи автоматичної компенсації складових струму однофазного замикання на землю

Розроблена система автоматичної компенсації складається з дугогасного реактора із включеним у сигнальну обмотку джерелом накладення сигналів непромислових частот і блоком підмагнічування (БП), включеного через обмотку підмагнічування (ОП); блоком керування (БК) включеного через давач струму (ДС) струмовим каналом й трансформатор (фільтр) напруги (ТН) каналом напруги; блоку вибору фази (БВФ), напруга на який надходить від трансформатора власних потреб (ТВП) і джерела додаткового струму, розташованого на шинах підстанції. Напруга компенсації надходить від однофазного трансформатора (ОТ), його величина регулюється за допомогою блоку регулювання напруги (БРН).

Система автоматичної компенсації наведена на рис 3.8.

Пропонована система автоматичної компенсації, функціонує за принципом порівняння сигналів непромислових частот. На лінію накладаються два сигнали, частота яких відрізняється від промислової.

Для оперативних сигналів, що накладаються на мережу, прийняті частоти 100 і 200 Гц.

Алгоритм роботи системи автоматичної компенсації активної і ємнісної складових представлений на рисунку 3.9

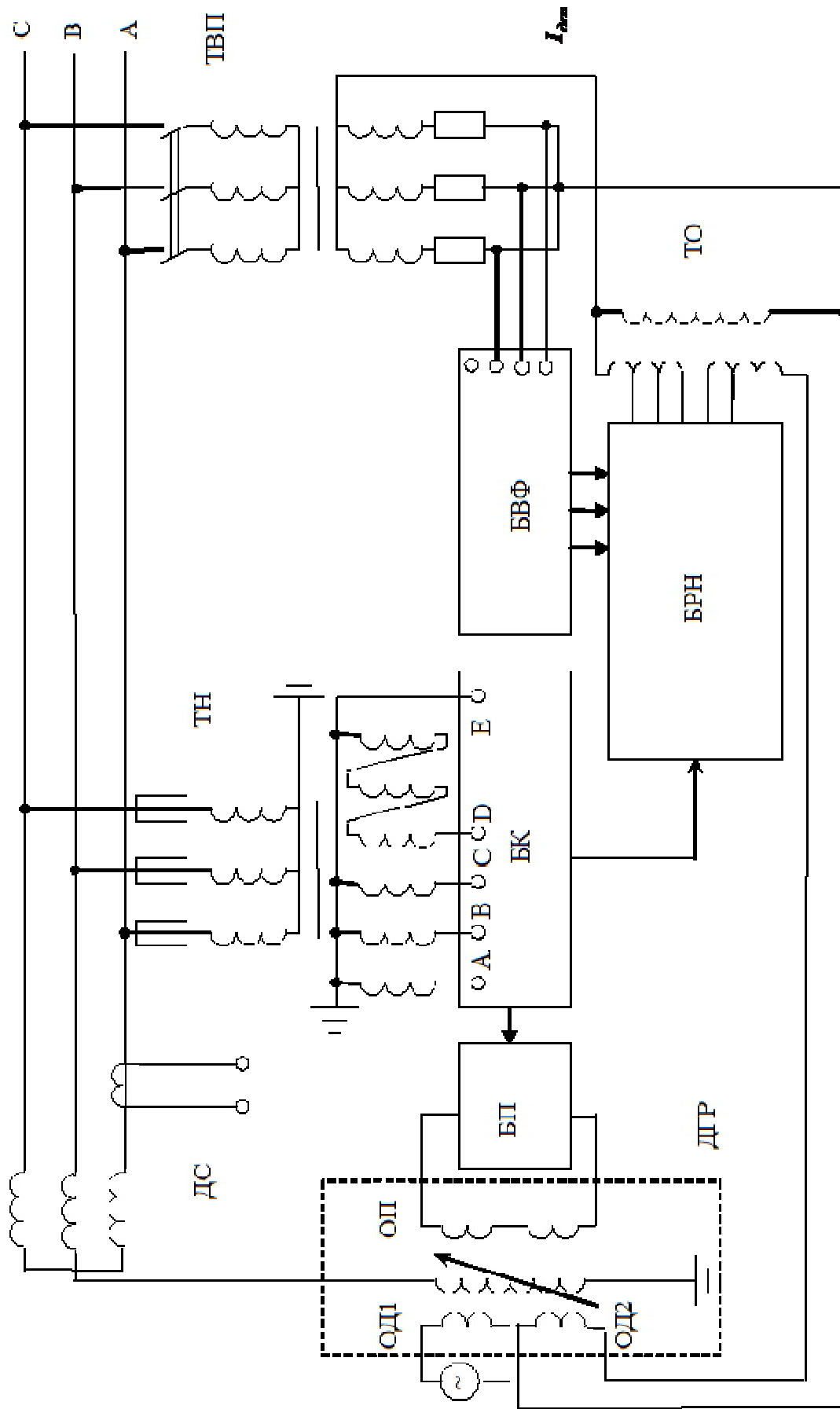


Рисунок 3.8 - Схема автоматичної системи компенсації при вмиканні у розподільну мережу

ДГР – дугогасний реактор; ОД1 и ОД2 – додаткові обмотки ДГР; ОП – обмотка підмагнічування ДГР; БП – блок підмагнічування; БК – блок керування; БВФ – блок вибору фази; БРН – блок регулювання напруги; ТО – однофазний трансформатор; ТВП – трансформатор власних потреб; ТН – трансформатор напруги; ДС – давач струму.

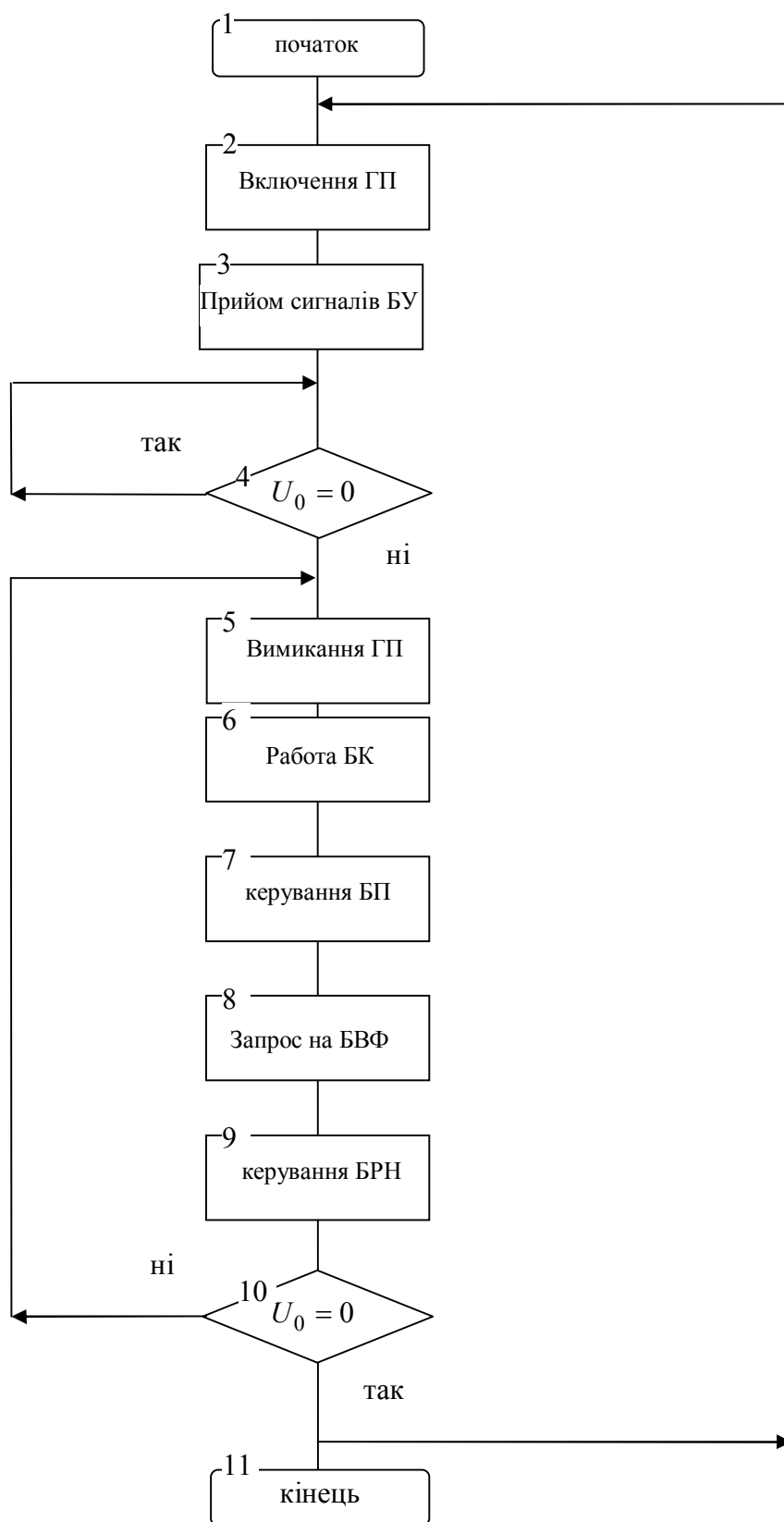


Рисунок 3.9 – Алгоритм роботи системи компенсації ємнісної й активної складових струм однофазного замикання на землю

Генератор непромислових частот включений через додаткову обмотку реактора ОД1, на іншу додаткову обмотку ОД2, приєднані виводи однофазного трансформатора. Блок регулювання напруги зібраний із застосуванням силових тиристорів для виконання перемикань відгалужень на однофазному трансформаторі. Щоб виключити можливість накладення додаткової напруги в ушкоджену фазу, у систему включений пристрій вибору фази. Як датчик струму можна використовувати трансформатор (фільтр) нульової послідовності (ТСНП), як датчик напруги - вимірювальний трансформатор (НАМИ).

Алгоритм роботи системи автоматичної компенсації ємнісної й активної складових струму однофазного замикання на землю працює в такий спосіб. У нормальному режимі мережі при відсутності однофазного замикання на землю від генератора непромислових частот, через додаткову обмотку реактора, у нейтраль мережі подається напруга двох частот (100 і 200 Гц).

Система перебуває в режимі очікування, тільки на блок керування надходять напруги й струми непромислових частот. Сигналом для переходу системи в режим однофазного замикання на землю є поява напруги нульової послідовності U_0 , на обмотці «розімкнутий трикутник» ТН. З появою U_0 , відключається генератор непромислових частот.

Орган керування робить задані операції й подає відповідні сигнали на блок підмагнічування реактора й блок регулювання напруги. Блок підмагнічування набудовує регульований реактор у резонанс із мережею, а блок регулювання напруги надсилає запит на блок вибору фази щоб виключити неправильне включення додаткової напруги, значення додаткової напруги регулюється спеціальним алгоритмом.

Регулювання прикладеної напруги здійснюється за допомогою однофазного трансформатора, оснащеного блоком регулювання напруги. Після ліквідації аварійного режиму й відновлення нормального стану ізоляції фази напруга нульової послідовності зникає, що є сигналом до зміни роботи пристрою. Керуючий орган знову посилає сигнал на включення генератора непромислових частот, система переходить у режим вимірів.

Перевагою керуючого органа на базі мікроЕОМ є – її програмування, тобто можливість реалізації різних алгоритмів взаємодії з «зовнішнім світом» без зміни апаратної частини системи. Отже, пристрій, спроектований на базі одного кристальної мікроЕОМ, може бути універсальним. Функціональна складність систем постійно зростає, а для того щоб підтримувати зв'язок з «зовнішнім світом» (збір даних і відображення результатів обчислень, передача даних і прийом команд керування, а також багато чого іншого) у випадку застосування однокристальних мікроЕОМ, потрібні були додаткові зовнішні пристрої, реалізовані на спеціальних мікросхемах. Тому інтеграція на одному кристалі разом із процесором і пам'яттю великої кількості стандартних пристроїв різного призначення втілювалася в ідею появи мікроконтролерів. На відміну від універсальних мікропроцесорів, призначених в основному для числової обробки даних, мікроконтролери мають розширений набір убудованих периферійних пристроїв. Це можуть бути додаткові блоки пам'яті типу RAM, ROM, або FLASH і периферійні пристрої різного призначення: універсальні таймери й таймери спеціального призначення; «сторожові» таймери; контролери зовнішніх інтерфейсів (USB- або CAN-Шини) і рідкокристалічних дисплеїв; монітор джерел живлення; аналогові й цифрові компаратори; аналого-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі тощо. Мікроконтролери містять всі периферійні пристрої, необхідні для створення закінчених убудованих систем керування/контролю й стандартні пристрої, які у випадку використання мікропроцесора в системі виконувалися б на базі додаткових зовнішніх стосовно мікропроцесора мікросхем. У мікроконтролерах перераховані або, принаймні, більша частина периферійних пристроїв виконані на одному кристалі із процесором (процесорним ядром), що надає системам на базі мікроконтролерів більшу гнучкість і універсальність.

Більшість сучасних мікроконтролерів відрізняється модульною організацією, що дає можливість на базі одного процесора ядра створювати велику кількість модифікацій у межах одного сімейства мікроконтролерів. Модифікації відрізняються обсягом і типом інтегрованої пам'яті, набором периферійних пристроїв, тактовою частотою, діапазоном робочих температур, розмірами корпусу й т.п. Мо-

дульний принцип побудови дозволяє виробникам мікроконтролерів прискорити проектування й випуск нових модифікацій, а користувачам - скоротити час на освоєння нових мікроконтролерів і знизити витрати на їхнє впровадження. Сучасні мікроконтролери для масового застосування повинні забезпечити простоту використання, гнучкі функціональні можливості й зручність програмування й налагодження. З огляду на перераховані достоїнства мікроконтролерів, що управляє орган системи компенсації виконується на його основі. Залежно від результату розрахунків і отриманого сигналу вже система керування режимом настроювання компенсації формує й відпрацьовує відповідні команди по зміні значення струму дугогасного реактора з ємнісним струмом мережі й здійснює компенсацію активної складової струму однофазного замикання на землю.

Функціональна схема блоку керування наведена на рисунку 3.10. Блок керування включає наступні функціональні блоки: гальванічної розв'язки й захисту від коротких замикань (БГР і ЗКЗ); вибірки й фільтрації сигналів (БВС); перетворення сигналів (БПС); виміру сигналів (БВС); обчислювальний блок (ОБ); порівняння сигналів (БСС); пам'яті обмірюваних значень (БВЗ); керування напругою (БКН); блокування (ББ); управління струму підмагнічування (БУС). Функціонування структурних блоків здійснюється в такий спосіб. Пристрій перебуває в режимі виміру, на блок керування надходять напруги й струми непромислових частот. У блоці перетворення сигналів вони погодяться за рівнем, необхідні частоти виділяються в блоці вибору сигналу й потім конвертуються в цифровий код. Їхнього значення вимірюється в блоці виміру, і попадають у блок обчислення, де визначаються значення параметрів відносно землі розподільної мережі, а також параметри нерегульованого (базового) реактора.

Визначаються очікувані струми в аварійному режимі. Отримані значення заносяться в блок пам'яті сигналів (уставка спрацьовування) для постійного порівняння з обмірюваними в блоці порівняння. У результаті зміни параметрів мережі (аварійний режим) нові значення попадають у блок порівняння сигналів із заданою шпаруватістю, де значення ємнісного струму рівняються зі значенням струму індуктивного й подаються на блок керування струмом підмагнічування.

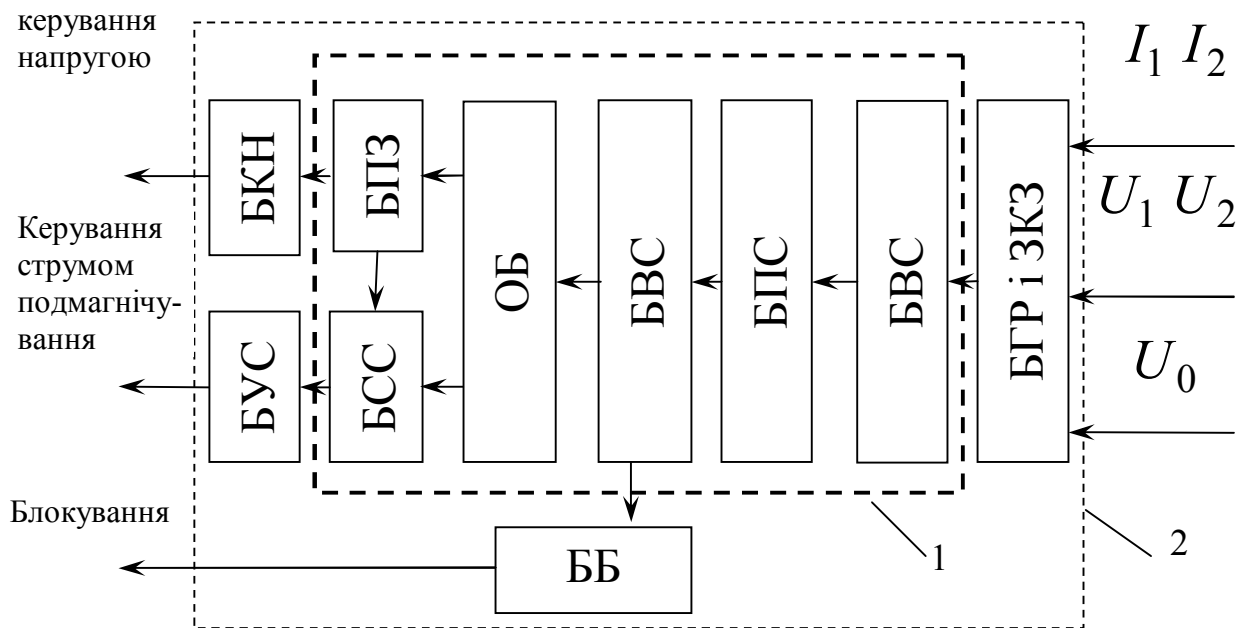


Рисунок 3.10 – Функціональна схема блока керування

З появою U_0 його значення фіксується, а на блок блокування подається сигнал на відключення джерела сигналів непромислових частот. За обмірюваним значенням U_0 визначається величина індуктивності, яку потрібно додати для одержання резонансу струмів. Дана індуктивність використовується для одержання відповідного струму підмагнічування дугогасного реактора, що перебуває по унікальній для кожного типу реактора залежності $I_{i\bar{a}} = f(L_{\delta})$. Також у блоці обчислення виконується визначення напруги компенсації \underline{U}_{ϵ} , що прикладається в протифазі до активної складової, що протікає, струму однофазного замикання на землю. Після відновлення ізоляції фази необхідно зняти прикладену напругу. Блок керування також постачений блоком гальванічної розв'язки й блоком захисту від коротких замикань при зовнішніх uszkodженнях у мережі.

Блок-схема алгоритму роботи блоку регулювання напруги зображена на рисунку 3.11.

Блок регулювання напруги одержує значення необхідної напруги компенсації й здійснює настроювання однофазного трансформатора, умовою точного настроювання є рівність напруги трансформатора $U_{\delta\delta}$ й додаткової напруги $U_{\bar{a}}$. Функціональні елементи, інтегровані на базі промислового шістнадцятирозрядно-

го мікроконтролера фірми MITSUBISHI ELECTRIC серії M30612M 4-XXXXP. Струми контрольованої лінії надходять на вхідні вимірювальні трансформатори, що здійснюють гальванічну розв'язку й узгодження рівнів сигналів.

