

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення та дослідження автоматизованої системи
управління та автоматики безпеки насосної станції

Виконали: студенти VI курсу, групи КАМ-61
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва спеціальності)

	(підпис)	Довжанин В. В. (прізвище та ініціали)
	(підпис)	Довжанин Я. М. (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Савків В.Б. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Дмитрів О.Р. (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	Савків В.Б. (прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	Голотенко О.С. (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Анотація

Кваліфікаційна робота містить 111 сторінок пояснювальної записки та 12 аркушів графічної частини, складається з шести розділів.

Метою даної роботи є розроблення дослідження автоматизованої системи управління та автоматики безпеки насосної станції.

Тема кваліфікаційноюї роботи відповідає вимогам сучасності так як від надійності роботи насосної станції, і зокрема системи управління електроприводами насосів, залежить якість водопостачання, а від регулювальних характеристик - енерговитрати.

Об'єкт керування забезпечує так звану ступінчасту подачі води на насосній станції, коли вода подається різною кількістю насосів в різний час доби згідно графіка.

У роботі проведено аналіз надійності та динамічних характеристик системи керування.

Зміст

Анотація	4
ВСТУП.....	8
1 Аналітична частина.....	11
1.1 Аналіз сучасного етапу розвитку засобів автоматизації управління тиристорними перетворювачами силових установок.....	11
1.2 Обґрунтування актуальності автоматизації управління тиристорними перетворювачами насосної станції.....	18
2. Технологічна частина.....	23
2.1 Загальна характеристика об'єкту управління та сфери його застосування.....	23
2.2 Основні технічні характеристики насосної станції.....	24
3 Науково-дослідна частина.....	28
3.1 Розроблення математичної моделі автоматизованої системи управління	28
3.2 Формалізований опис функцій управління.....	30
3.3 Вибір оптимальної компонувальної схеми автоматизованої системи управління	33
4 Конструкторська частина	35
4.1 Загальний опис роботи системи управління.....	35
4.2 Аналіз експлуатаційних характеристик блоків автоматизованої системи управління тиристорними перетворювачами	37
4.3 Будова та принцип роботи збуджувача	38
4.4. Розроблення, перевірочний розрахунок та опис принципу роботи тиристорного перетворювача	41
4.4.1 Вибір типу та обґрунтування застосування схеми тиристорних перетворювачів	41

4.4.2 Розрахунок тиристорів та вибір захисту тиристорного перетворювача.....	41
4.4.3 Розрахунок та підбір вирівнювальних реакторів для реверсивної схеми.....	46
4.4.4 Складання рівнянь динаміки силової частини електроприводу.....	48
4.5 Розроблення автоматизованої системи управління	50
4.5.1 Розроблення та опис принципу роботи фазово-імпульсного блоку.....	50
4.5.2 Розроблення та опис принципу роботи блоку автоматичного регулятора збудження (АРЗ)	51
4.5.3. Розроблення та опис принципу роботи блоку управління, обмеження та захисту	58
4.5.4 Схема пуску та увімкнення збудження по струму статора	64
4.5.5 Будова та опис принципу роботи блоку живлення	65
4.6. Розрахунок надійності системи управління тиристорним перетворювачем	67
4.7 Розроблення тест-плати для виявлення несправностей в автоматизованій системі управління	73
4.8 Розроблення системи імпульсно-фазового керування та опис її принципу роботи.....	75
5 Спеціальна частина	82
5.1 Розроблення укрупненого алгоритму роботи системи керування	82
5.2 Моделювання та побудова статичних швидкісних характеристик розімкненої та замкненої системи автоматичного регулювання в середовищі MathCAD.....	82
6 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	91
6.1 Заходи з охорона праці.....	91
6.1.1 Вплив електричного струму на людину.....	97
6.1.2. Розрахунок місцевої витяжної вентиляції при пайці друкованої плати.....	100

6.1.3. Розробка заходів безпеки у спроектованих конструкціях.....	101
6.2 Заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях.	103
6.2.1 Радіаційний захист населення в надзвичайних ситуаціях.....	103
6.2.2 Режими радіаційного захисту та порядок впровадження їх в дію.	106
Висновки	111
Перелік посилань	112

ВСТУП

В даний час автоматизація все більше проникає у всі галузі народного господарства. Широке впровадження автоматизації у всі області техніки стало можливим завдяки таким основним факторам, як високий темп роботи, широке керування виробництвом, можливість довготривалої роботи та роботи у шкідливих умовах.