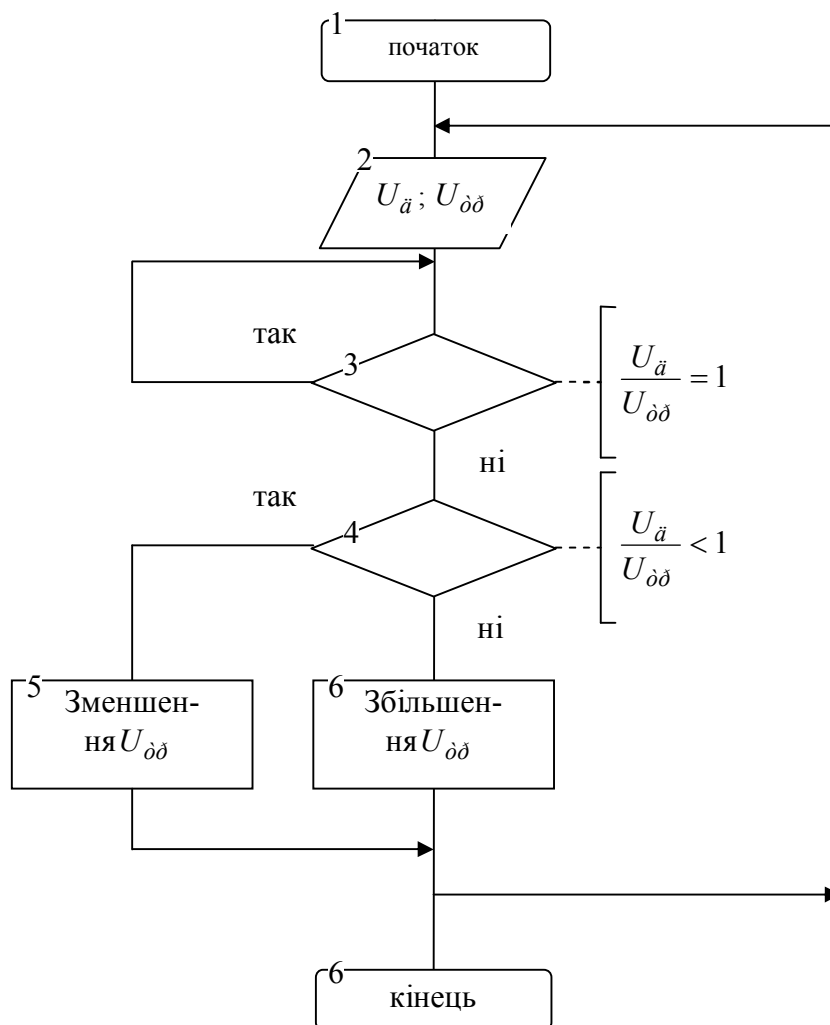


Рисунок 3.11 – Алгоритм роботи блоку регулювання напруги

Далі вони надходять на модуль МК, де попередньо фільтруються, а потім перетворюються аналого-цифровим перетворювачем АЦП. Цифровий сигнальний процесор робить цифрову обробку сигналів. Отримані дані передаються головному процесору в модуль МК.

Модуль головного процесора МК, крім властиво 32-розрядного мікропроцесора, містить 512 кБайт ПЗУ, 512 кБайт що зберігається ОЗП, сторожовий таймер, годинники-календар, схему резервного живлення пам'яті й календаря, енергонезалежну пам'ять уставок, інтерфейс шини розширення. Головний процесор обслуго-

вує два послідовних канали зв'язку - RS232C і «струмова петля». Там же розташований 14-розрядний АЦП із аналоговим мультиплексором і процесором цифрової обробки сигналу. Модуль індикації й клавіатури дозволяє опитувати стан кнопок і тумблерів керування, виводити інформацію на табло в буквено-цифровому виді, а також управляти підсвічуванням ЖК індикатора.

Перевагами цього елемента - високий рівень інтеграції (убудовані трохи АЦП і ЦАП) і звідси відносна дешевина, а також наявність великої кількості виводів, які дозволяють реалізувати багатофункційність пристрою.

Зовнішній вигляд мікроконтролера представлений на рисунку 3.12.

Група однокристальних мікроконтролерів М16С/61/62 виготовлена з використанням високопродуктивної КМОП-технології на основі ядра ЦПУ серії М16С/60 в 100-вивідному пластиковому корпусі QFP.

Пристрої М16С/61/62 мають складний і високоефективний набір команд, здатних виконуватися з високою швидкістю, при цьому адресний простір становить 1 Мб. Мікроконтролери М16С/61/62 мають вбудований помножувач і контролер ПДП, що робить їх незамінними в офісному, комунікаційному й промислового встаткуванні, де необхідна висока продуктивність.

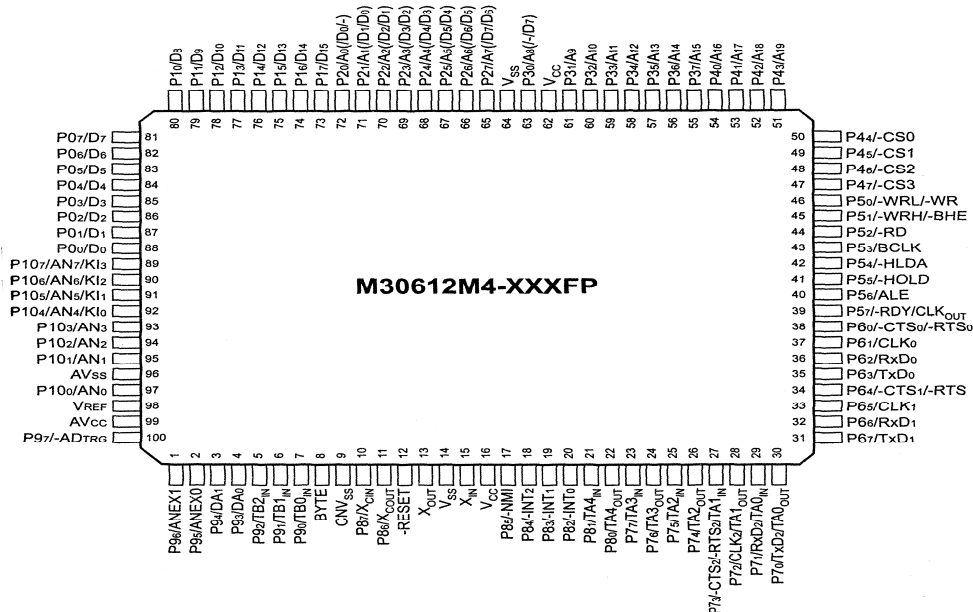


Рисунок 3.12 - Зовнішній вигляд мікроконтролера серії М 30612-XXXXP

Група М 16С/61/62 включає пристрої з різним обсягом і типом внутрішньої пам'яті (ОЗП, ПЗУ) і в різних корпусах.

Характеристики

Обсяг ОЗП... 410ДО

Мінірисьний час виконання команди.....100 нс, = 10 МГц

Напруга живлення0...5.5 У

Низьке енергоспоживання.....8 мВт

Переривання20 внутрішніх і 5 зовнішніх
джерел, 4 програмних джерела 7 рівнів, переривання
по натисканню клавіші

Універсальні 1 6-розрядні таймери.....5+3

Послідовні порти

Контролер ПДП 2 канали, 16 джерел запиту

АЦП..... 8 каналів x 10 розрядів

ЦАП2 канали x 8 розрядів

Схема підрахунку контрольної суми1

Сторожовий таймер..... 1

Програмувальні канали вводу-виводу.....87

Канал уведення 1

Розширення пам'яті до..... 1 Мб

Виходи вибору зовнішніх пристроїв4

Тактовий генератор..... 2 вбудованих тактових генератора
для зовнішніх кварцових або керамічних резонаторів, убудований резистор зворотного зв'язка.

Робота функціональних блоків

Мікроконтролери групи М16С/61 поєднують на одному кристалі наступні пристрої:

- ПЗП й ОЗП для зберігання програм і даних;
- ЦПУ для виконання арифметико-логічних операцій;
- периферійні пристрої;

- таймери;
- послідовні порти;
- ЦАП;
- АЦП;
- контролер ПДП;
- ланцюг підрахунку контрольної суми;
- звичайні порти вводу-виводу.

Користувач може вибрати один із трьох режимів процесора:

- однокристальний;
- мікропроцесорний;
- розширення пам'яті.

Залежно від режиму процесора розрізняються адресний простір, розподіл пам'яті й функції деяких виводів.

Однокристальний режим

В однокристальному режимі доступна тільки внутрішня пам'ять (убудоване ОЗП й убудоване ПЗВ). Порти P0 - P1 Про можуть бути використані як канали периферійних пристроїв або як звичайні канали уведення-виводу

Режим розширення пам'яті

У режимі розширення пам'яті крім внутрішньої пам'яті (РСН, убудоване ОЗП й убудоване ПЗУ) доступна також зовнішня. Деякі виводи портів при цьому працюють як зовнішня шина, число цих виводів залежить від установок шини й регістрів

Режим мікропроцесора

У режимі мікропроцесора процесору доступні РСН, убудоване ОЗП й зовнішня пам'ять, внутрішня пам'ять недоступна. Деякі виводи портів при цьому працюють як зовнішня шина, число цих виводів залежить від установок шини й регістрів.

Робота АЦП

АЦП побудований на основі регістра послідовного наближення з резисторно-матрицею й підсилювачем з ємнісним зв'язком. Канали P 100-7 і P 95-6 мо-

жуть бути настроєні для роботи в якості вхідних для АЦП, при цьому використувані як аналогові входи порти повинні бути настроєні на уведення.

Істотними відмітними ознаками нової системи керування дугогасними реакторами є:

- використання генератора змінних частот для пошуку резонансу реактора з ємністю мережі за допомогою сигналів непромислової частоти;
- підвищення швидкодії при автоматичному настроюванні реактора;
- безпосередній вимір значення ємності й активного опору відносно землі з наступним визначенням значення струму однофазного замикання на землю (з можливістю індикації для персоналу).

Компенсація активної складової струму однофазного замикання на землю на розглянутому пристрої дає наступні переваги:

- висока швидкість регулювання напруги додаткового джерела;
- висока динамічність системи при переході в режим компенсації;
- при компенсації активної складової створюється можливість керування процесом відновлення напруг в електричній мережі після гасіння заземлюючої дуги.

Система автоматичної компенсації описана вище, дає цілий ряд переваг у порівнянні з відомими аналогами:

- можливість роботи з реактором, точно настроєним у резонанс в аварійному режимі мережі;
- спрощення налагодження на об'єкті без проведення досвіду однофазного замикання.

3.7 Висновки

1. Теоретично обґрунтовано методи автоматичного контролю параметрів ізоляції та дугогасного пристрою. Розроблено спосіб селективного визначення параметрів ізоляції електричної мережі відносно землі та контролю режиму компенсації під робочою напругою.

2. Наведена методика непрямого контролю та блок-схеми роботи для автоматизації процесу визначення параметрів ізоляції.

3. Розроблена функціональна схема системи автоматичної компенсації складових струму однофазного замикання на землю, що забезпечує вихід на будь-який режим компенсації.

4 РОЗРОБКА НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ НА СТВОРЕННЯ ЧАСТОТНОГО ПУСКУ І ПЕРЕМИКАННЯ НА ЖИВЛЯЧУ МЕРЕЖУ НЕРЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОМПРЕСОРА

4.1 Патентні дослідження щодо існуючих алгоритмів керування приводом компресора зі зниженим споживанням електроенергії

Було виконано патентний пошук з метою знаходження аналогів в області алгоритмів керування приводом компресора зі зниженим споживанням електроенергії. В якості предмета пошуку (ОГД) була взята система регулювання продуктивності компресора. В якості джерел інформації було використано описи винаходів до авторських свідоцтв та патентів а також офіційний бюлетень «Промислова власність». Часові межі пошуку – з 1980 по 2007 рік. Аналізувалися як українські, так і російські джерела.

В результаті виконання пошуку були знайдені чотири об'єкти-аналоги з яких два були відібрані для подальшого аналізу, а саме:

1) Опис до авторського свідоцтва СРСР № 1359493, кл. F04D27/00 «Способ регулирования производительности компрессора и устройство для его осуществления». Даний спосіб регулювання продуктивності компресора з електроприводом шляхом зміни тиску та витрати газу на виході компресора, визначення за вимірними величинами потужності регулювання шляхом зміни положення дросельної засувки та потужності регулювання зміною частоти обертання ротора компресора, порівняння отриманих потужностей та зміни частоти обертання ротора компресора та положення дросельної засувки за результатами порівняння, який відрізняються тим, що з метою підвищення надійності роботи компресора в разі виникнення режимів, близьких до помпажних, додатково за вимірним значенням витрати газу на виході з компресора визначають максимально припустиме значення витрати газу порівнюють отримане та вимірне значення та в разі перевищення максимально припустимим вимірною значення витрати газу формують сигнал наявності помпажу. Економічна ефективність даного способу регулювання досягається завдяки постійному порівнянню втрат енергії при регулюванні дросе-

люванням на вході з втратами енергії, що виникають при регулюванні зміною частоти обертання електроприводу. Регулюючий пристрій автоматично виконує перемикання з одного режиму регулювання продуктивності на інший в момент, коли втрати енергії є рівними при регулюванні обома способами за необхідності подальшого зниження продуктивності з урахуванням втрат від тиристорного перетворювача. Дроселювання є ефективним за умови малої продуктивності компресора тому, що втрати енергії менші за додаткові втрати енергії, що виникають на перетворювачі частоти в разі регулювання продуктивності компресора за рахунок зміни частоти обертання електропривода.

2) Опис до авторського свідоцтва СРСР № 620670, кл. F04D27/00 «Устройство для регулирования производительности компрессора», яке відрізняється тим, що з метою підвищення якості регулювання воно додатково має в своєму складі три функціональних перетворювача. Перший функціональний перетворювач увімкнута між датчиком витрати повітря і регулятором витрати, другий – між регулятором витрати та приводом байпасного клапана, а третій – між регулятором витрати та суматором.

3) Опис до авторського свідоцтва СРСР № 973940, кл. F04D27/00 «Устройство для управления компрессором», яке відрізняється тим, що з метою підвищення стійкості роботи компресора. Пристрій додатково включає послідовно з'єднані датчик тиску газу на виході з компресора та блок диференціювання, причому виходи останнього підключені до регуляторів тиску та витрати.

4) Опис до авторського свідоцтва СРСР № 559044, кл. F04D27/00 «Устройство для регулирования производительности компрессорных станций» яке відрізняється тим, що з метою підвищення точності шляхом урахування стисненого повітря у користувачів та споживаної ними активної потужності.

4.2 Розробка способу пуску і перемикання асинхронного двигуна від частотного перетворювача на мережу

При проведенні відкритих гірничих робіт буріння вибухових свердловин є однією з основних, найбільш трудомістких і дорогих операцій. Найбільш енерго-

ємним процесом при бурінні є процес видалення бурового дріб'язку. Тому найбільш потужним приводним двигуном, що встановлений на буровому верстаті СБШ, – 250МН і буровому верстаті нового покоління СБШС – 250Н є привод компресорної установки, який здійснюється асинхронним нерегульованим двигуном потужністю 200 кВт, що складає більше половини потужності, споживаної усіма приводами бурового верстата [40]. Як відомо, найбільш складним режимом роботи як для компресора так і для приводного двигуна є пусковий режим, що характеризується значними динамічними перевантаженнями. У зв'язку з цим до теперішнього часу кількість пусків компресора бурового верстата до капітального ремонту була обмежена, внаслідок чого не було можливості відключати привод компресора під час технологічних перерв в процесі буріння з метою економії електроенергії і машинного часу. Другим фактором, що не дозволяв здійснювати обмеження холостого ходу приводу компресора була значна втрата напруги в живлячій мережі під час пуску компресора (до 20% в режимі пікових навантажень, за даними ЦГЗК), викликаного стрибком пускового струму. Метою досліджень, проведених в даній роботі, є знаходження способу пуску приводу компресора, що дозволяє обмежити на припустимому рівні напругу в живлячій мережі. Окрім цього необхідно обмежити динамічні навантаження на компресор для забезпечення можливості відключення компресора на час технологічних перерв.

До теперішнього часу привод компресора ВВ–32М1У2 бурового верстата СБШ–250МН здійснювався від нерегульованого асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при постійній витраті повітря, що подавалося на вибій. Потужність даного двигуна складає 200 кВт, при потужності решти електроприводів, використовуваних в процесі буріння, близько 150 кВт. Як видно з [41] в процесі пуску асинхронного двигуна величина струму, споживаного двигуном від мережі (пусковий струм), може перевищувати номінальне значення в 5..7 разів. Це, у свою чергу, приводить до збільшення втрат напруги в живлячій мережі, пропорційних квадрату струму.

За допомогою передатних функцій і побудованих за ними структурними схемами, використовуючи прикладний пакет Matlab і, зокрема, бібліотеку

Simulink були отримані часові залежності для перехідних процесів що характеризують:

1) Втрати напруги в елементах енергосистеми, від яких отримує живлення буровий верстат (трансформаторі ПСКТП 6/0,4; живлячій буровий верстат кабельній ЛЭП–0,4) при прямому пуску і при пуску від транзисторного перетворювача частоти при різному навантаженні з подальшим перемиканням живлення від перетворювача на мережу.

2) Взаємний вплив асинхронного двигуна та компресора в процесі розгону приводу до номінальної швидкості різними способами (прямий пуск і пуск при живленні від транзисторного перетворювача частоти), а також при різному часі переключення компресора (при розгоні з підключеним компресором і розгоні на холостому ході з подальшим підключенням компресора).

4.3 Розробка алгоритму керування для перемикання асинхронного двигуна від частотного перетворювача на мережу

Обґрунтування необхідності здійснення плавного пуску приводу компресора з живленням від транзисторного перетворювача частоти

Як видно з отриманих графічних залежностей, що характеризують процес прямого пуску приводу компресора на холостому ході і під навантаженням (з підключеним компресором) втрати напруги в живлячій мережі складають, відповідно 10% і 12% в номінальному режимі роботи, як видно на рис. 4.1.

У піковому режимі, внаслідок того, що від цієї мережі отримують живлення також інші потужні споживачі електроенергії, втрата напруги буде ще більша. Це дає можливість стверджувати, що необхідний спосіб пуску компресора, що дасть можливість уникнути перевищення припустимої втрати напруги та кидка пускового струму двигуна, який її спричинив. Окрім цього плавний пуск необхідний для уникнення ударних навантажень, що виникають в компресорі, підшипниках та синхронізуючих шестернях, які призводять до виходу їх з ладу. Він дає можли-

вість збільшити час безвідмовної роботи компресора та проводити відключення компресорної установки при нарощуванні бурового ставу або при переїзді на наступне місце буріння. Також плавний пуск дозволяє уникнути роботи компресора на холостому ході.

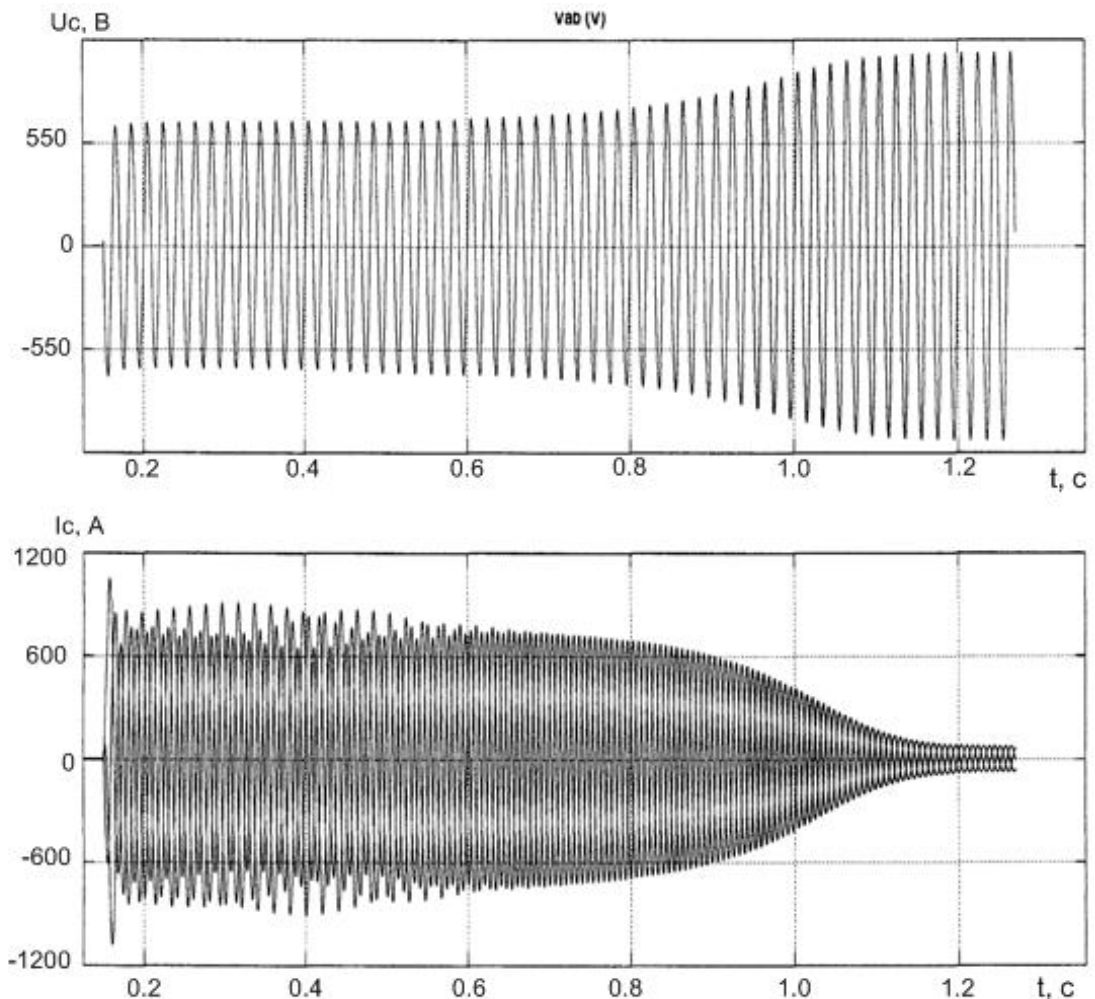


Рисунок 4.1 – Графік зміни напруги та струму мережі при прямому пуску привода компресора

До теперішнього часу відключення компресора не проводилося у зв'язку зі значними ударними механічними навантаженнями на компресорі в процесі розгону. Зважаючи на це, особливу увагу при виборі способу пуску приводу було приділено уникненню ударних навантажень в механічній частині компресора.

Порівняльний аналіз перехідних процесів при транзисторному пуску приводу компресора і при прямому пуску з компенсацією реактивної потужності

Для визначення параметрів компенсаторів реактивної потужності було визначено її споживання в номінальному режимі роботи приводу компресора на імітаційній моделі, виконаній в прикладному пакеті MATLAB. При чому для визначення втрат реактивної потужності безпосередньо в живлячому кабелі реактивна потужність вимірювалася як на затискачах двигуна, так і на затискачах вторинної обмотки трансформатора ПСКТП 6/0,4. Графіки споживання реактивної потужності дають можливість стверджувати, що без перекомпенсації можна зменшити споживання реактивної потужності з 70 квар до 1квар. Це, в свою чергу, дає можливість зменшити реактивний струм, споживаний двигуном з мережі, з 600 А до 400 А при роботі під навантаженням і з 550 А до 300 А при роботі на холостому ході.

При пуску компресора від перетворювача частоти і перемиканні живлення на мережу можна стверджувати, що застосування фільтро-компенсуючих пристроїв є недоцільним у зв'язку зі значними масо-габаритними показниками. Разом з тим застосування батарей статичних конденсаторів вирішує проблему високого вмісту вищих гармонік струму і напруги, що генеруються в мережу транзисторними перетворювачами, які постійно знаходяться в роботі. Під час переміщення верстата від перетворювачів отримують живлення приводи ходу гусениць, а при бурінні – привод подачі і привод обертання ставу. Планується один з цих перетворювачів використовувати для розгону приводу компресора до номінальної швидкості з подальшим перемиканням живлення останнього на живлячу мережу, а перетворювача – на привод подачі.

Таким чином, доходимо висновку, що застосування компенсації постійною складовою реактивної потужності доцільно тільки при прямому пуску і не зменшує динамічних навантажень на двигун і компресор.

Дослідження перехідних процесів при перемиканні живлення приводу від перетворювача на мережу

Особливий інтерес представляє транзисторний пуск приводу під навантаженням з подальшим перемиканням живлення на мережу, що призведе до висунення більш жорстких вимог до параметрів, що впливають на процес перемикання живлення двигуна. Це обумовлено збільшенням ковзання викликаного появою моменту опору, що в свою чергу призведе до скорочення часу, який дає можливість здійснити безударне перемикання. Аналіз графіків, що характеризують розгін приводу під навантаженням, показує, що часовий проміжок, який дає можливість здійснити безударне перемикання живлення від транзисторного перетворювача на мережу скоротився з 0,068 сек. до 0,04 сек. У зв'язку з цим можна зробити висновок, що для безударного перемикання необхідно здійснювати комутацію достатньо швидко. Тобто операції відключення живлення двигуна від транзисторного перетворювача і підключення до живлячої мережі повинні здійснюватися майже одночасно. Але при цьому перемикання необхідно здійснювати так, щоб це не призвело до короткого замикання в первинних або вторинних ланцюгах перетворювача частоти і його виходу з ладу. Зокрема згідно даних, наведених в літературі [45], час спрацьовування контакторів може сягати десятків мілісекунд, що є неприйнятним з точки зору забезпечення мінімального удару при перемиканні живлення. Якщо з будь-якої причини виконання умов, необхідних для безударного перемикання є неможливим, то необхідно скористатися рекомендаціями, наведеними в літературі [43] і перемикання двигуна на напругу живлячої мережі необхідно проводити із запізнюванням, достатнім для того, щоб залишковий від попереднього режиму потік знизився до незначної величини, але при цьому відхилення ковзання, а, отже, і швидкості обертання ротора знаходилося в межах $\pm 0,97$ від номінальних значень. Згідно даних джерела [43] проміжок часу, необхідний для виконання цих умов, складе одну – дві постійні часу холостого ходу двигуна. При перевищенні вищезгаданих меж відхилення швидкості вийде за рамки обмежень для безударного перемикання, що приведе до зростання ковзання і появи кидка зрівняльного струму.

Наразі існує методика, що дозволяє вибрати оптимальний за величиною удару момент перемикання живлення [45], що дозволяє визначити величину результуючої напруги та найбільш сприятливий час перемикання живлення. Проте істотним недоліком цієї методики є необхідність графічної побудови так званої діаграми перемикання щоразу, коли необхідно визначити результуючу напругу.

Як видно з літератури [42], гвинтові компресори достатньо чутливі до коливань моменту на валу приводного двигуна, тому при здійсненні перемикання необхідно також контролювати зміну обертального моменту. Це в свою чергу накладає додаткові обмеження на часовий проміжок, що дозволяє здійснити безударне перемикання живлення двигуна від транзисторного перетворювача на живлячу мережу.

Згідно даними джерела [43] найменш сприятливі умови перемикання живлення від транзисторного перетворювача на мережу матимуть місце у випадку, якщо стале потокозчеплення і початкове потокозчеплення у момент включення на напругу мережі мають протилежні напрями. Очевидно, що такий випадок матиме місце при фазовому зрушенні в 180^0 відносно найбільш сприятливого для перемикання фазового положення, при якому початкове і стале потокозчеплення знаходяться в протифазні (протинаявлені), що підтверджується графіками, наведеними на рисунках 4.2 та 4.3, які характеризують струм статора, а також струм і напругу в живлячому кабелі.

Стрибок струму статора складе $2,5I_n$, що достатньо істотно впливає не тільки на електричні перевантаження двигуна, але і динамічні перевантаження компресора. Величина кидка струму в цьому випадку складе величину, що може бути порівняна з пусковим струмом двигуна і дорівнює $2,5I_n$.

Для того, щоб остаточно упевнитися, що наведені в [43] умови є найбільш і найменш сприятливими для перемикання від перетворювача на живлячу мережу на математичній моделі були отримані графіки, що характеризують зміну напруги і струму в живлячій мережі, а також на затискачах двигуна при різному фазовому зрушенні між векторами напруги перетворювача частоти і живлячої мережі. Фазове зрушення здійснювалося послідовним збільшенням фазового зрушення на-

пруги перетворювача на 10^0 щодо його первинного положення з подальшою побудовою графіків струму і напруги в живлячій мережі, а також основних характеристик двигуна і компресора.

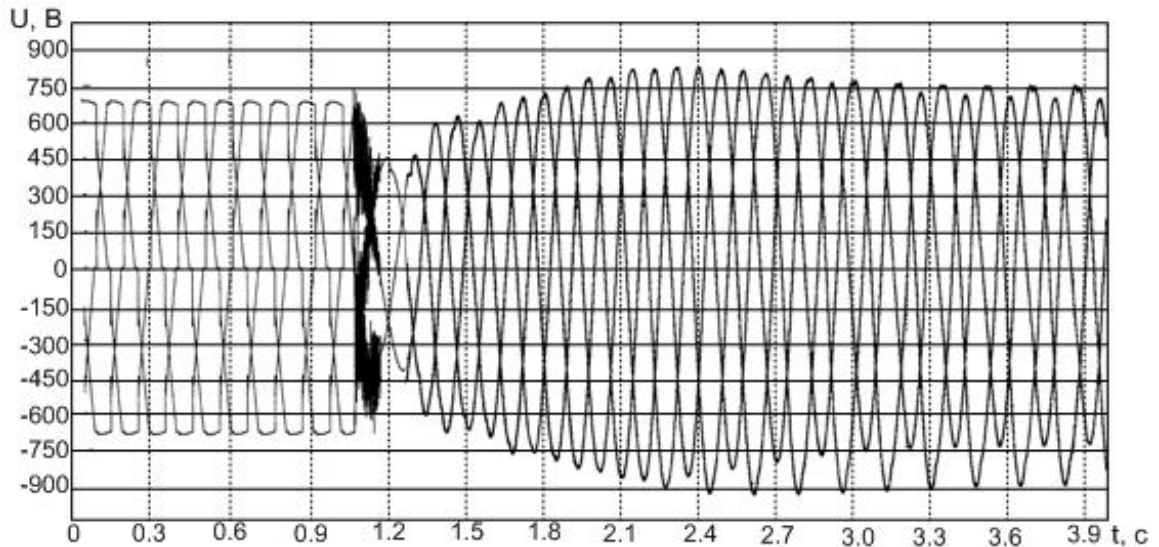


Рисунок 4.2 – Графік зміни напруги в мережі при перемиканні живлення при найменш сприятливому фазовому положенні напруги перетворювача та мережі

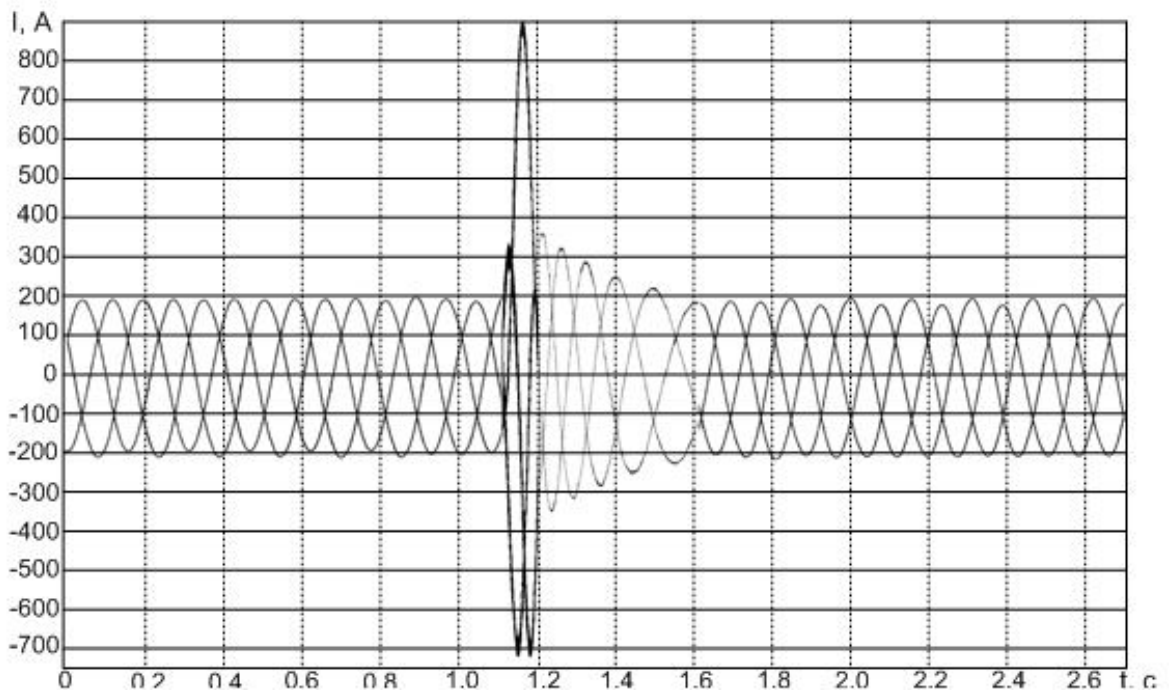


Рисунок 4.3 – Графік зміни струму в мережі при перемиканні живлення при найменш сприятливому фазовому положенні напруги перетворювача та мережі

Для найбільш сприятливих умов перемикання отримані графіки, зображені на рисунках 4.4 та 4.5.

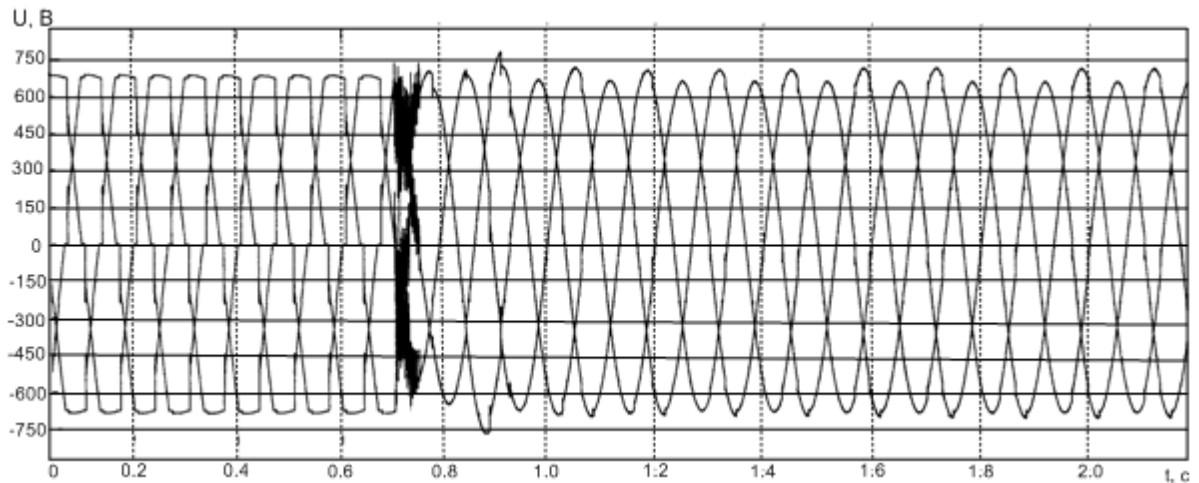


Рисунок 4.4 – Графік зміни напруги в мережі при перемиканні живлення при найбільш сприятливому фазовому положенні напруги перетворювача та мережі

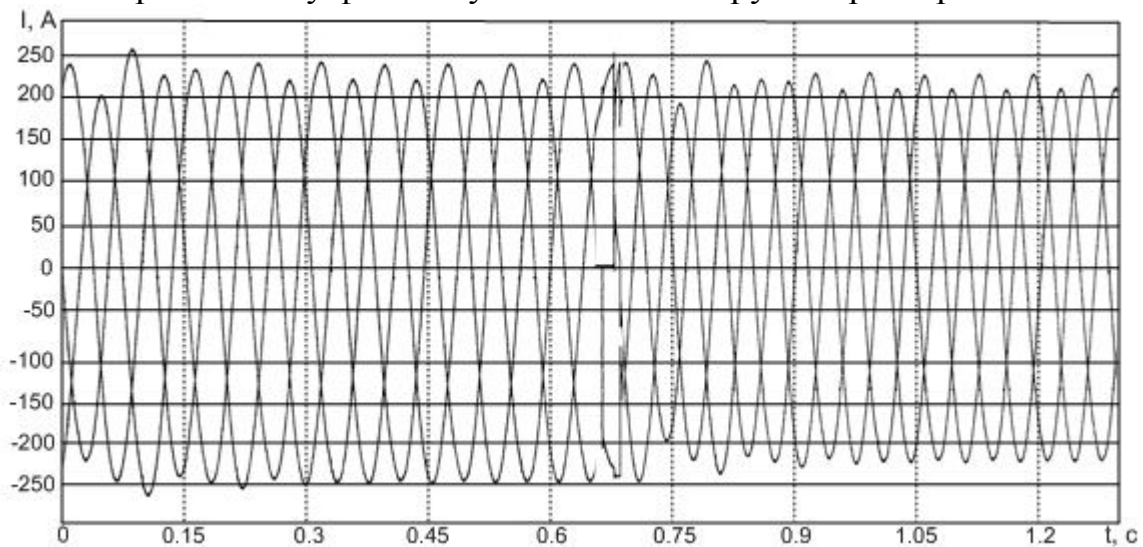


Рисунок 4.5 – Графік зміни струму в мережі при перемиканні живлення при найбільш сприятливому фазовому положенні напруги перетворювача та мережі

Як видно з отриманих в результаті моделювання графічних залежностей, найбільш і найменше фазові положення векторів напруги будуть при зрушенні фаз 0^0 і 180^0 між векторами напруги перетворювача і живлячої мережі. Окрім фазового зрушення також було встановлено ступінь впливу на перехідні процеси відхилення амплітуд напруги перетворювача і живлячої мережі і швидкості двигуна при розгоні без навантаження і під навантаженням. При відхиленні амплітуди напруги на перетворювачі частоти від амплітуди напруги в живлячій мережі у момент перемикавання на $\pm 5\%$ а потім на $\pm 10\%$ кидок струму склав $1,2I_n$ і $2I_n$, відповідно (фазове зрушення і відхилення швидкості від номінальної були відсутні).