Але основна мета автоматизації полягає у повній заміні людини при виконанні технологічного процесу автоматизованими пристроями, в їх числі і системами керування.

Електроприводом називають електромеханічну систему, що забезпечує перетворення електричної енергії на механічну та дає змогу здійснювати електричне керування отриманим рухом. До його електричної частини входять один або кілька електродвигунів, а також система керування ними.

Автоматизоване керування електроприводом забезпечує підтримання заданих режимів роботи у статичних та динамічних умовах відповідно до вимог технологічного процесу й виконується без безпосереднього втручання оператора.

У сучасних електроприводних системах усе ширше застосовуються програмно-керовані комплекси, які працюють автономно й здатні забезпечувати обробку складних деталей як на окремих верстатах, так і на цілих автоматизованих лініях.

Використання таких систем дозволяє істотно знизити трудові та енергетичні витрати, прискорити виробничі операції та перейти від автоматизації окремих машин до комплексної автоматизації цехів і підприємств у цілому.

Автоматизовані електроприводи забезпечують зростання енергоефективності водопостачання, зменшують собівартість питної води,

покращують її якість та знижують потребу у виробничих площах. Робота персоналу при цьому стає більш кваліфікованою.

Одним із важливих напрямів розвитку є створення нових систем керування для простих і недорогих електроприводів на базі асинхронних двигунів. Це включає впровадження систем частотного та фазово-імпульсного регулювання, використання магнітних підсилювачів та нових типів електродвигунів, а також розвиток релейних та імпульсних методів регулювання.

Застосування тиристорних перетворювачів і напівпровідникових схем керування дало змогу не тільки покращити низку техніко-економічних показників, але й реалізувати нові принципи керування, які раніше були технічно або економічно недоцільними. Особливо це стосується електроприводів змінного струму, де впровадження нових алгоритмів керування забезпечило створення високонадійних систем із відмінними статичними та динамічними характеристиками. Сьогодні такі системи широко застосовуються у промисловості та транспорті.

Проектування й експлуатація тиристорних електроприводів змінного струму потребують ґрунтовного знання мікроелектроніки, вимірювальних технологій, теорії автоматичного керування та суміжних дисциплін, а також вимагають від інженера творчого й системного підходу до автоматизації виробничих процесів.

Тиристорні електроприводи набули значного поширення в промисловості. У типовому випадку регульований електропривод представлений двигуном постійного струму, який живиться від тиристорного перетворювача й керується електронною системою керування.

Потужність таких приводів варіюється від часток кіловат до кількох тисяч кіловат. Найпоширенішими сферами їх використання є прокатні стани, текстильне виробництво, вентиляторні установки та транспортні механізми.

1 Аналітична частина

1.1 Аналіз сучасного етапу розвитку засобів автоматизації управління тиристорними перетворювачами силових установок

У насосних станціях широко використовуються тиристорні перетворювачі, оскільки вони дозволяють плавно запускати потужні електродвигуни, регулювати їхню швидкість і забезпечувати енергоефективний режим роботи [2, 3]. Найчастіше тиристори застосовують у системах живлення асинхронних і синхронних двигунів, що приводять у дію великі насосні агрегати, тому перетворювачі поділяють насамперед за їхнім призначенням та характером роботи з навантаженням.

У простіших випадках використовують тиристорні пускачі, які призначені не для повноцінного регулювання, а для пом'якшення пускових струмів. Вони обмежують механічні та електричні навантаження під час розгону, що особливо важливо для насосів великого діаметра, де різкий пуск може викликати гідравлічні удари. Такі пристрої відкривають тиристори з певним запізненням за фазою, поступово підвищуючи напругу на двигуні. Після виходу на номінальний режим вони зазвичай шунтуються і не беруть участі в подальшій роботі електропривода.

Коли потрібне не лише плавне вмикання, а й регулювання продуктивності насоса, застосовують більш складні тиристорні регулятори напруги та перетворювачі частоти. Регулятори напруги зазвичай використовуються з асинхронними двигунами з фазним ротором або в тих випадках, коли потрібен невеликий діапазон регулювання. Вони змінюють величину напруги шляхом фазового керування тиристорами і тим самим впливають на момент електродвигуна та витрату насоса. Це досить прості

пристрої, але вони мають обмеження – при суттєвому зниженні напруги помітно падає ККД, зростають пульсації та гармоніки в мережі.