При відхиленні швидкості в межах $\pm 5\%$ від номінальної виникає кидок струму при перемиканні від перетворювача на мережу, який дорівнює $1,1I_n$ при перемиканні на холостому ході і $1,5I_n$ при перемиканні під навантаженням, відповідно.

Виходячи з отриманих результатів можемо зробити висновок, що найбільш істотний вплив на величину кидка струму при перемиканні від перетворювача частоти на живлячу мережу має фазове положення напруги статора до і після моменту перемикання від перетворювача на мережу, при чому величина кидка за найменш сприятливих умов перемикання може складати порядку $2 I_n$, що є досить істотною величиною.

Як видно з результатів моделювання, відхилення амплітуди допустиме в межах $\pm 2.3\%$ на холостому ході і $\pm 1.2\%$ під навантаженням, за умови забезпечення відсутності кидка струму. Допустимі межі відхилення швидкості, при перемиканні живлення, складають $\pm 3.5\%$ від номінальної на холостому ході і $\pm 2.3\%$ під навантаженням, також за умови відсутності кидка струму. Тому робимо висновок, що виконання цих вимог є необхідною, але недостатньою умовою безударного перемикання живлення від транзисторного перетворювача на живлячу мережу.

За результатами аналізу отриманих графіків, остаточно умови безударного перемикання запишуться у вигляді системи рівнянь (4.1):

$$\begin{aligned} 0,97\omega_{ном} &\leq \omega_{об} \leq 1,03\omega_{ном} \\ 0,98U_c &\leq U_c \leq 1,02U_c \\ 0,99\varphi_c &\leq \varphi_n \leq 1,01\varphi_c \end{aligned} \quad , \quad (4.1)$$

де $\omega_{об}$, $\omega_{ном}$ – наявна та номінальна швидкість двигуна, відповідно;

U_c – напруга в мережі;

φ_n – фазове зрушення напруги перетворювача відносно напруги мережі.

Це дає можливість стверджувати, що умови перемикання для усунення кидка зрівняльного струму, наведені в [43], були експериментально підтвержені при імітаційному моделюванні перехідних процесів, що протікають в живлячій мережі і двигуні при перемиканні живлення приводу компресора від перетворювача на

живлячу мережу. Таким чином, можемо зробити висновок, що при імітаційному моделюванні підтвердилися гіпотези, висунуті в літературі [43].

Розгін приводу до номінальної швидкості і перемикання живлення на мережу на холостому ході з подальшим підключенням компресора, призводить до появи динамічних перевантажень в компресорі, що перевищують динамічні перевантаження при прямому пуску. В цьому випадку двигун обертається з постійними номінальними параметрами (швидкістю і моментом), системі компресор-двигун в процесі розгону компресора доводиться долати тільки момент опору компресора оскільки двигун вже працює на холостому ході. Такий спосіб хоч і не призводить до істотної втрати напруги в живлячій мережі, але істотно збільшує динамічні навантаження на компресор, що скорочує час його безвідмовної роботи. Такий спосіб розгону є не прийнятним з точки зору нормальної експлуатації компресора.

Тому, за умови технічної реалізації вимог, що дозволяють здійснення безударного перемикання живлення від транзисторного перетворювача на живлячу мережу, необхідно проводити розгін і перемикання приводу під навантаженням (з підключеним компресором).

При неможливості виконання умов безударного перемикання (4.1) на підставі оцінки економічної ефективності і прийнятності для підприємства терміну окупності необхідно прийняти рішення про економічну доцільність установки на буровому верстаті ще одного транзисторного перетворювача частоти, від якого безперервно отримуватиме живлення привод компресора. При ухваленні рішення про економічну доцільність необхідно виходити з оцінки даних по напрацюванню на відмову при різних способах пуску і умовах перемикання, що б була можливість врахувати зміну часу напрацювання на відмову.

Плавність пуску приводу компресора, яка дозволяє усунути динамічні перевантаження, що виникають при цьому, дасть можливість виключити роботу компресора в режимі холостого ходу, що має місце при заштибовці бурового інструменту і нарощуванні бурового ставу в процесі буріння внаслідок обмеженого числа пусків та ударних навантажень.

4.4 Розробка рекомендацій на створення нерегульованого приводу з частотним пуском і перемиканням на живлячу мережу асинхронного двигуна компресора

Також були проведені всебічні дослідження з метою знаходження найбільш сприятливих і найменш сприятливих умов перемикання живлення двигуна від перетворювача на живлячу мережу. При цьому, як вже указувалося раніше, були враховані і перевірені рекомендації, наведені в літературі [43,44]. Зокрема, згідно [43], для здійснення успішного перемикання живлення двигуна від перетворювача на живлячу мережу необхідне виконання ряду умов:

1) Перемикання здійснюється упродовж однієї електромагнітної сталої часу, але при відповідному контролі фазового положення. Це можливо якщо напруга, наведена в обмотці статора двигуна залишковим потоком (фактично при малому часі перемикання – напруга перетворювача), яка дорівнює за величиною амплітуди і співпадає по фазі з напругою мережі. Процес перемикання контролюється релейним елементом, що забезпечує контроль синхронізму.

2) В разі неможливості забезпечення умов, наведених вище, перемикання необхідно проводити із запізнюванням, достатнім для того, щоб залишковий від попереднього режиму потік знизився до незначної величини ($0,5\Phi_{ном}$), але при цьому вимкнений двигун не повинен надмірно понизити швидкість обертання. Зменшення швидкості обертання допустиме в межах $\pm 3\%$ від номінальної. За твердженням авторів, необхідний проміжок часу повинен бути рівний не менш одній – півтора сталим часу холостого ходу двигуна, але не повинен перевищувати цієї величини [43].

З наведеного вище виходить, що при перемиканні необхідно контролювати:

1) швидкість обертання ротора, яка на момент подачі напруги мережі повинна бути якомога ближче до номінальної;

2) повинні бути рівні між собою амплітуди напруги до і після моменту перемикання (напруги перетворювача і живлячої мережі);

3) перемикання необхідно проводити при належному фазовому положенні напруги у момент включення, тобто за відсутності фазового зрушення між ЕРС і новою напругою, що подається на статор.

Під час моделювання з використанням прикладного пакету MATLAB для контролю за зміною параметрів напруги і швидкості двигуна були використані блоки, що здійснюють перетворення Фур'є для визначення амплітуди і фази напруги перетворювача і напругу живлячої мережі, встановлену у фазі А на вході транзисторного перетворювача частоти і на затискачах статора двигуна. Величина швидкості поступає з датчика швидкості. Всі сигнали були зведені на осцилограф.

Згідно з отриманими графічними залежностями, наведеними на рисунках 4.6 та 4.7 робимо висновок, що фазове зрушення між напругою перетворювача і напругою живлячої мережі, за умови розгону двигуна на холостому ході до номінальної швидкості, складе 30° . При цьому у момент перемикання виникає «удар», обумовлений зрівняльними струмами [43].

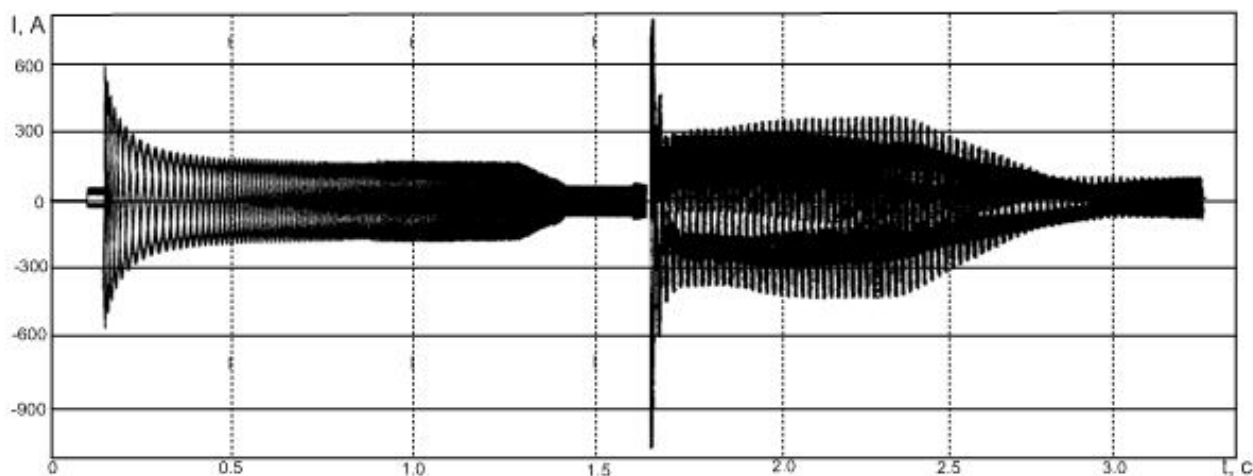


Рисунок 4.6 – Графік зміни струму статора при найменш сприятливому фазовому положенні напруги перетворювача та мережі

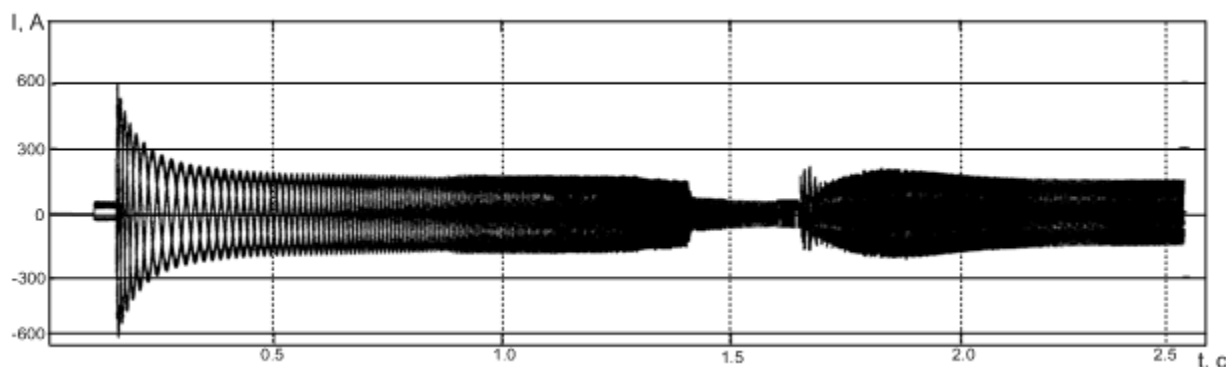


Рисунок 4.7 – Графік зміни струму статора при найбільш сприятливому фазовому положенні напруги перетворювача та мережі

Оскільки решта контрольованих параметрів на момент подачі напруги мережі суттєво не відрізнялися від номінальних, робимо висновок, що для безударного перемикавання необхідно ввести фазовий зсув напруги перетворювача відносно напруги живлячої мережі, який дорівнюватиме -30° . Після цього необхідно підібрати такий момент перемикавання, щоб при відхиленні швидкості в межах $\pm 3\%$ і відсутності відхилення амплітуди і фази напруги мережі і транзисторного перетворювача частоти або відхиленні порядку $\pm 1..2\%$ проводилося перемикавання живлення від перетворювача на мережу.

З отриманих графіків зміни амплітуди і фази напруги на виході перетворювача і в живлячій мережі, а так само швидкості обертання ротора і моменту на валу двигуна, видно, що умови сприятливі для перемикавання наступають при часі перемикавання $0,05\text{с}$. Очевидно, що при такому малому проміжку часу перемикавання необхідно здійснювати за допомогою швидкодіючих комутаційних апаратів. Тому необхідно починати комутаційні операції досягнувши нижньої часової межі, а можливо, і раніше з тим, щоб не перевищити верхню часову межу, коли умови безударної комутації будуть порушені.

Як видно з отриманих графіків після здійснення фазового зрушення, коли всі умови безударного перемикавання, наведені в [43] були виконані, зник кидок струму статора при перемиканні, що складав $2I_{\text{ном.дв}}$ при пуску на холостому ході і $2,5I_{\text{ном.дв}}$, відповідно, при пуску з підключеним компресором.

4.5 Аналіз компресора як об'єкта керування

Для одержання структурної схеми пневмотранспортної системи необхідно одержати математичну модель об'єкта. Відомо, що модель складного об'єкта, яким є пневмотранспортна система бурового верстата, являє собою систему нелінійних диференціальних рівнянь, що описують фізичні процеси, що відбуваються в пневмотранспортній системі. Згідно [47] існує два способи одержання диференціальних рівнянь об'єкта: спосіб застосування відомих законів і евристичний спосіб. Враховуючи, що є математичний опис фізичних процесів в окремих елементах пневмосистеми, для одержання структурної схеми будемо послідовно записувати диференціальні рівняння для кожного елемента пневмосистеми.

Розглянемо компресор. У загальному виді рівняння, що описує рух роторів, наведеному в [48], для гвинтового компресора враховуючи сталість моменту інерції роторів, буде мати вигляд:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - M_1 \text{sign}(\omega) - M_{\text{сж}}; \quad (4.2)$$

де J_{Σ} – сумарний момент інерції роторів компресора;

ω – швидкість обертання роторів, $\text{рад}/\text{с}$;

$M_{\text{дв}}$ – Момент, створюваний приводним двигуном, $\text{Н}/\text{м}$;

M_1 – Момент опору, обумовлений дією сил тертя, $\text{Н}/\text{м}$;

$M_{\text{сж}}$ – момент сил корисного опору (опору стиску), $\text{Н}/\text{м}$.

Далі необхідно визначити момент сил корисного опору і його зв'язок з тиском, створюваним компресором. Враховуючи, що розглянутий компресор є багатозаходовим, одночасно існує кілька порожнин стиску. Отже, для кожного з роторів силу, що діє на зуб, що розділяє дві сусідні порожнини нагнітання, можна записати як:

$$P_i = (p_{i+1} - p_i) \cdot S, \quad (4.3)$$

де p_i, p_{i+1} – тиск в i -й та $i + 1$ -й порожнинах, відповідно, кПа;

S – площа поверхні зуба ведучого і веденого роторів.

Будемо вважати сили, що діють на зуби роторів зосередженими, прикладеними до центру зуба відповідного ротора. Тоді момент, створюваний силою опору стиску, може бути визначений як:

$$M_{сж} = P_i \cdot R, \quad (4.4)$$

де R – відстань від центру відповідного ротора до середини зуба.

Процес стискання газу в порожнині буде політропним, тому, згідно [49], з рівняння політропи запишемо вираження для визначення тиску в кожній з порожнин стиску в довільний момент часу t :

$$P_2(t) = \left(\frac{V_1}{V_2(t)} \right)^n \cdot P_1, \quad (4.5)$$

де P_1 – тиск у порожнині в момент відсікання її від камери усмоктування;

V_1 – об'єм порожнини в момент її відсікання від камери усмоктування;

$V_2(t)$ – поточне значення об'єму порожнини стиску;

n – показник політропи.

Згідно з виразами для визначення зміни обсягу наведеним у джерелі [49] у загальному випадку можна записати:

$$V_2(t) = k \cdot \varphi(t), \quad (4.6)$$

де $\varphi(t)$ – поточне значення кута повороту ведучого ротора;

k – коефіцієнт, що характеризує відношення первинного об'єму порожнини до повного кута повороту роторів.

Згідно [49] коефіцієнт k визначиться за виразом (4.7):

$$k = \frac{(A_1 + A_2) \cdot L}{\alpha_1 + \theta_1}, \quad (4.7)$$

де A_1 , A_2 – площа торцевого перетину гвинтової западини ведучого й веденого роторів, відповідно;

L – довжина гвинтової частини роторів, м;

$\alpha_1 + \theta_1$ – повний кут повороту ведучого ротора, при яким обсяг простору між роторами буде дорівнювати нулю.

Таким чином, послідовно підставляючи вираз (4.7) у вираз (4.6), а потім (4.6) в (4.5) одержимо вираз, що характеризує залежність поточного значення тиску в кожній з порожнин від поточного кута повороту ведучого ротора, яке запишеться як:

$$P_2(t) = \left(\frac{V_1}{k \cdot \varphi(t)} \right)^n \cdot P_1 \quad (4.8)$$

Підставляючи вираз (4.8) у вираз (4.3) з урахуванням поточного кута повороту для кожної із суміжних порожнин одержуємо співвідношення для визначення поточного значення сили, що діє на зуб ротора, яка запишеться як:

$$P_i = \left(\left(\frac{V_1}{k \cdot \varphi_{i+1}(t)} - \frac{V_1}{k \cdot \varphi_i(t)} \right)^n \cdot P_1 \right) \cdot S \quad (4.9)$$

Підставляючи (4.9) в (4.4) одержимо залежність моменту корисного опору від кута повороту ведучого ротора:

$$M_{\text{сж}} = \left(\left(\frac{V_1}{k \cdot \phi_{i+1}(t)} - \frac{V_1}{k \cdot \phi_i(t)} \right)^n \cdot P_1 \right) \cdot S \cdot R \quad (4.10)$$

Підставляючи вираз (4.10) у рівняння (4.2) одержимо рівняння, що зв'язує тиск у компресорі з кутом повороту ведучого ротора й швидкістю обертання вала компресора.

Теоретична витрата повітря, створювана гвинтовим компресором, згідно [49], [50] складе:

$$V_0 = (A_1 + A_2) L z_1 n_1, \quad (4.11)$$

де A_1 , A_2 – площа торцевого перетину гвинтової западини ведучого й веденого роторів, відповідно;

L – довжина гвинтової частини роторів, м;

z_1 – число зубів ведучого ротора;

n_1 – число обертів ведучого ротора, об/хв.

Беручи до уваги, що для реалізації оптимального енергоспоживання компресорної установки передбачене регулювання продуктивності зміною швидкості обертання роторів, фактична продуктивність буде визначатися з урахуванням коефіцієнта подачі:

$$V_\phi = V_m \cdot \lambda \quad (4.12)$$

Далі розглянемо масловіддільник, у який надходить стиснуте компресором повітря. Масловіддільник являє собою резервуар (ресивер) у якому встановлюється тиск, пропорційний різниці витрат на його вході й виході.

Рівняння, що описує взаємозв'язок основних параметрів ресивера, наведене в [51], має вигляд:

$$V \frac{d\gamma}{dt} = G_1(t) - G_2(t), \quad (4.13)$$

де γ – питома вага газу в ресивері;

G_1 – масова витрата повітря на вході в ресивер;

G_2 – витрата повітря на виході з ресивера.

В ресивері зміна температури повітря несуттєва, тому згідно [51] рівняння буде мати вигляд:

$$\frac{V}{RT} \frac{dp}{dt} = G_1(t) - G_2(t), \quad (4.14)$$

де R – постійна Клапейрона;

T – абсолютна температура повітря в ресивері.

Перетворивши останнє рівняння відносно $\frac{dp}{dt}$, одержимо вираз, що характеризує зміну тиску в ресивері в функції часу:

$$P(t) = \frac{RT}{V} \int (G_1(t) - G_2(t)) dt \quad (4.15)$$

Наступним елементом пневмотранспортної системи є повітропровід і буровий постав. Для одержання передатних функцій повітропроводу й бурового поставу були використані рівняння, що описують перехідні процеси в трубопроводі.

Для одержання розрахункових залежностей використовуються рівняння руху одномірного потоку ідеального газу, а також рівняння нерозривності й збереження енергії потоку газу.

$$\rho \frac{du}{dt} + \rho u \frac{du}{dx} + \frac{dp}{dx} = -\lambda \frac{\rho u^2}{2d}, \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial \rho(e + u^2/2)}{\partial t} + \frac{\partial \rho u(e + p/\rho + u^2/2)}{\partial x} = 0, \quad (4.18)$$

де ρ – щільність газу; u – швидкість потоку газу; t , x – поточні координати часу й переміщення газу; p – тиск газу; λ – коефіцієнт, що враховує втрати на тертя при русі газу в трубопроводі, обґрунтований для різних чисел Рейнольдса; якщо $Re \leq 2320$, то $\lambda = [0,566/\lg(Re/7)]^2$, якщо $Re > 2320$, то $\lambda = 0,1(\Delta/d + 100/Re)^{0,25}$, де $Re = ud/\nu$; d – гідравлічний діаметр, $\nu = [1,712 + 5,8 \cdot 10^{-3}(T - 273)]10^5 \rho$ – кінематична в'язкість газу; T – температура газу, ДО; Δ , d – шорсткість стінки й діаметр трубопроводу, $e = \frac{p}{[(k-1)\rho]}$, де k – показник адіабати. Для врахування ударних хвиль вихідна система рівнянь (4.16), (4.17), (4.18) повинна бути представлена в інтегральній формі запису:

$$\oint (\rho u) dt - \rho dx = 0 \quad (4.19)$$

$$\oint (\rho u^2 + p) dt - \rho u dx = -\lambda \frac{\rho u^2}{2d} \frac{x^* t^*}{2d} \quad (4.20)$$

$$\oint \rho u \left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) dt - \rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) dx = 0 \quad (4.21)$$

де x^* – ділянка по довжині трубопроводу; t^* – інтервал часу. Рівняння (4.19)–(4.21) описують закони збереження маси, імпульсу й енергії потоку газу і є основними рівняннями гідрогазодинаміки.

На підставі рівнянь (4.10), (4.15) та (4.19) – (4.21) пневмотранспортна система бурового верстата може бути представлена структурною схемою на рисунках 4.8 – 4.10.

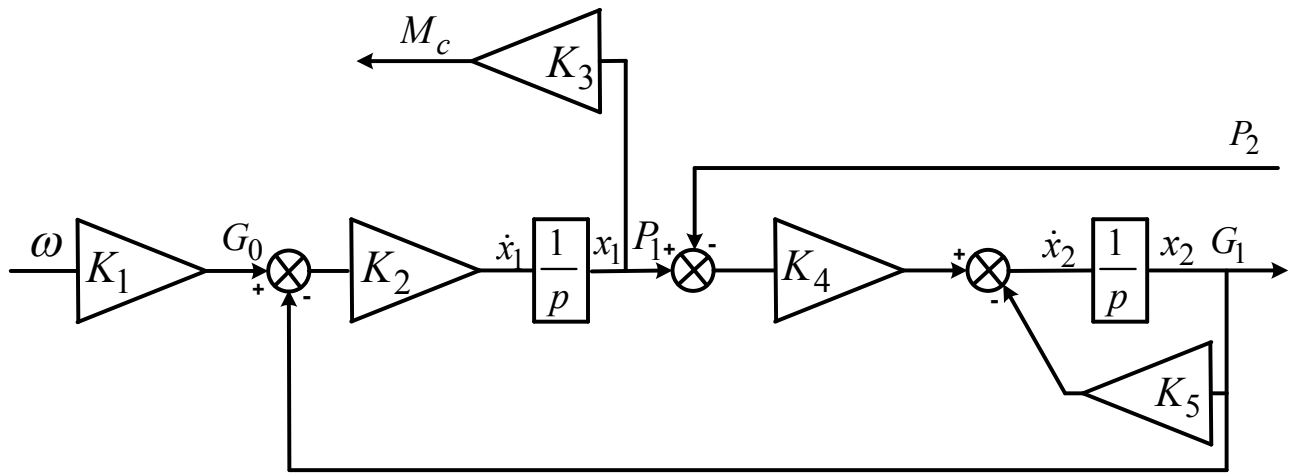


Рисунок 4.8 – Структурна схема компресора та ресивера

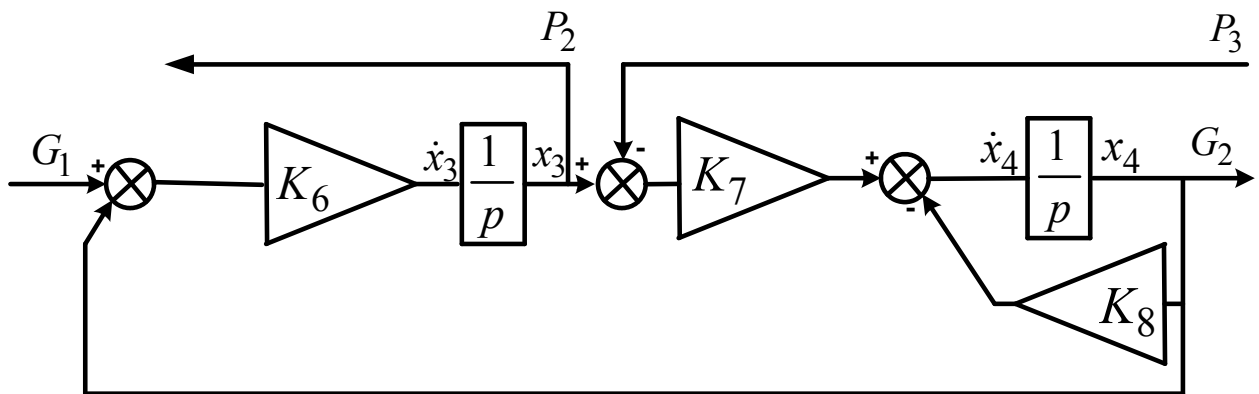


Рисунок 4.9 – Структурна схема повітропроводу та бурових штанг

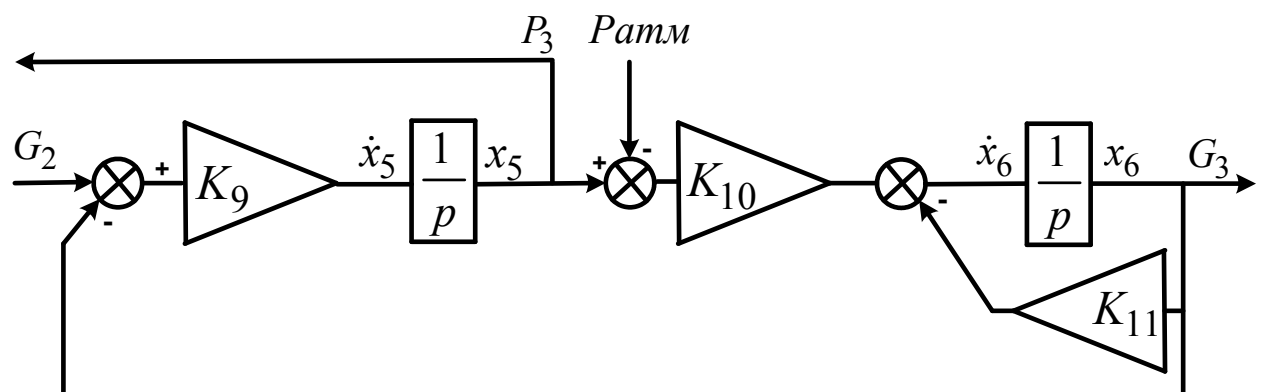


Рисунок 4.10 – Структурна схема позатрубного простору

де K_1 – коефіцієнт, що враховує конструктивні параметри компресора; $K_2 = \frac{RT_1}{V_1}$

– коефіцієнт, що характеризує пропорційність тиску в ресивері різниці витрат на його вході й виході; K_4 – коефіцієнт, що характеризує масу стисненого повітря,

що перебуває в ресивері; K_5 – коефіцієнт, що характеризує втрати витрати повітря в компресорі й ресивері; $K_6 = \frac{RT_2}{V_2}$ – коефіцієнт, що характеризує пропорційність тиску у повітропроводі й буровому поставі різниці витрат на вході повітропровода й на шарощі; K_7 – коефіцієнт, що характеризує масу стисненого повітря й масу води; K_8 – втрати витрати в буровому поставі й повітропроводі; $K_9 = \frac{RT_3}{V_3}$ – коефіцієнт, що характеризує пропорційність тиску в свердловині різниці витрат на шарощі й на виході зі свердловини; K_{10} – коефіцієнт, що характеризує масу стисненого повітря, води й бурового шламу; K_{11} – коефіцієнт, що характеризує втрати витрати в свердловині.

Відповідно пневмотранспортна система бурового верстата може бути описана за допомогою системи рівнянь (4.22), записаних відносно похідних витрати й тиску на вході відповідних ланок передатної функції.

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{p}(\omega \cdot K_1 - x_2) \cdot K_2; \\ x_2 &= \frac{1}{p}(x_1 - x_3) \cdot K_4 - x_2 \cdot K_5; \\ x_3 &= \frac{1}{p}(x_2 - x_4) \cdot K_6; \\ x_4 &= \frac{1}{p}((x_3 - x_5) \cdot K_7 - x_4 \cdot K_8); \\ x_5 &= \frac{1}{p}(x_4 - x_6) \cdot K_9; \\ x_6 &= \frac{1}{p}(x_5 - P_{атм}) \cdot K_{10} - x_6 \cdot K_{11} \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

Згідно з рекомендаціями, наведеними в [52], для подальших перетворень була використана матрична форма запису рівнянь (4.22).

Запишемо систему рівнянь, що описують динаміку системи керування, в компактній формі (4.23):

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu; \\ y &= Cx \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

де A – функціональна матриця розміром $n \times n$, називана матрицею стану системи; B – функціональна матриця розміром $n \times r$, називана матрицею керування; C – функціональна матриця розміром $m \times n$, називана матрицею виходу по стану; r – кількість вимірюваних змінних.

У розглянутій системі рівнянь матриця A буде мати розмірність 6×6 , матриця B – 6×2 . Матриці A та B будуть мати вигляд (4.24):

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -K_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_4 & -K_5 & -K_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_6 & 0 & -K_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_7 & -K_8 & -K_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_9 & 0 & -K_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{10} & -K_{11} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -K_{10} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Далі для одержання матричної передатної функції об'єкта, що визначає зв'язок параметрів $x_1 \dots x_6$ із зовнішніми вхідними впливами, згідно [52], буде мати вигляд:

$$W_0(p) = (pI - A_{66})^{-1} \cdot B_{62} = \frac{Adj(pI - A_{66})}{\det(pI - A_{66})} \cdot B_{62}, \quad (4.25)$$

де $Adj(pI - A_{66})$ – приєднана матриця; $\det(pI - A_{66})$ – визначник матриці $(pI - A_{66})$; I – одинична матриця.

Для визначення матричної передатної функції об'єкта була визначена матриця $(pI - A_{66})$.

$$(pI - A_{66}) = \begin{bmatrix} p & K_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_4 & (p + K_5) & K_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_6 & p & K_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_7 & (p + K_8) & K_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_9 & p & K_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{10} & (p + K_{11}) \end{bmatrix}$$

Для матриці $(pI - A_{66})$ згідно з виразом (4.25) була визначена приєднана матриця, що має наступний вид:

$$Adj(pI - A_{66}) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{16} \\ a_{21} & a_{26} \\ a_{31} & a_{36} \\ a_{41} & a_{46} \\ a_{51} & a_{56} \\ a_{61} & a_{66} \end{bmatrix}.$$

де $a_{11...a_{61}}$; $a_{16...a_{66}}$ - елементи першого й шостого стовпців приєднаної матриці.

В матриці керування не дорівнюють нулю тільки елементи b_{11} та b_{62} , тому для одержання матричної передатної функції об'єкта були визначені тільки елементи першого й шостого стовпців приєднаної матриці. У результаті перетворень отримано передатну функцію об'єкта керування, яка в загальному виді буде мати вигляд (4.26):

$$W_0(p) = \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_k}{\Delta \omega} & \frac{\Delta P_k}{\Delta P_{атм}} \\ \frac{\Delta Q_k}{\Delta \omega} & \frac{\Delta Q_k}{\Delta P_{атм}} \\ \frac{\Delta P_{см}}{\Delta \omega} & \frac{\Delta P_{см}}{\Delta P_{атм}} \\ \frac{\Delta Q_{см}}{\Delta \omega} & \frac{\Delta Q_{см}}{\Delta P_{атм}} \\ \frac{\Delta P_{скв}}{\Delta \omega} & \frac{\Delta P_{скв}}{\Delta P_{атм}} \\ \frac{\Delta Q_{скв}}{\Delta \omega} & \frac{\Delta Q_{скв}}{\Delta P_{атм}} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det(pI - A_{66})} \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} & a_{16}b_{62} \\ a_{21}b_{11} & a_{26}b_{62} \\ a_{31}b_{11} & a_{36}b_{62} \\ a_{41}b_{11} & a_{46}b_{62} \\ a_{51}b_{11} & a_{56}b_{62} \\ a_{61}b_{11} & a_{66}b_{62} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Знаючи передатні функції, що входять до складу приєднаної матриці були визначені передатні функції окремих ланок перетвореної структурної схеми пне-

вмотранспортної системи з урахуванням перехресних зв'язків. Згідно [52] переда-
тні функції відповідних ланок визначаються як:

$$W_1(p) = \frac{\Delta Q_k}{\Delta P_k} = \frac{a_{21}b_{11}}{a_{11}b_{11}} = \frac{K_1K_9p^2 + K_1K_9K_{11}p + K_6K_7K_{11} + K_6K_7K_{10}}{K_4K_6p^3 + (K_4K_6K_8 + K_4K_6K_{11} + K_7K_9)p^2 + (K_4K_6K_8K_{11} + K_4K_6K_9K_{10} + K_4K_6K_7K_9 + K_6K_7K_{11} + K_7K_9K_{11})p + K_4K_6K_8K_9K_{10} + K_4K_6K_7K_9K_{11} + K_6K_7K_9K_{10}}};$$

$$W_2(p) = \frac{\Delta P_{cm}}{\Delta Q_k} = \frac{a_{31}b_{11}}{a_{21}b_{11}} = \frac{K_4p^3 + (K_4K_8 + K_4K_{11})p^2 + (K_4K_8K_{11} + K_4K_9K_{10} + K_4K_7K_9)p + K_4K_8K_9K_{10} + K_7K_9K_{11}}{p^4 + (K_8 + K_{11})p^3 + (K_6K_7 + K_8K_{11} + K_1K_9 + K_9K_{10})p^2 + (K_8K_9 + K_{10} + K_1K_9K_{11})p + K_6K_7K_{11} + K_6K_7K_{10}}};$$

$$W_3(p) = \frac{\Delta Q_{cm}}{\Delta P_{cm}} = \frac{a_{41}b_{11}}{a_{31}b_{11}} = \frac{-K_4K_6p^2 - K_4K_6K_{11}p - K_4K_6K_9K_{10}}{K_4p^3 + (K_4K_8 + K_4K_{11})p^2 + (K_4K_8K_{11} + K_4K_9K_{10} + K_4K_7K_9)p + K_4K_8K_9K_{10} + K_7K_9K_{11}}};$$

$$W_4(p) = \frac{\Delta P_{скв}}{\Delta Q_{cm}} = \frac{a_{51}b_{11}}{a_{41}b_{11}} = \frac{K_4K_6K_7p + K_4K_6K_7K_{11}}{-K_4K_6p^2 - K_4K_6K_{11}p - K_4K_6K_9K_{10}}};$$

$$W_5(p) = \frac{\Delta Q_{скв}}{\Delta P_{скв}} = \frac{a_{61}b_{11}}{a_{51}b_{11}} = \frac{-K_4K_6K_7K_9}{K_4K_6K_7p + K_4K_6K_7K_{11}}.$$

Перетворена структурна схема буде мати вигляд, представлений на рисунку 4.11.

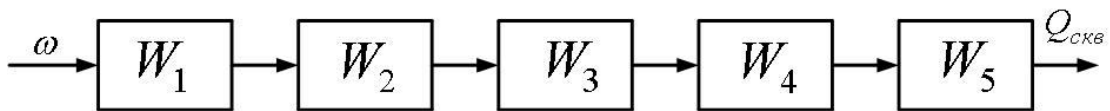


Рисунок 4.11 – Структурна схема пневмотранспортної системи бурового верстата з урахуванням зворотних зв'язків

4.6 Розробка алгоритму керування приводом компресора зі зниженим споживанням енергії

Згідно з [53] достатнім для ефективного очищення свердловини є така ви-
трата повітря, подальше збільшення якого не приведе до росту швидкості буріння,

а зниження спричинить зменшення швидкості буріння. Дане твердження підтверджується експериментальними кривими, показаними на рисунку 4.12.

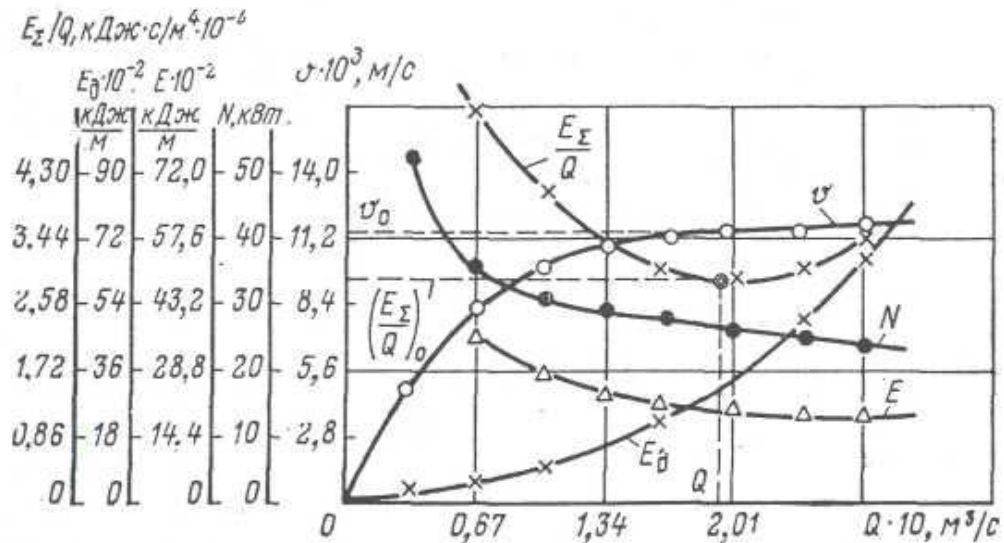


Рисунок 4.12 – Залежність швидкості v , потужності N , енергії E приводу обертання, енергії компресора E_d , питомої енергії $\frac{E_\Sigma}{Q}$ від кількості повітря,

поданого до свердловини Q

Таким чином, оптимальною кількістю повітря вважаємо таку, при якій приріст кількості поданого повітря перестає призводити до збільшення швидкості проходки, а зменшення кількості поданого повітря призводить до зниження швидкості проходки. Ця величина повинна відповідати мінімальному значенню сумарної питомої енергії $\frac{E_\Sigma}{Q}$. Очевидно, що оцінити сумарну питому енергію можна тільки по закінченню процесу буріння. Тому в якості критерію, по якому можна оцінити повноту очищення свердловини від бурового дріб'язку найбільше підходить швидкість проходки. До певного моменту збільшення кількості подаваного до свердловини повітря призводить до збільшення швидкості проходки, після чого швидкість проходки залишається практично сталою. Якщо проаналізувати графіки залежності моменту опору на приводі обертання й швидкості проходки у функції витрати повітря, то стає очевидним, що момент опору менш чутливий до зміни кількості подаваного до свердловини повітря. Тому в якості критерію опти-

мальності очищення свердловини від бурового дріб'язку можна прийняти функцію $\frac{v_n}{Q}$, максимум якої буде збігатися з мінімумом функції сумарного питомого енергоспоживання. Таким чином, буде досягнуто мінімальне енергоспоживання при заданій швидкості буріння.