Найбільш універсальними є тиристорні перетворювачі частоти, які виконують послідовні перетворення «АС–DC–АС». Спочатку керований випрямляч на тиристорах формує постійний струм, а далі інвертор, також побудований на тиристорах, генерує змінну напругу потрібної частоти та амплітуди. Такі системи використовують у потужних насосних станціях, де потрібно точно регулювати напір, підтримувати стабільний тиск у магістралі або зменшувати енерговитрати при роботі на часткових навантаженнях. Перетворювачі частоти на тиристорах традиційно застосовувалися в приводах потужністю до кількох мегават, хоча нині їх частково замінюють IGBT-інвертори; однак тиристорні варіанти залишаються актуальними для найпотужніших насосних агрегатів.

Окрему групу становлять керовані тиристорні випрямлячі, які призначені не для живлення основного двигуна, а для системи його збудження (зазвичай у синхронних машин). У таких схемах випрямлячі можуть бути одно- або двонапрямними, що дозволяє точно керувати струмом збудження та моментом двигуна під час пуску і в перехідних режимах.

Якщо говорити про те, як реалізовані силові схеми, то найбільш типовими є мостові 6- та 12-імпульсні конфігурації, які забезпечують помірний рівень пульсацій і добру сумісність із промисловою мережею. У випадку великих потужностей (декілька тисяч кіловат) блоки тиристорів можуть включатися паралельно або послідовно, що дозволяє витримувати великі струми і високі напруги. Раніше в окремих насосних станціях застосовували циклоконвертори, що безпосередньо перетворюють змінну напругу однієї частоти в іншу без проміжного випрямлення, але такий варіант сьогодні зустрічається рідко.

Інша ознака, за якою можна охарактеризувати тиристорні перетворювачі, – це спосіб керування тиристорами. Найпоширенішим

лишається фазове керування, за якого змінюють кут відкривання α . Сучасні системи застосовують імпульсно-фазові методи, зворотний зв'язок за струмом і напругою, а також алгоритми, що оптимізують роботу двигуна в реальному часі. Завдяки цим функціям насосна станція отримує стабільний пуск, плавне регулювання витрати та зменшені втрати електроенергії.

Також перетворювачі розрізняють за реверсивністю. У більшості насосних станцій двигуни працюють лише в одному напрямку, тому застосовують неререверсивні схеми. Ререверсивні тиристорні мости потрібні лише тоді, коли необхідне активне гальмування або специфічні режими керування моментом, що у насосній техніці трапляється рідко.

Важливе значення має система охолодження. На потужностях до приблизно 500–700 кВт тиристорні модулі часто охолоджуються повітрям. Для більших приводів використовують рідинне охолодження, інколи – із використанням теплообмінників або спільних контурів з трансформаторами, що дозволяє підтримувати надійність у важких умовах роботи насосної станції.

У сучасних підприємствах тиристорні перетворювачі інтегруються у системи автоматизації насосних станцій. Вони можуть підтримувати обмін через промислові протоколи, виконувати самодіагностику і працювати за адаптивними алгоритмами регулювання. Це робить їх не просто силовими пристроями, а частиною загального комплексу керування гідравлічним обладнанням.

Сучасні насосні станції, у яких застосовуються тиристорні перетворювачі для керування електродвигунами, дедалі частіше оснащуються розвиненими системами автоматизації, що поєднують силову електроніку із цифровими контролерами та засобами диспетчеризації. Замість традиційних локальних регуляторів зараз використовують програмовані контролери, які не лише формують сигнали керування

тиристорами, а й беруть на себе всю логіку пуску, зупинки та адаптивного регулювання роботи насосів.

Такі PLC безперервно отримують дані від датчиків тиску, рівня, витрати та температури, аналізують їх у режимі реального часу і відповідно змінюють кут відкривання тиристорів або параметри перетворювача, забезпечуючи плавний пуск, оптимальну швидкість двигуна і захист від аварійних режимів.

Важливо те, що сучасні системи використовують ПІД-алгоритми та різні варіанти зворотних зв'язків, завдяки чому робота насоса автоматично підлаштовується під зміну навантаження в трубопроводі, а тиск у мережі тримається на постійно заданому рівні без участі оператора.

Окрім цього, тиристорний перетворювач уже давно перестав бути “закритим” пристроєм: він інтегрується в єдину інформаційну мережу насосної станції через Modbus, Profibus або Ethernet-протоколи, що дає змогу SCADA-системам відстежувати струм, напругу, температуру модулів, кількість спрацювань захистів, наявність перегріву чи перекосу фаз та відразу повідомляти про відхилення [4].

Такі засоби моніторингу поєднані з функціями самодіагностики – перетворювач сам аналізує якість живлення, ступінь нагріву силових модулів і навіть прогнозує можливі відмови.

У випадку каскадної роботи кількох насосів сучасні алгоритми дозволяють автоматично вибирати, який насос буде основним, а який – резервним, а сам тиристорний перетворювач узгоджує свою роботу з іншими приводами через контролер. Завдяки цьому станція працює енергоефективніше: при низькому водорозборі двигун переходить на часткову потужність, а при пікових навантаженнях вводяться додаткові агрегати.

Дистанційне керування і повна диспетчеризація стали стандартом: оператор може контролювати перетворювачі та насоси з центрального пункту або навіть через віддалений доступ. Усе це разом перетворює старі

тиристорні схеми на гнучку, інтелектуальну систему електропривода, яка автоматично оптимізує роботу насосної станції, підвищує її надійність і суттєво знижує енергоспоживання.

У сучасних тиристорних перетворювачах, що працюють у системах приводу насосних станцій, керування вже давно перестало бути просто подаванням імпульсів на силові клапани. Зараз це цілий комплекс алгоритмів, які фактично «ведуть» привід у всіх режимах – від пуску й стабілізації тиску до роботи в перехідних режимах або під час зміни навантаження мережі [12, 13, 14].

Зазвичай усе починається з алгоритмів визначення кута керування тиристорів, адже саме він задає рівень випрямленої напруги. Керування побудоване так, щоб кут реагував не просто на одну величину, а на змішаний набір сигналів – струм, швидкість двигуна, тиск у трубопроводі, частоту мережі, навіть швидкість зміни навантаження. Класичний принцип – порівняння з опорною величиною і плавна зміна кута, щоб уникнути ривків.

Коли насосний агрегат запускається, система переходить у режим плавного розгону. Алгоритм контролює, щоб двигун виходив на режим без кидків струму й без різких змін моменту. У тиристорних схемах це роблять через повільне зменшення кута керування від максимальної затримки до робочого значення – фактично створюючи «електронну м'яку пускову криву». При цьому паралельно працює обмеження струму: якщо навантаження раптово збільшується, генератор імпульсів автоматично сповільнює зменшення кута.

Для підтримання стабільного тиску або витрати води часто застосовують регулятори швидкості та моменту. Реалізуються вони цифровими ПІ- або ПІД-алгоритмами, які працюють у режимі постійного коригування кута керування. Перетворювач бере сигнал з датчика тиску, через контролер трансформує його у необхідну температуру робочої точки, після чого через модуль керування тиристорами впливає на напругу

двигуна. Такий “замкнений цикл” забезпечує саморегулювання: насос тримає стабільний режим навіть при зміні гідравлічного опору або рівня води.

У системах, де двигун під час роботи може переходити в генераторний режим (наприклад, при гальмуванні потоку чи інерційних процесах), застосовують алгоритми рекуперації [15, 16, 17]. Тиристорний міст змінює напрямок потоку енергії і повертає надлишок у мережу. Тут важливим є алгоритм синхронізації з мережею, який забезпечує правильний момент включення тиристорів, щоб не викликати збоїв або кидків напруги.

У випадку аварійних ситуацій – перегрів, перенапруга, обрив фази, надмірний струм – активуються алгоритми швидкого відсікання. Вони працюють поза основним циклом регулювання: контролер миттєво блокує подачу імпульсів або переводить систему в безпечний режим, інколи з комутацією на байпас або резервний привід.

Ще одна важлива частина – це алгоритми фільтрації та компенсації спотворень. Тиристорні схеми традиційно генерують гармоніки, тому контролер постійно коригує форму струму та слідкує за кутовими зсувами між фазами. Частина компенсації – програмна: обчислюється оптимальний момент подавання імпульсу, щоб мінімізувати гармонійні складові. Частина – апаратна, але алгоритмами керується також.