Враховуючи всі особливості об'єкта регулювання як алгоритму керування обираємо екстремальний алгоритм регулювання продуктивності компресора.

Враховуючи, що про функцію, яка характеризує вихід об'єкта керування з експериментальних даних відомо, що вона має властивість унімодалності та буде мати вигляд, близький до квадратичної параболи, для побудови системи керування можна використовувати методи крокового пошуку. Зокрема будемо використовувати градієнтний пошук.

Градієнтом функції однієї змінної $Q = Q(x)$ називають її похідну

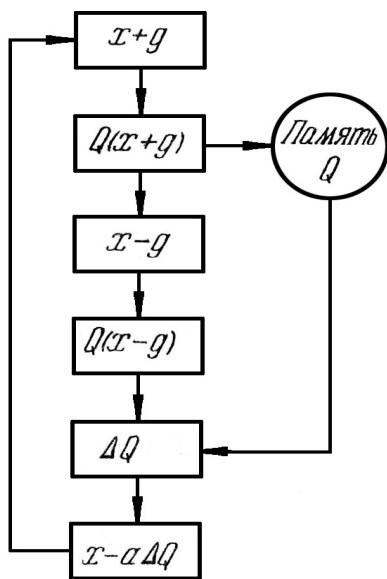


Рисунок 4.13 – Блок-схема алгоритму градієнтного пошуку

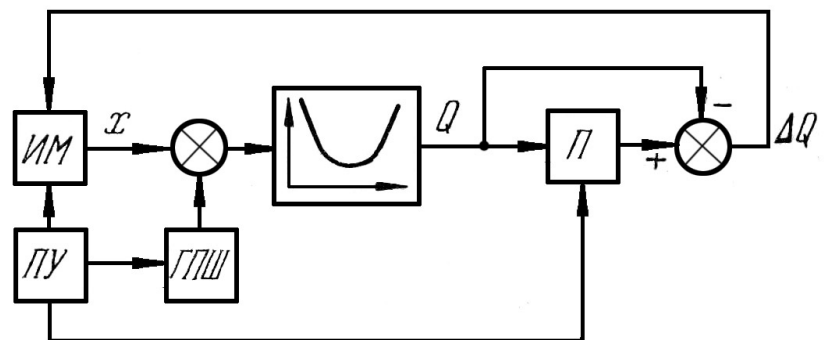


Рисунок 4.14– Блок-схема екстремального регулятора, що реалізує градієнтний пошук

$$\text{grad } Q(x) = \frac{dQ}{dx} \quad (4.27)$$

яка визначає нахил екстремальної характеристики об'єкта $Q(x)$.

Якщо об'єкт є «чорним ящиком», як у нашому випадку, то градієнт оцінюється по двом вимірам у прилеглих станах:

$$\text{grad } Q(x) \approx \frac{Q(x+g) - Q(x-g)}{2g}, \quad (4.28)$$

де величина g має бути досить малою. Очевидно, що при $g \rightarrow 0$ цей вираз відповідає (4.27), тобто ним можна користуватися цілком надійно для досить гладких функцій $Q(x)$ і при малих значеннях g .

Ідея використання поняття градієнта для цілей прискорення пошуку полягає в наступному. Для широкого класу об'єктів характеристика $Q(x)$ має таку особливість: чим далі від екстремуму x^* , тим крутіший нахил характеристики (наприклад, у випадку квадратичного об'єкта, який ми розглядаємо). Отже, величина модуля градієнта може служити ознакою віддаленості від екстремуму, або:

$$x - x^* \approx -\alpha \text{grad } Q(x) \quad (4.29)$$

де α – деяка стала ($\alpha > 0$). Ця обставина дає підставу для побудови наступного алгоритму пошуку, який називається градієнтним.

На рисунку 4.13 показана блок-схема алгоритму градієнтного пошуку.

Розглянемо апаратну реалізацію цього алгоритму. На рисунку 4.14 зображена блок-схема екстремального регулятора, що реалізує градієнтний пошук. Тут генератор пробних кроків ГПШ виробляє пробні зсуви керованого параметра (витрати повітря), реалізуючи оператори пробних кроків $x \pm g$. Отримане в результаті проб збільшення ΔQ повідомляється виконавчому механізму ИМ, який і робить робочий зсув $-a\Delta Q$. Роботою екстремального регулятора управляє програмний пристрій ПУ, що включає по черзі ГПШ і ИМ і керує пам'яттю П, де запам'ятовується попереднє значення показника якості (швидкості проходки).

4.7 Розробка структурної схеми системи керування приводом компресора зі зниженим споживанням енергії

На підставі градієнтного алгоритму пошуку оптимальної кількості повітря, що подається до свердловини була створена математична модель об'єкта в середовищі MATLAB з використанням бібліотеки Simulink. Це дозволило зробити імітаційне моделювання різних режимів роботи та налаштувань регулятора. Структурна схема моделі наведена на рисунку 4.15.

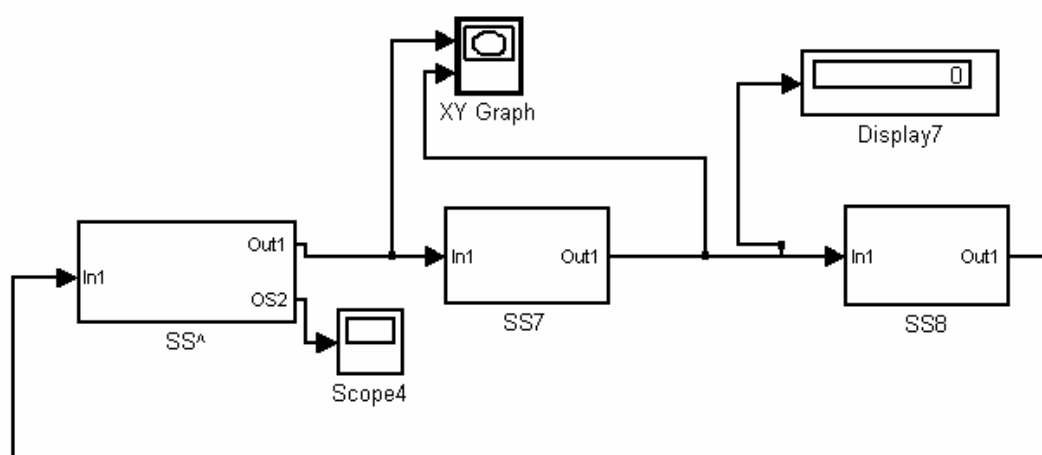


Рисунок 4.15 - Структурна схема моделі екстремального регулятора витрати повітря в пакеті MATLAB

На рис. 4.15 схема представлена в згорнутому виді. Структура підсистем представлена на рисунках. 4.16 та 4.17.

Дані підсистеми реалізують пробні кроки та пам'ять для зберігання результату попереднього пробного кроку. Результати моделювання роботи об'єкта наведені на рисунку 4.18.

Аналогічного результату можна досягти шляхом використання ПД – регулятора. Однак при цьому слід зазначити той факт, що система буде робити коливання більшої амплітуди. Це приведе до збільшення часу перехідних процесів і небажаним динамічним навантаженням у механічній частині привода й компресорі.

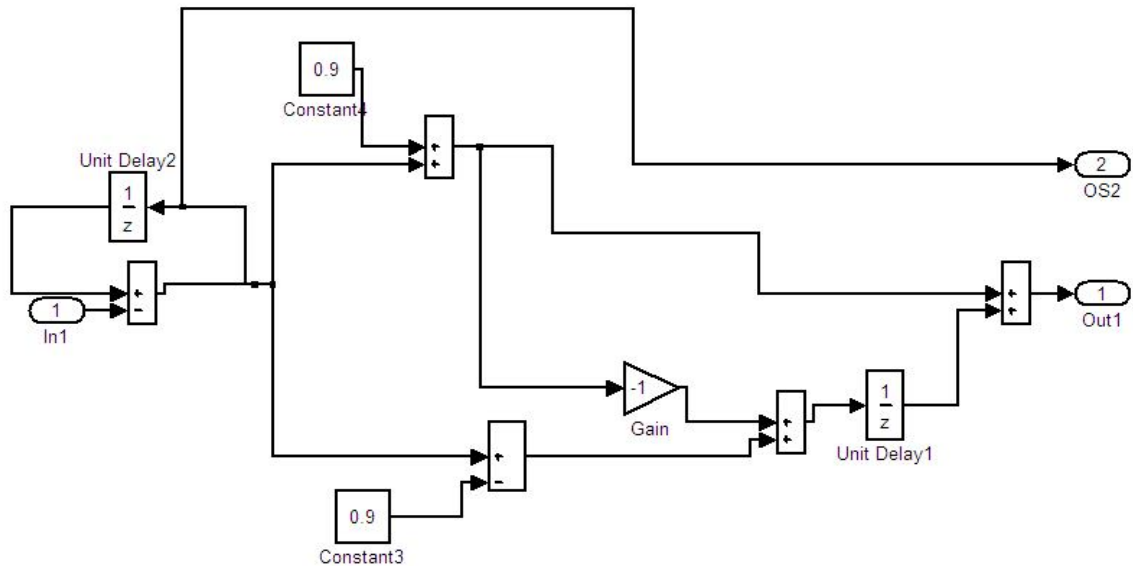


Рисунок. 4.16 – Реалізація алгоритму пам'яті для збереження реакції системи на попередній пробний крок

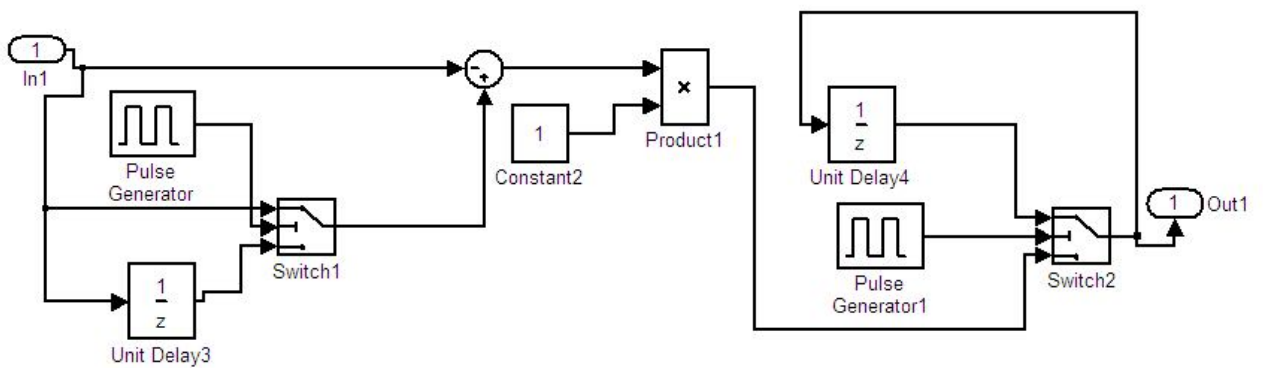


Рисунок 4.17 – Реалізація алгоритму пам'яті та виключення дискретності результатів розрахунків наступного значення показника якості регулювання

Структурна схема моделі з використанням ПД – регулятора й результати моделювання його роботи наведені на рисунках 4.19 – 4.21.

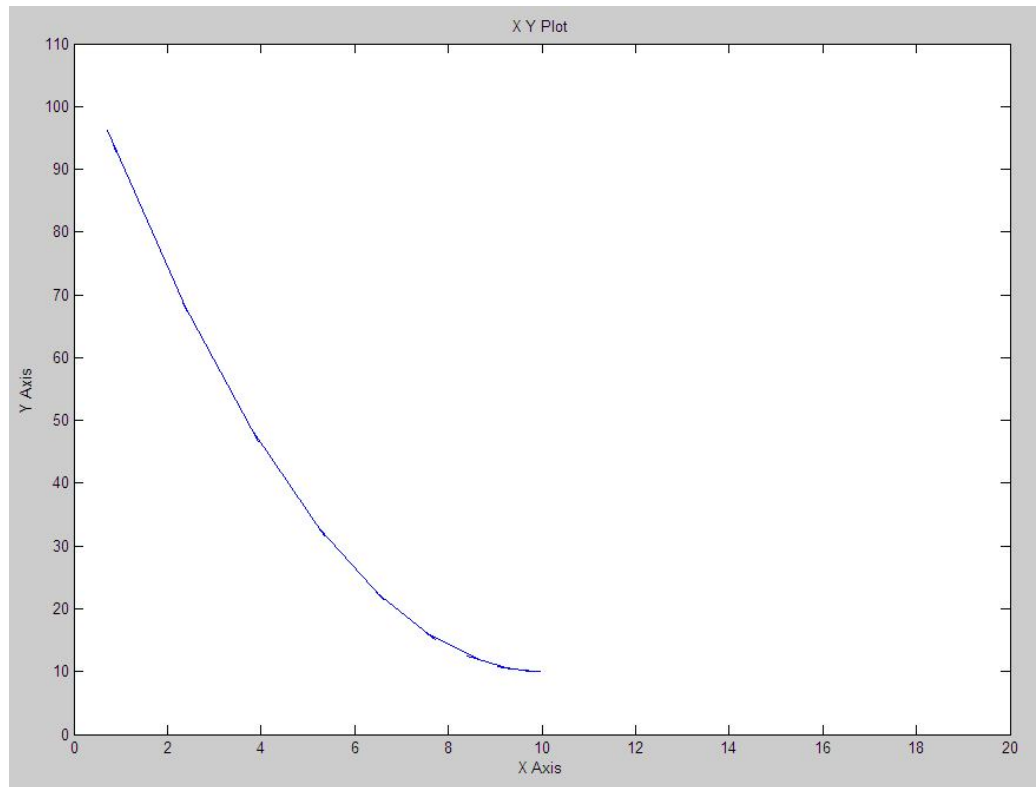


Рисунок 4.18 – Залежність питомого енергоспоживання від продуктивності компресора при використанні екстремального регулятора продуктивності компресора

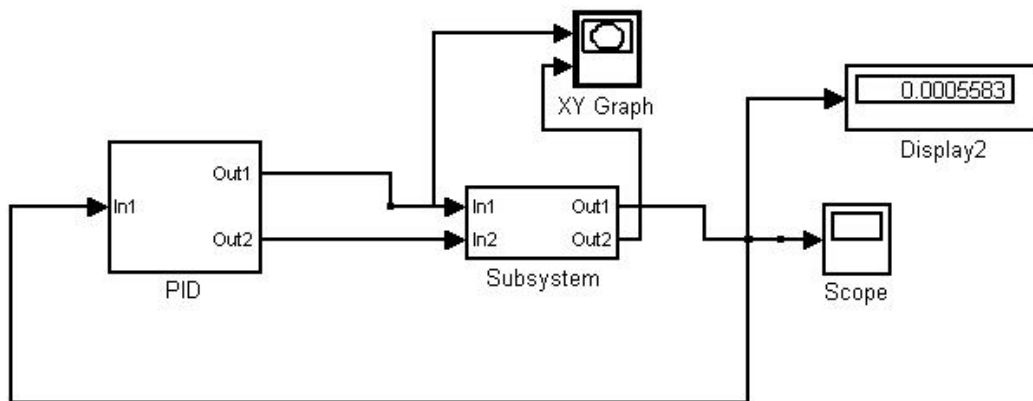


Рисунок 4.19– Система керування продуктивністю компресора з ПІД-регулятором

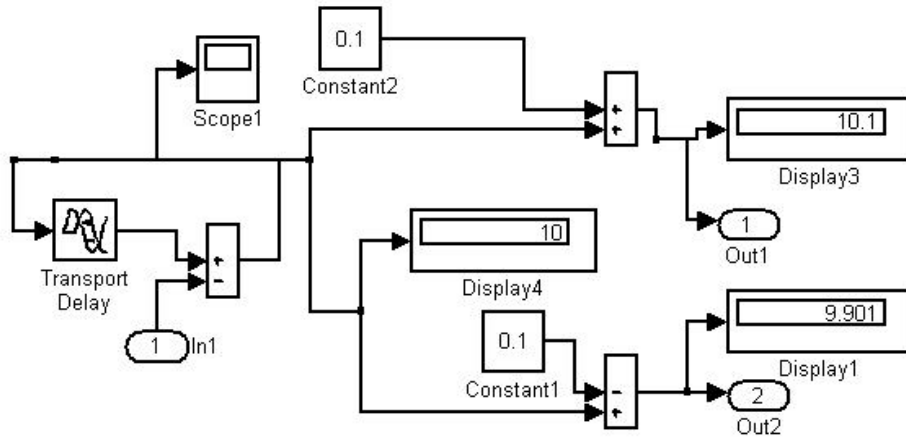


Рисунок 4.20 – ПІД-регулятор в контурі регулювання продуктивності компресора

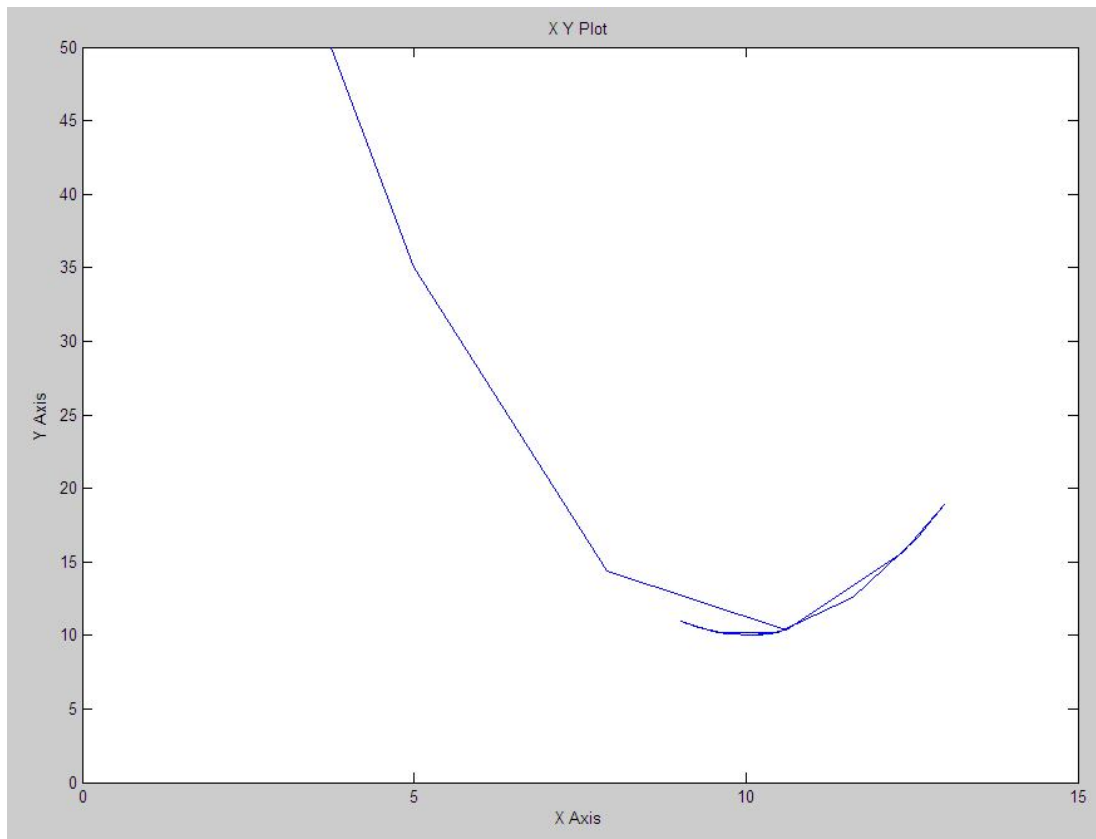


Рисунок 4.21 – Залежність питомого енергоспоживання від продуктивності компресора при використанні ПІД-регулятора продуктивності компресора

Слід відзначити, що використання ПД регулятора в контурі регулювання продуктивністю компресора може призвести до нестабільної роботи як системи керування, так і до виникнення кидків швидкості та викликаних ними ударних навантажень у механічній частині компресора.