У цифрових тиристорних системах, що сьогодні найчастіше застосовуються на насосних станціях, усе це об’єднано в адаптивні алгоритми, які здатні самі підлаштовуватися під насос і навіть під «характер» водопровідної мережі. Наприклад, система може аналізувати, як часто відбуваються коливання тиску, і коригувати ПІД-параметри, щоб працювати стабільніше.

У підсумку такі перетворювачі фактично виконують роль інтелектуального керівного ядра насоса – вони не просто подають напругу на двигун, а формують оптимальний режим роботи всієї насосної станції.

У промислових насосних станціях нині можна зустріти різні системи керування тиристорними перетворювачами, і більшість із них виросли з тих рішень, які використовувалися ще в 80–90-х роках, але з часом отримали сучасні цифрові системи керування. Наприклад, на багатьох українських водоканалах досі працюють старі Siemens SIMOREG, зокрема 6RA24 або 6RA70, які колись ставили на двигуни потужністю 250–630 кВт. Вони мають репутацію дуже надійних: навіть коли мережа просідає або фази «пливуть», ці приводи продовжують стабільно керувати насосами, плавно піднімаючи чи опускаючи тиск.

Подібна ситуація з ABB [1], обладнання серії DCS400 чи DCS800 часто монтувалось на вітчизняних підприємствах. Їх цінують за дуже точну синхронізацію з мережею та гарну роботу ПІД-регуляторів [18, 19, 20], особливо у складних перехідних режимах, коли навантаження на насос раптово змінюється, або коли вода в системі починає створювати гідравлічні удари.

У Європі досить поширені Schneider Electric (Télémécanique THYRIS), у яких цифрова частина спроектована так, що перетворювач легко інтегрується в SCADA через Modbus чи Profibus. Для операторів водоканалів це дуже зручно, тому що вони можуть бачити не тільки стан двигуна, а й окремо температуру силових тиристорів, форму струму, графіки навантаження.

Поруч з ними можна зустріти й Eurotherm 590+, які часто ставлять там, де важливо, щоб пуск був максимально плавним – наприклад, на насосах подачі рідин у хімічній промисловості. У них дуже добрий алгоритм синхронізації та регулювання кута, тому навіть при різкому стрибку тиску система не реагує ривком, а акуратно перерозподіляє навантаження.

Ще одна група систем – це Emerson / Control Techniques Mentor і Mentor MP. Їх ставили і на водоканалах, і на вентиляторах у тепловій енергетиці. Їхня особливість у тому, що вони дозволяють програмувати

власні алгоритми керування, що особливо корисно для великих насосних станцій, де потрібні нестандартні режими: скажімо, підтримання напору в умовах непередбачуваних коливань у трубопроводі або узгодження роботи кількох паралельних насосів.

У нашій промисловості такі системи можна знайти на тепломережах, у металургії (наприклад, ArcelorMittal), у великих оборотних системах охолодження або водопостачання [21, 22, 23, 24]. На багатьох підприємствах ці приводи працюють з двигунами потужністю 1–2 МВт, і часто їх не замінюють на частотні приводи лише тому, що тиристорні схеми краще переносять коливання мережі та здатні працювати з великими інерційними механізмами.

Сучасні модифікації таких тиристорних систем вже мають інтегровані інтелектуальні модулі: вбудовані адаптивні регулятори, автоматичне налаштування параметрів під конкретну насосну характеристику, синхронізацію, реалізовану через високошвидкісні цифрові модулі або FPGA, компенсацію гармонік і повноцінні Ethernet-інтерфейси для роботи зі SCADA чи диспетчерськими системами.

Усе це робить тиристорні перетворювачі і зараз актуальними для насосних станцій великої потужності, навіть попри широку доступність інверторних частотних приводів. Якщо треба, можу подати це у більш академічній формі або з прикладами схем підключення.

1.2 Обґрунтування актуальності автоматизації управління тиристорними перетворювачами насосної станції

Енергетична ефективність роботи потужних насосних станцій (продуктивністю десятки тисяч м³/добу) значною мірою визначається надійністю електроприводів насосних агрегатів. Для двигунів потужністю

500 кВт і вище, особливо синхронного типу, критичним елементом є система керування збудженням.