4.8 Розробка рекомендацій для створення регульованого привода компресора

Результати випробувань екстремальної системи, наведені на рисунку 4.18, дають змогу стверджувати, що екстремальний регулятор, представлений на рисунках 4.15 – 4.17, який реалізує пошук мінімуму функції параболічного виду може бути використаний для підтримання оптимальної з точки зору енергоспоживання продуктивності компресорної установки. Враховуючи, що оцінити сумарну питому енергію можна тільки по закінченню процесу буріння, в якості критерію, по якому можна оцінити повноту очищення свердловини від бурового дріб'язку було обрано швидкість проходки.

Також слід відзначити, що при моделюванні різних режимів роботи регулятора було встановлено, що існує кореляція між величиною пробного шагу g та довільною сталою α . Збільшення α для прискорення знаходження екстремуму призводить в певний момент до втрати системою стійкості. Тобто для порід різної міцності потрібно експериментальним шляхом визначати допустимі інтервали зміни пробного шагу та довільної сталої щоб виключити можливість втрати системою стійкості.

В граничному режимі спостерігається коливання системи біля точки екстремуму, що може викликати ударні навантаження на компресор та механічну частину приводу. Крім того, збільшення α , як і зростання g призводить до збільшення похибки при знаходженні екстремуму, що також погано впливає на енергетичні показники. У випадку роботи з реальним об'єктом величина шагу буде залежати від потрібної точності та швидкодії, що визначатимуться для кожного конкретного випадку.

При використанні в контурі регулювання продуктивності компресора ПД-регулятора була досягнута більша швидкодія порівняно з екстремальним регулятором. Але при цьому пошук оптимальної продуктивності відбувається при більших коливаннях системи (рисунок 4.21), що в свою чергу, обумовлює більші навантаження на механічну частину. Для остаточного вибору типу регулятора, який має бути використаний потрібно знати необхідну швидкодію та обмеження за ударними навантаженнями на механічну частину приводу та компресор.

4.9 Висновки

1) Виходячи з існуючих умов експлуатації шарошkových бурових верстатів та впровадження бурових верстатів нового покоління з покращеними енергетичними показниками, виникає необхідність у зниженні енергоспоживання компресорної установки, приводний двигун якої є найбільш потужним споживачем електричної енергії. Найбільша потужність споживається під час пуску приводу, тому виникає необхідність її зниження шляхом частотно-керованого пуску приводу.

2) У зв'язку з модернізацією станків СБШ-250МН та впровадженням бурових станків нового покоління СБШС-250Н з двома частотними перетворювачами, що живлять або приводи ходу або привод подачі та привод обертання бурового постава, з'явилася можливість використання одного з цих перетворювачів для плавного пуску приводу компресора з подальшим перемиканням живлення на мережу.

3) В результаті імітаційного моделювання згідно гіпотез, висунутих авторами робіт [43,44,45] були встановлені величини, що впливають на зміну струму статора при перемиканні. Були побудовані графіки зміни струму статора за умови різних поєднань факторів, що визначають характер процесу перемикання живлення двигуна. Це дозволило зробити оцінку впливу кожного з наведених вище факторів.

4) Для знаходження оптимального з точки зору енергоспоживання режиму продувки свердловини необхідний алгоритм, що реагуватиме на величину зміни швидкості проходки свердловини. Такі властивості має градієнтний алгоритм, який був покладений в основу екстремального регулятора зовнішнього контуру системи керування приводним двигуном компресора.

5) Екстремальний регулятор, що реалізує градієнтний алгоритм, дає можливість знаходити як максимум, так і мінімум функції виходу. Це дозволяє використовувати для досягнення оптимального енергоспоживання використовувати ті вихідні параметри, які найбільш зручно знімати з бурового верстата.

6) Використання екстремального регулятора, що реалізує градієнтний алгоритм дозволяє більш ефективно експлуатувати компресорну установку та подовжити міжремонтний проміжок часу за рахунок плавного регулювання продуктивності компресора, а, отже, і швидкості приводного двигуна та зменшення ударних навантажень.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано систему регулювання активним випрямлячем з релейно-векторним контуром струму, який забезпечує зменшення числа комутацій ключів АВ, підвищує точність регулювання струму і забезпечує зменшення впливу періоду дискретизації цифрової системи на точність регулювання струму.
2. При зниженні живлячої напруги мережі на 10% і більш рівень струмообмеження регулятора напруги АВ повинен бути збільшений на 11-12% і більше в порівнянні з рівнем струмообмеження регулятора швидкості двигуна. Відповідно повинна бути збільшена потужність силової схеми АВ.
3. Створено експериментальний стенд для дослідження режимів активного випрямляча.
4. Проведено аналіз відомих методів та засобів визначення порушень рухомого струмознімального контакту струмоприймачів. Встановлено, що відомі засоби визначення цих порушень для одноконттактних струмознімачів недостатньо надійні.
5. Проведено аналіз електромагнітних процесів при дугоутворенні та визначено діапазон хвиль випромінювання дуги, який може бути використаний при контролі її виникнення.
6. Встановлено, що інфрачервоний діапазон є найбільш придатним для виявлення дугоутворення порівняно з ультрафіолетовим та видимим.
7. Розроблено метод виявлення дугоутворення на основі використання інфрачервоних фотодіодів, який забезпечує усунення завад від сторонніх джерел випромінювання.
8. Розроблено пристрій формування сигналу при порушенні струмознімального контакту на його початкових стадіях.
9. Дано теоретичне обґрунтування й розроблений спосіб селективного визначення параметрів ізоляції електричної мережі відносно землі під робочою напругою, заснований на накладенні на розподільну мережу бічастотних оперативних синусоїдальних сигналів непромислової частоти.

10. Представлено функціональну схему системи безперервного й автоматичного контролю або вимірювання активного опору ізоляції і ємності відносно землі для трифазної електричної мережі напругою вище 1000 В.
11. Залежно від місця включення вимірювальних датчиків струму система здатна забезпечити селективний вимір параметрів ізоляції відносно землі всієї електричної мережі або відповідного приєднання, а також індуктивності дугогасного реактора.
12. Виходячи з існуючих умов експлуатації шарошkových бурових верстатів та впровадження бурових верстатів нового покоління з покращеними енергетичними показниками, виникає необхідність у зниженні енергоспоживання компресорної установки, приводний двигун якої є найбільш потужним споживачем електричної енергії. Найбільша потужність споживається під час пуску привода, тому виникає необхідність її зниження шляхом частотно-керованого пуску привода.
13. У зв'язку з модернізацією станків СБШ-250МН та впровадженням бурових станків нового покоління СБШС-250Н з двома частотними перетворювачами, що живлять або приводи ходу або привод подачі та привод обертання бурового постава, з'явилася можливість використання одного з цих перетворювачів для плавного пуску привода компресора з подальшим перемиканням живлення на мережу.
14. В результаті імітаційного моделювання були встановлені величини, що впливають на зміну струму статора при перемиканні. Були побудовані графіки зміни струму статора за умови різних поєднань факторів, що визначають характер процесу перемикання живлення двигуна. Це дозволило зробити оцінку впливу кожного з наведених вище факторів.
15. Запропоновано екстремальний регулятор для плавного регулювання продуктивності компресорної установки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: - Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470 с.
2. Жук А.К. Искажения входных напряжений и токов и коэффициент мощности преобразователей частоты. / Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. 2008 - Ч. 5. - С. 69-76.
3. Преобразователи частоты Altivar 71. Каталог. // Schneider Electric. – 2007.
4. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. / Перельмутер В.М. – Х.: Основа, 2004 – 210 с.
5. Берестов В.М., Харитонов С.А. Расчет параметров выпрямителя с ШИМ. // Электротехника, 2005, №9. - С. 42-46.
6. Лихошерст В.И. Управление конвертером напряжения // Электротехника, 2004, №9. - С. 65-68.
7. Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А. Активный фильтр как новый элемент энергосберегающих систем электропривода // Электричество, 2000, №3. - С. 46-54.
8. Grid-connected voltage source converter – control principles and wind energy applications. Technical report №331 / Jan Svensson. –Department of electric power engineering. Chalmers University of technology. – Goteborg, Sweden, March, 1998, 171 с.
9. Modeling and control voltage source converters connected to the grid. Technical report №351 / Michael Lindgren. - Department of electric power engineering. Chalmers University of technology. – Goteborg, Sweden, November, 1998, 144 с.
10. Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А., Зиновьев Г.С. Прогнозирующее релейно-векторное управление активным выпрямителем напряжения // Электротехника. 2001. №12. С. 47-52.
11. Якупов Д.В.. Обоснование алгоритма векторного релейного регулятора тока трехфазных автономных инверторов напряжения // Науковий вісник НГУ. 2004. № 1. - С. 95-98.

12. Казачковский Н.Н., Якупов Д.В. Способ управления векторным релейным регулятором тока в электроприводах переменного тока с ШИМ // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Вип. 3/2004 (26). – Кременчук: КДПУ, 2004. - С. 46-49.
13. Казачковский Н.Н., Якупов Д.В. Управление активным выпрямителем с релейно-векторным контуром тока для систем частотно-регулируемого электропривода // Ефективність та якість постачання промислових підприємств: VI міжнародна науково-технічна конф.: зб. праць. – Маріуполь: ПДТУ, 2008. - С. 377-380.
14. Якупов Д.В. Релейно-векторний регулятор тока активных выпрямителей систем частотно-регулируемого электропривода. Вісник Національного технічного університету “ХПИ”. – Харків: НТУ “ХПИ”, 2008. - № 30. – С. 464-467.
15. Якупов Д.В. Исследование работы регулятора напряжения активного выпрямителя частотно-регулируемого электропривода. Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2008. - №80. – С. 180-185.
16. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
17. Иванов А.Б. Исследования и разработка токоприёмных устройств рудничных контактных электровозов. - Дис... канд. техн. наук /ДГИ. –Днепропетровск: 1967. –201 с.
18. А.с. 1039753 СССР, МКИЗВ60L 5/19. Токоприёмник рудничного электровоза /А.Б. Иванов, А.М. Мирошник, А.С. Головченко, Ю.П. Сердюков. Б.И. Сироченко (СССР). - № 3000347/24-11; Заявлено 03.11.80, опубл. 07.09.83, Бюл. № 33 //Открытия. Изобретения. - 1983. - № 12. - С. 82.
19. Бунько В.А., Иванов А.Б. Мирошник А.М., Головченко А.С., Кириллов И.А. Экспериментальные исследования гибкого токоприёмника рудничного контактного электровоза //Горн. електромеханіка и автоматика: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1982.-Вып. 41. - С. 46-47.

20. Разработка предложений по расширению области применения контактной электровозной откатки с шахтах: Отчёт о НИР/ Днепропетровский горный ин-т (ДГИ); Руководитель А.Б. Иванов. - № ГР79047545 Инв. № Б805471. - Днепропетровск., 1979. - 46 с.
21. Бунько В.А., Волотковский С.А. Повышение безопасности рудничной электровозной откатки. - М.: Недра, 1964. - 168 с.
22. А.с. 1371934 СССР, МКИ В60М1/34. Устройство электроснабжения во взрывоопасных зонах и угольных шахтах /А.И. Пархоменко, А.И. Гескин, А.И. Аронович, М.В. Хорунжий, В.И. Станишевский, С.В. Карась, А.А. Перех, В.П. Колосюк, В.П. Коптиков, В.С. Торгашов (СССР). - № 3798690/29-11; Заявлено 27.08.84; опубл. 07.11.88. Бюл. № 5/Открытия. Изобретения. - 1983. -№ 5 - С. 87.
23. Заявка № 2124569 (Великобритания), МКИ В60М1/34 Контактная система для питания подвижного состава промышленного транспорта. Заявлен. 03.08.82. Опубл. 22.02.84. Бюл. № 31.
24. Заявка № 300 9054 (ФРГ), МКИ В60М1/34 Система питания электроподвижного состава взрывоопасных подземных выработок. Заявлено 08.03.80; Опубл. 16. 06. 82. Бюл. № 13.
25. Заявка 3208734 (ФРГ), МКИ В60М1/34. Контактный провод с токосъёмом для применения во взрывоопасных шахтах. Заявл. 11.03.82; Опубл. 22.09.83. Бюл. № 26.
26. А.с. 1106697 СССР, МКИ В60L15/08 Устройство для регулирования напряжения на тяговом электродвигателе /А.Е. Енгус, В.С. Хвостов, Я.И. Гаврилов, Ю.А Зубков (СССР). - № 2835760/24-11; Заявлено 05.11.79; Опубл. 07.08.84, Бюл. № 29.
27. А.с. 735460 СССР, МКИ В60L15/08 Устройство для регулирования напряжения на тяговом электродвигателе /А.Е. Енгус, В.С. Хвостов, Я.И. Гаврилов, Ю.А Зубков (СССР). - № 2585080/27-11; Заявлено 02.03.78; Опубл. 25.05.80, Бюл. № 19.

28. А.с. № 1695603 (СРСР), кл. В 60 L 15/08. Устройство для устранения искрения токоприёмника электровоза / А.С. Головченко, А.Б. Иванов, И.А. Кириллов, Заявл. 06.04.1988 р.
29. Копчиц В.В., Мешков В.В., Мышкин Н.К. Триботехника электрических контактов. -М.: Наука, 1974. -235 с.
30. А.с. 1050112. СССР, МКИ Н03К 17/56. Ключ постоянного тока /А.Б. Иванов, А.С. Головченко, И.А. Кириллов (СССР). - № 3471100/18-21 Заявл. 16.07.82; опубл. 23.10.83. Бюл. № 39.
31. Головченко А.С., Иванов А.Б., Кириллов И.А. Исследование устройства подавления дугообразования для рудничных контактных электровозов //Горн. электромеханика и автоматика: Респ. межвед. науч. сб. - 1984. -Вып. 44. - С. 29-31.
32. А.с. 913594. СССР, МКИ Н03К 17/56. Ключ постоянного тока /А.Б. Иванов, А.С. Головченко, И.А. Кириллов, Ю.П. Сердюков, Б.Н. Сироченко (СССР). - № 2959481. Заявл. 11.07.80; опубл. 15.03.82. Бюл. № 12.
33. А.с. 1499472 СССР, МКИ Н03К 17/56. Ключ постоянного тока /В.М. Арутюнов, А.С. Головченко, А.Б. Иванов, И.А. Кириллов, С.Я. Петренко, В.В. Радюков (СССР). - № 4381542/24-21; Заявл. 19.02.88; опубл. 07.08.89. Бюл. № 29.
34. Дослідження режимів та розробка енергоефективного електрообладнання підприємств гірничо-металургійного комплексу. Аналіз параметрів та режимів роботи пристроїв та систем електропостачання та розробка: моделей і пристроїв: Звіт по НДР (проміжний)/НГУ; Наук. кер.Бешта О.С.; Шифр теми ГП-415; № ДР0108U000557. - Дніпропетровськ, 2008.- 129 с.
35. Электробезопасность на открытых горных работах. / Под ред. В.И.Щуцкого. -М.: Недра, 1983. -192 с.
- 36.Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие. -М.: Недра, 1993. – 192 с.
- 37.Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 10-е изд. –М.: УИЦ "Гардарики", 2001. – 638 с.

38. Корн Г.А. Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. -М.: Наука, 1974. -832 с.
39. Серов В.И., Щуцкий В.И., Ягудаев В.М. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий. -М.: Наука, 1985. -136 с.
40. Справочник по электроустановкам угольных предприятий. Электроустановки угольных разрезов и обогатительных фабрик / Ш.Ш. Ахмедов, А.Г. Кузьмичев, Ю.Т. Разумный и др. Под общей ред. В.В. Дегтярева. – М.: Недра, 1988.– 436 с.
41. Электрические машины и микромашины; Учеб. для электротех. спец. вузов/ Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов.– 3-е изд., перераб. и доп.– М.: Высш. шк., 1990.–528 с.
42. В.А. Перетолочин. Расчет параметров и показателей работы пневмотранспортных систем буровых станков: Учебн. пособие – Иркутск. Иркутский политехнический институт, 1982.– 80 с.
43. К.П. Ковач, И. Рац. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.–Л., Госэнергоиздат, 1963, 744 с.
44. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М.–Л., Госэнергоиздат, 1962.
45. Локарев В.И., Беляев В.В. Особенности переключения статорных цепей асинхронного двигателя в целях энергосбережения. Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика.» – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. - С. 545-546.
46. Переходные процессы в частотнорегулируемом электроприводе при переключении двигателя на сеть. Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». –Харків: НТУ «ХПІ», 2005. - №45. - С. 168-172.
47. Туманов М.П. Теория управления. Теория линейных систем автоматического управления. – МГИЭМ. М. - 2005. - 82 с.

48. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
49. Хлумский В. Ротационные компрессоры и вакуум-насосы. – М.: «Машиностроение», 1971 – 128 с.
50. Андреев П.А. Винтовые компрессорные машины – Л.: Судпромгиз, 1961. – 252 с.
51. Иващенко Н.Н. Теория автоматического управления. – М.: Наука, 1981. – 435 с.
52. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
53. Буткин В.Д. Проектирование режимных параметров автоматизированных станков шарошечного бурения. – М.: Недра, 1979. – 208 с.

Національний гірничий університет
(НГУ)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
д-р техн. наук, проф. О.С. Бешта

" _____ " _____ 2008 г.

ЗВІТ

ПРО ПАТЕНТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

ПО НДР " ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ТА РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ПІДПРИЄМСТВ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО
КОМПЛЕКСУ "

шифр ГП–415

Етап – Розробка алгоритму керування приводом компресора зі зниженим споживанням електроенергії

Керівник НДЧ

О.Є. Хоменко

Зав. кафедри метрології та
Інформаційно-вимірювальних
технологій

В.І. Корсун

Завідувач ПЛВ

О.О. Філонова

Керівник НДР

О.С. Бешта

Нормоконтролер

Л.О. Савостенко

2008

СПИСОК ВИКОНАВЦІВ

Головний науковий співробітник	О.С. Бешта
Старший науковий співробітник	В.С. Хілов
Науковий співробітник	Н.В. Глухова
Молодший науковий співробітник	О.Я. Сухарєв
Молодший науковий співробітник	Н.А. Іконнікова

ЗАГАЛЬНІ ДАНІ ПРО ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Організація-виконавець розробки: Національний гірничий університет

Початок розробки – 2008, січень

Кінець розробки – 2009, грудень

Призначення, галузь використання та короткий опис об'єкта:

Мета НДР – розробка теорії та наукових положень для створення автоматизованого частотно-керованого електроприводу компресора з урахуванням технологічних особливостей кар'єрних верстатів шарошкового буріння і автоматичного керування буровим верстатом у режимах буріння і перемикання асинхронного двигуна від частотного перетворювача на живлячу мережу.

Актуальність робіт визначається метою і пріоритетами статті 8 Закону України "Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності України" і "Регіональної програми перспективного розвитку гірничорудних підприємств Дніпропетровської області до 2010 року".

Це пов'язано з необхідністю підтримки виробничих потужностей дев'яти кар'єрів п'яти гірничо-збагачувальних комбінатів Кривого Рогу на мировому конкурентноспроможному рівні. Згідно з регіональною програмою розвитку гірничорудних підприємств Дніпропетровської області до 2010 року потреба у бурових верстатах нового покоління досягне значення не менше 90 одиниць. Це обумовлено критичним технічним станом основних виробничих фондів відкритих гірничих підприємств. Зношеність активних фондів на сьогодні досягає значення 75-100%. Бурові верстати знаходяться в експлуатації 1,5-2 строки.

Основний предмет науково-дослідної роботи – система керування приводного двигуна компресора шарошкового бурового верстата

Галузь використання – Наукові положення і принципи створення автоматизованого електроприводу компресора, які розробляються колективом НГУ, будуть передані КриворіжНДПрудмаш, ВАТ НКМЗ, ООВ Оркіс для впровадження при розробці і реконструкції верстатів шарошкового буріння, що дозволить підвищити конкурентоспроможність бурового верстата, його успішне просування на ринок гірничої техніки для відкритих робіт.

ЗМІСТ

1. Патентна документація, відібрана для подальшого аналізу (Ф. Г. 1.1).....	188
2. Техніко-економічні показники ОГД та об'єктів аналогічного призначення (Ф. Г. 1.4).....	190
3. Аналіз новизни, винахідницького рівня та промислового використання ОГД (Ф. Г. 1.5.).....	191
4. Аналіз можливостей застосування в ОГД відомих об'єктів промислової власності (Ф. Г. 2.4.).....	192

Форма Г.1.1 – Патентна документація, відібрана для подальшого аналізу

ОГД, його складові частини	Документи на об'єкти промислової власності	
	Бібліографічні дані	ВІДОМОСТІ ЩОДО ЙОГО діяльності
1	2	3
Система регулювання продуктивності компресора	“(21) 4377114/25-06 (22) 09.02.88 (46) 07.09.90. Бюл. № 33 (71) Государственный институт по проектированию предприятий железорудной промышленности, «Кривбаспроект» и Криворожский горнорудный институт (72) Ю.Г. Осадчук, Д.И. Родькин, Г.Г. Лазаревич, А.А. Шкода, С.М. Мохов, С.М. Криворучко, Н.И. Илиенко (53) 621.438 – 55(088.8) Авторское свидетельство СССР №1590673”	Строк дії скінчився
	“(21) 3927114/24-06 (22) 04.07.85 (46) 15.12.87. Бюл. № 46 (71) и Криворожский горнорудный институт и Государственный институт по проектированию предприятий железорудной промышленности, «Кривбаспроект» (72) Ю.Г. Осадчук, Д.И. Родькин, И.Ю. Рют, Н.В. Кузовлева, В.Н. Скирко, Н.И. Илиенко и Н.Л. Аламаха (53) 621.515 (088.8) Авторское свидетельство СССР №1359493”	Строк дії скінчився

Форма Г.1.1 – Закінчення

1	2	3
	<p>“(21) 4661189/06, 4744927/06 (22) 13.03.89 (46) 30.12.91. Бюл. № 48 (71) Государственный институт по проектированию предприятий железорудной промышленности, «Кривбасспроект» и Криворожский горнорудный институт (72) Ю.Г. Осадчук, Д.И. Родькин, Н.Я. Машинецкий, В.И. Бутенко, А.А. Олейников, А.В. Бойко, С.А. Борькин, Н.И. Илиенко и С.М. Криворучко (53) 621.515(088.8) Авторское свидетельство СССР №1701990”</p>	<p>Діє до 13.03.2009</p>

Форма Г.1.4 – Техніко-економічні показники ОГД та об'єктів аналогічного призначення

Найменування та одиниці виміру	Техніко-економічні показники			
	об'єкта за стандартом або технічними умовами	об'єкта-аналога (держава, фірма, організація, модель, рік освоєння)	ОГД	перспективного зразка
1	2	3	4	5
Споживана потужність, кВт·год	180	–	120	120

Форма Г.1.5 – Аналіз новизни, винахідницького рівня та промислової придатності ОГД

ОГД, його складові частини		Прототип		Очікуваний результат	Можливість використання у промисловості або іншій сфері діяльності	Номер поданої заявки, дата подачі заявки
Назва	Сукупність ознак	Бібліографічні дані	Сукупність ознак			
1	2	3	4	5	6	7
	Розробляється нове технічне рішення щодо системи керування приводним двигуном компресора					

Форма Г.2.4 – Аналіз можливості застосування в ОГД відомих об’єктів промислової власності

ОГД, його складові частини	Документи на об’єкти промислової власності (бібліографічні дані)	Суть об’єкта промислової власності	Очікуваний результат від застосування
1	2	3	4
Система регулювання продуктивності компресора	Авторське свідоцтво SU 1590673 A1	“Изобретение относится к области регулирования компрессоров и может быть использовано в электроприводах компрессоров, вентиляторов с регулированием их производительности в заданных пределах путем изменения частоты вращения и дросселирования на входе компрессора.”	Використання разом з новим технічним рішенням дасть можливість значно знизити споживання електричної енергії
	Авторське свідоцтво SU 1701990 A1	“Способ регулирования производительности компрессора с электроприводом путем изменения давления и расхода газа на выходе из компрессора”	

ДОВІДКА ПРО ПОШУК № 1

Завдання на проведення патентних досліджень №1, 28.02.08
(номер, дата)

Етап Розробка алгоритму керування приводом компресора зі зниженим
споживанням електроенергії

Номер, дата регламенту пошуку №1, 28.02.08

Початок пошуку 28.02.08 Закінчення пошуку 1.04.08

Таблиця В.1 Джерела інформації, використані під час проведення пошуку

Предмет пошуку (ОГД)	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Інформаційна база, використана під час пошуку	Бібліографічні дані першого та останнього за хронологією джерела інформації	
				Патентна інформація	Інша науково-технічна інформація
1	2	3	4	5	6
Система регулювання продуктивності компресора	Україна, Російська Федерація	F04D27/00	Описи винаходів до авторських свідоцтв та патентів, офіційний бюлетень «Промислова власність»	а/с №504010 від 25.02.76, бюл.№7 патент РФ №2131540 від 10.06.99 бюл. №16 патент UA № 2331, патент UA № 20649	—

В.2 Висновки про виконання регламенту пошуку

Регламент пошуку виконано в повному обсязі

Керівник підрозділу-виконавця робіт

(Дата)

Зав. ПЛВ

О.О. Філонова

(Дата)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи НГУ
_____ О.С. Бешта
" ____ " _____ 2008 р.

**Завдання
на проведення патентних досліджень**

по темі: ГП-415 “Дослідження режимів та розробка енергоефективного електрообладнання підприємств гірничо-металургійного комплексу

Етап Розробка алгоритму керування приводом компресора зі зниженим споживанням електроенергії

Мета патентних досліджень: Визначення патентної ситуації щодо ОГД

Таблиця А.1 Види робіт при проведенні патентних досліджень та виконавці:

Види робіт	Підрозділи-виконавці	Відповідальні виконавці (П.І.П.)	Строки виконання робіт	Звітний документ
1	2	3	4	5
Визначення патентноздатності ОГД				форма.Г.1.1, Г.1.4, Г.1.5
Визначення ситуації щодо використання прав на ОІВ				форма Г.2.4, Звіт про патентні дослідження

**Керівник
підрозділу-виконавця робіт**

Зав. ПЛВ

_____ **О.О. Філонова**

РЕГЛАМЕНТ ПОШУКУ № 1

Найменування теми "Дослідження режимів та розробка енергоефективного електрообладнання підприємств гірничо-металургійного комплексу"

шифр теми ГП-415

Етап Розробка алгоритму керування приводом компресора зі зниженим споживанням електроенергії

Номер, дата завдання на проведення патентних досліджень №1, 28.02.08

Обґрунтування регламенту пошуку _____ регламент пошуку необхідний для визначення науково-технічного рівня щодо предмету пошуку _____

Початок пошуку 28.02.08 Закінчення пошуку 1.04.08

Таблиця Б.1

Предмет пошуку (ОГД)	Мета пошуку інформації	Держава пошуку	Класифікаційні індекси: МПК, НПК, МКПЗ, МКТП, УДК	Ретроспективність пошуку	Джерела інформації
1	2	3	4	5	6
Система регулювання продуктивності компресора	Визначення патентної ситуації	Україна, Російська Федерація	F04D27/00	1980-2007 2004-2007	Описи винаходів до авторських свідоцтв та патентів, офіційний бюлетень «Промислова власність»

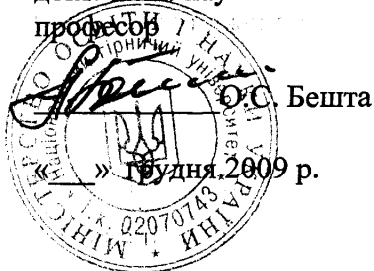
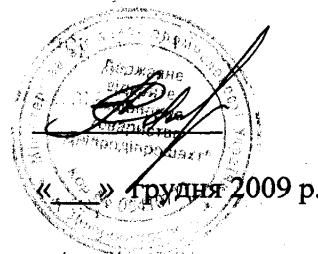
Керівник підрозділу - виконавця робіт

(Дата)

Зав. ПЛВ

О.О. Філонова

(Дата)

ЗАТВЕРДЖУЮПроректор НГУ
з наукової роботи
докт. техн. наук
професор**УЗГОДЖЕНО**директор-голова правління
ДВАТ "Дніпродіпрошахт"**АКТ**

Впровадження у виробництво результатів науково-дослідної роботи по темі ГП-415 "Дослідження режимів та розробка енергоефективного електрообладнання підприємств гірничо-металургійного комплексу."

Навчальним гірничим університетом у 2008-2009 році була виконана НДР "Дослідження режимів та розробка енергоефективного електрообладнання підприємств гірничо-металургійного комплексу."

В результаті виконання роботи розроблено:

- метод виявлення дугоутворення на основі використання інфрачервоних фотодіодів, який забезпечує усунення завад від сторонніх джерел випромінювання.
- принципи створення пристроїв дугогасіння рухомого струмознімального контакту електричних транспортних засобів.

Вказані результати НДР були передані Національним гірничим університетом ДВАТ "Дніпродіпрошахт" для впровадження у виробництво шляхом використання у проектах електромеханічного обладнання шахт.

Керівник розділу теми ГП-415,

Професор НГУ

Іванов О.Б.

Головний інженер проекту

ВИТЯГ
з протоколу №11
засідання кафедри електропривода

м. Дніпропетровськ

2 грудня 2009 р.

ПРИСУТНІ: зав. кафедри проф. Бешта О.С., професори Кириченко В.І., Казачковський М.М., Донченко В.Л., Колб. А.А., Воскобійник В.Е., доценти Азюковський О.О., Яланський О.А., Балахонцев О.В., асистенти Якупов Д.В., Петренко Р.О., Худолій С.С., Худий Є.Г., Михайленко О.В., вчений секретар ст. викл. Савченко С.Б.

СЛУХАЛИ: інформацію проф. Бешти О.С., наукового керівника теми ГП-415 “Дослідження режимів та розробка енергоефективного електрообладнання підприємств гірничо-металургійного комплексу” про виконану роботу за темою, який повідомив, що роботу виконано у повному обсязі, згідно з календарним планом та технічним завданням.

Основними результатами виконання НДР є:

- запропоновано систему регулювання активним випрямлячем з релейно-векторним регулятором струму, досліджено роботу регулятора напруги при коливанні напруги мережі, реверсі струму ланки постійного струму, розроблено та досліджено експериментальний стенд з активним випрямлячем;
- проведено аналіз відомих методів та засобів визначення порушень рухомого струмознімального контакту струмоприймачів, електромагнітних процесів при дугоутворенні, розроблено метод виявлення дугоутворення з використанням інфрачервоних світло діодів, запропоновано принцип та систему придушення дугоутворення транспортних засобів з рухомим струмознімальним контактом;
- теоретично обґрунтовано та розроблено спосіб селективного визначення параметрів ізоляції електричної мережі відносно землі під напругою, розроблено алгоритми та запропоновано функціональну схему системи автоматичної компенсації складових струму однофазного замикання на землю;
- здійснено математичне моделювання різних способів пуску двигуна компресора, розроблено рекомендації щодо алгоритму керування нерегульованого приводу компресора при частотному пуску із подальшим перемиканням живлення на живильну мережу.

ПОСТАНОВИЛИ:

- результати роботи з теми ГП-415 відповідають календарному плану та технічному завданню у повному обсязі;
- науково-технічний рівень розробок відповідає сучасному рівню науки та техніки, робота має високе теоретичне та практичне значення;

- матеріали, що викладені в звіті, не містять відомості, які можуть бути віднесені до державної таємниці;
- заключний звіт з теми ГП-415 схвалити та рекомендувати до затвердження.

Завідувач кафедри, проф.

О.С.Бешта

Вчений секретар, ст. викл.

С.Б.Савченко

ВИТЯГ

з протоколу №2

засідання секції науково-технічної ради університету за науковим напрямом
“Проблеми гірничої та металургійної електроенергетики, енергозбереження”

м. Дніпропетровськ

11 грудня 2009 р.

ПРИСУТНІ: голова секції, проф. Іванов О.Б., професори Шкрабець Ф.П., Казачковський М.М., Випанасенко С.І., Корсун В.І., вчений секретар доц. Рухлов А.В.

СЛУХАЛИ: провідного наукового співробітника теми ГП-415 “Дослідження режимів та розробка енергоефективного електрообладнання підприємств гірничо-металургійного комплексу” Казачковського М.М. про виконану роботу за темою, який повідомив, що роботу виконано у повному обсязі, згідно з календарним планом та технічним завданням.

Основними результатами виконання НДР є:

- запропоновано систему регулювання активним випрямлячем з релейно-векторним регулятором струму, досліджено роботу регулятора напруги при коливанні напруги мережі, реверсі струму ланки постійного струму, розроблено та досліджено експериментальний стенд з активним випрямлячем;
- проведено аналіз відомих методів та засобів визначення порушень рухомого струмоznімального контакту струмоприймачів, електромагнітних процесів при дугоутворенні, розроблено метод виявлення дугоутворення з використанням інфрачервоних світло діодів, запропоновано принцип та систему придушення дугоутворення транспортних засобів з рухомим струмоznімальним контактом;
- теоретично обґрунтовано та розроблено спосіб селективного визначення параметрів ізоляції електричної мережі відносно землі під напругою, розроблено алгоритми та запропоновано функціональну схему системи автоматичної компенсації складових струму однофазного замикання на землю;
- здійснено математичне моделювання різних способів пуску двигуна компресора, розроблено рекомендації щодо алгоритму керування нерегульованого приводу компресора при частотному пуску із подальшим перемиканням живлення на живильну мережу.

ВИСТУПИЛИ: проф. Корсун В.І. та Випанасенко С.І., які дали позитивну оцінку результатів роботи за темою ГП-415, зазначили, що роботу виконано у повному обсязі, відповідно із календарним планом та технічним завданням. Проф. Корсун В.І. та Випанасенко С.І. рекомендували затвердити заключний звіт з НДР.

ПОСТАНОВИЛИ:

- результати роботи з теми ГП-415 відповідають календарному плану та технічному завданню у повному обсязі;

- науково-технічний рівень розробок відповідає сучасному рівню науки та техніки, робота має високе теоретичне та практичне значення;
- матеріали, що викладені в звіті, не містять відомості, які можуть бути віднесені до державної таємниці;
- заключний звіт схвалити та рекомендувати до затвердження.

Голова секції, проф.

О.Б.Іванов

Вчений секретар, доц.

А.В.Рухлов

РЕЦЕНЗІЯ

на заключний звіт з держбюджетної науково-дослідної роботи ГП-415
на тему

“ Дослідження режимів та розробка енергоефективного електрообладнання підприємств гірничо-металургійного комплексу”

Предметом НДР є дослідження та обґрунтування енергоефективних режимів електрообладнання промислових підприємств. У звіті розглянуті питання контролю ізоляції і обмеження аварійних струмів у високовольтних мережах гірничих підприємств, надійності та безпеки систем електроспоживання транспортних засобів з рухомими струмознімальними контактами, визначення раціональних режимів роботи і розробки енергозберігаючого приводу компресорів кар’єрних бурових верстатів, енергоефективного векторного керування активними випрямлячами частотно-керованих електроприводів.

Протягом виконання роботи отримані наступні результати:

- Запропоновано релейно-векторну систему регулювання активним випрямлячем, яка забезпечує зменшення числа комутацій ключів та підвищує точність регулювання струму. Встановлено, що при зниженні напруги мережі на 10% і більш рівень струмообмеження регулятора напруги АВ повинен бути збільшений на 11-12% і більше в порівнянні з рівнем струмообмеження регулятора швидкості двигуна. Відповідно повинна бути збільшена потужність силової схеми АВ.
- Проведено аналіз відомих методів та засобів визначення порушень рухомого струмознімального контакту струмоприймачів, електромагнітних процесів при дугоутворенні, розроблено метод виявлення дугоутворення з використанням інфрачервоних світло діодів, запропоновано принцип та систему придушення дугоутворення транспортних засобів з рухомим струмознімальним контактом;
- Теоретично обґрунтовано та розроблено спосіб селективного визначення параметрів ізоляції електричної мережі відносно землі під напругою, розроблено алгоритми та запропоновано функціональну схему системи автоматичної компенсації складових струму однофазного замикання на землю.
- Виходячи з існуючих умов експлуатації шарошkových бурових верстатів та впровадження бурових верстатів нового покоління з покращеними енергетичними показниками, виникає необхідність у зниженні енергоспоживання компресорної установки, приводний двигун якої є найбільш потужним споживачем електричної енергії. Найбільша потужність споживається під час пуску привода, тому виникає необхідність її зниження шляхом частотно-керованого пуску привода.
- В результаті імітаційного моделювання електроприводу компресора верстату шарошкового буріння були встановлені величини, що впливають на зміну струму статора при перемиканні двигуна з перетворювача частоти на мережу, розроблено рекомендації щодо алгоритму керування нерегульованого приводу

компресора при частотному пуску із подальшим перемиканням живлення на живильну мережу.

Проблеми, що вирішуються в проекті, та методи, які при цьому використовуються, відповідають світовим тенденціям досліджень у галузі підвищення енергоефективності промислового електрообладнання.

Пропозиції, розроблені в межах даного проекту, можуть бути використані:

- в частотно-керованих електроприводах змінного струму з частими рекуперативними режимами;
- в силових активних фільтрах;
- в системах релейного захисту електричних мереж напругою понад 1000 В;
- в електрифікованих транспортних засобах з рухомим струмознімальним контактом;
- в електроприводах верстатів шарошкового буріння.

Результати проекту можуть бути використані компаніями, які працюють у галузі електронної та електротехнічної промисловості, енергетики, гірничодобувної промисловості, у навчальному процесі кафедр електропривода, електричних машин та систем електропостачання.

Таким чином, тематика виконаної НДР актуальна, результати, отримані виконавцями, мають наукову новизну та практичну цінність.

Завідувач кафедри автоматизованого електроприводу Дніпропетровського Національного технічного університету залізничного транспорту,

д-р техн. наук, проф.

Л.В.Дубінець