Сучасні тенденції вимагають переходу від аналогових регуляторів до цифрових систем, здатних забезпечити не лише стабілізацію напруги, а й оптимізацію реактивної потужності ($\cos\phi$), безударний пуск та інтеграцію в єдину систему автоматизованого диспетчерського керування (SCADA).

Існуючі аналогові системи керування часто не забезпечують необхідної швидкодії при аварійних збуреннях та не дозволяють інтегрувати агрегат у SCADA-систему підприємства.

Основним завданням кваліфікаційної роботи є вдосконалення структури та алгоритмів функціонування тиристорної системи збудження (ТСЗ) для насосних агрегатів [25, 26, 27, 28].

Розглянута система базується на принципах підпорядкованого регулювання координат електроприводу і складається з функціональних модулів, що реалізують як силову комутацію, так і логічну обробку сигналів.

Система керування реалізована за блочно-модульним принципом і складається з чотирьох функціонально незалежних вузлів, взаємодія яких забезпечує повний цикл керування синхронною машиною.

Блок автоматичного регулювання (блок А) - формує закон керування струмом збудження в функції параметрів статора (напруги, струму) для підтримки заданого коефіцієнта потужності.

Блок логіки, обмеження та захисту (блок Б) - виконує функції арбітра, визначаючи пріоритетність сигналів керування (ручний/автоматичний/аварійний) та реалізує захисні алгоритми.

Фазоімпульсний перетворювач (блок В) - безпосередньо формує імпульси відмикання тиристорів, перетворюючи аналоговий сигнал керування у фазовий кут α .

Блок живлення та синхронізації (блок Г) - забезпечує гальванічну розв'язку та формування опорної напруги.

Керування силовими тиристорами здійснюється через суматор сигналів, куди надходять команди від автоматичного регулятора (блок А) або від потенціометра ручного задавання через перемикач режимів. В основу роботи покладено фазовий метод керування випрямлячем.

Регульовальна характеристика системи має інверсний характер:

$$I_f = f(U_{кер}) = K \cos(\alpha_0 + k U_{кер}).$$

Згідно з алгоритмом роботи блоку В, збільшення керуючої напруги призводить до збільшення кута фазового зсуву імпульсів α . Оскільки вихідна напруга випрямляча пропорційна $\cos \alpha$, збільшення кута призводить до зниження напруги збудження і, відповідно, до зменшення струму ротора. Ця особливість вимагає інвертування сигналу в контурі зворотного зв'язку регулятора.

Для забезпечення стійкої комутації тиристорів критично важливою є точна синхронізація з мережею живлення. У розробленій системі синхронізуюча напруга формується в блоці живлення таким чином, що вона має фазовий зсув у 30° відносно вторинної напруги силового трансформатора [29, 30, 31, 32]. Це дозволяє компенсувати апаратні затримки у формувачах імпульсів та забезпечити симетрію фаз.

Специфіка насосного навантаження вимагає особливого підходу до захистів. Система реалізує багаторівневий захист. Захист від перевантаження (обмеження струму ротора), реалізовано як залежну характеристику витримки часу.

Давач струму ротора побудовано на базі трьох трансформаторів струму Т2...Т4, увімкнених у вторинне коло Т1, сигнал з яких випрямляється діодним мостом.

При перевищенні уставки струму система не просто відключає двигун, а спочатку намагається зменшити струм збудження, збільшуючи кут α .

Час спрацювання захисту зворотно пропорційний кратності перевантаження

$$t \propto 1/I^2,$$

що дозволяє використовувати теплову ємність обмоток для короточасних форсувань.

Випадіння з синхронізму є найбільш небезпечним режимом. Алгоритм захисту від асинхронного ходу базується на контролі змінного струму в колі збудження.

При асинхронному ході в обмотці ротора індукується ЕРС ковзання, що викликає протікання змінного струму через пусковий опір. Цей струм фіксується герконовим реле, яке подає сигнал на аварійне відключення або ресинхронізацію.

При відключенні агрегату система автоматично переводиться в інверторний режим ($90^\circ < \alpha < 150^\circ$). Енергія, накопичена в індуктивності обмотки збудження, рекуперується в мережу, що забезпечує швидку зупинку електромагнітних процесів та захищає ізоляцію ротора від перенапруг.

Пуск потужного синхронного двигуна насоса є складним електромеханічним процесом. Реалізовано комбінований алгоритм керування пуском: пуск по струму; реакторний пуск; пуск у функції ковзання.

При пуску по струму контроль здійснюється трансформатором у колі статора. Поки пусковий струм перевищує уставку, подача імпульсів збудження блокується, двигун розганяється як асинхронний.

При реакторному пуску, для зниження просадок напруги використовується введення реактора в коло статора. Подача збудження відбувається з фіксованою витримкою часу після шунтування реактора.

Пуск у функції ковзання - це найбільш досконалий метод. Система вимірює частоту ЕРС, наведену в роторі. Збудження подається лише в момент, коли ковзання s знижується до критичного значення (вхід у підсинхронну зону), що гарантує успішне втягування в синхронізм без значних механічних ударів на валу насоса.

Алгоритм керування повинен передбачати циклічне опитування стану датчиків. Після ініціалізації та успішного проходження самодіагностики ("Тестування системи"), мікроконтролер перевіряє наявність напруги на силовому трансформаторі. Далі відбувається активація попередніх підсилювачів та подача відмикаючих імпульсів на тиристори.

Отже, запропонована структура системи керування тиристорним збуджувачем дозволяє реалізувати енергоефективні режими роботи синхронних двигунів насосних станцій.

Використання фазового методу керування в поєднанні з алгоритмами захисту від асинхронного ходу та функцією інвертування забезпечує високу живучість обладнання.

Подальший розвиток системи вбачається в інтеграції мікропроцесорних контролерів для реалізації цифрового обміну даними з АСУ ТП станції.

2. Технологічна частина

2.1 Загальна характеристика об'єкту управління та сфери його застосування.

Розроблювана система керування тиристорними перетворювачами електроприводів насосної станції повинна забезпечувати певну послідовність ввімкнення тиристорних перетворювачів шляхом керування подачею сигналів керуючої напруги з фазоімпульсного блоку на управляючі електроди тиристорів у відповідності з сигналами, які поступають від давачів.

Призначення об'єкту керування - забезпечення так званої ступінчастої подачі води на насосній станції, коли вода подається різною кількістю насосів в різний час доби згідно графіка, тобто виконання технологічного процесу подачі води.

Із свердловин вода по збірних трубопроводах подається в резервуари, які розміщені на території насосної станції. Насоси станції проводять закачування води в мережу. Система керування в даному випадку працює в автоматичному режимі.

Натискуючи перемикач ввімкнення системи керування починається процес подачі води, який по сигналу давача з блоку авторегулювання закінчується.

Система керування контролює виконання технологічного процесу, в разі збою пристрій переходить в аварійний режим роботи і відключає двигуни від мережі.

Насосні станції систем водопостачання є інженерним комплексом, що поєднує споруди та обладнання, функціонально призначене для гарантованої подачі води відповідно до виробничого попиту.

Структура та конструктивні параметри основного й допоміжного обладнання, а також його кількість, визначаються на основі принципів раціонального та комплексного використання водоресурсів, дотримання норм охорони навколишнього середовища та специфічних технологічних вимог, які ставить до станції її експлуатаційне призначення.

2.2 Основні технічні характеристики насосної станції

Проектується автоматизована система керування тиристорними електроприводами насосної станції.

Характеристики:

а) Потужність даної насосної станції становить 78 тис. м³/добу.

б) Насосна станція обладнана 5 насосами (3 робочих, 2 резервні) марки Д1250 - 125 - 3 шт.:

1) продуктивність - 1250 м³ в год.

2) підйом - 126 м вод. ст.

3) потужність двигуна - 630 кВт (двигуни високовольтні).

Д1250-105 - 2шт.

1) продуктивність - 1150 м³ в год.

2) підйом - 105 м вод. ст.

3) потужність двигуна - 500 кВт (двигуни високовольтні).

Резервуари чистої води:

1000 м³ - 2 шт.

6000 м³ - 1 шт.

Креслення загального вигляду машинного залу насосної станції представлено в графічній частині роботи

Схема розміщення головних споруд водопроводу

Повна висота підйому насосів станції першого підйому визначається з умови подачі води в відповідності з прийнятою схемою водопостачання.

Схема подачі води коли вона подається на очисні споруди чи в систему водопостачання показана на рисунку 2.1.

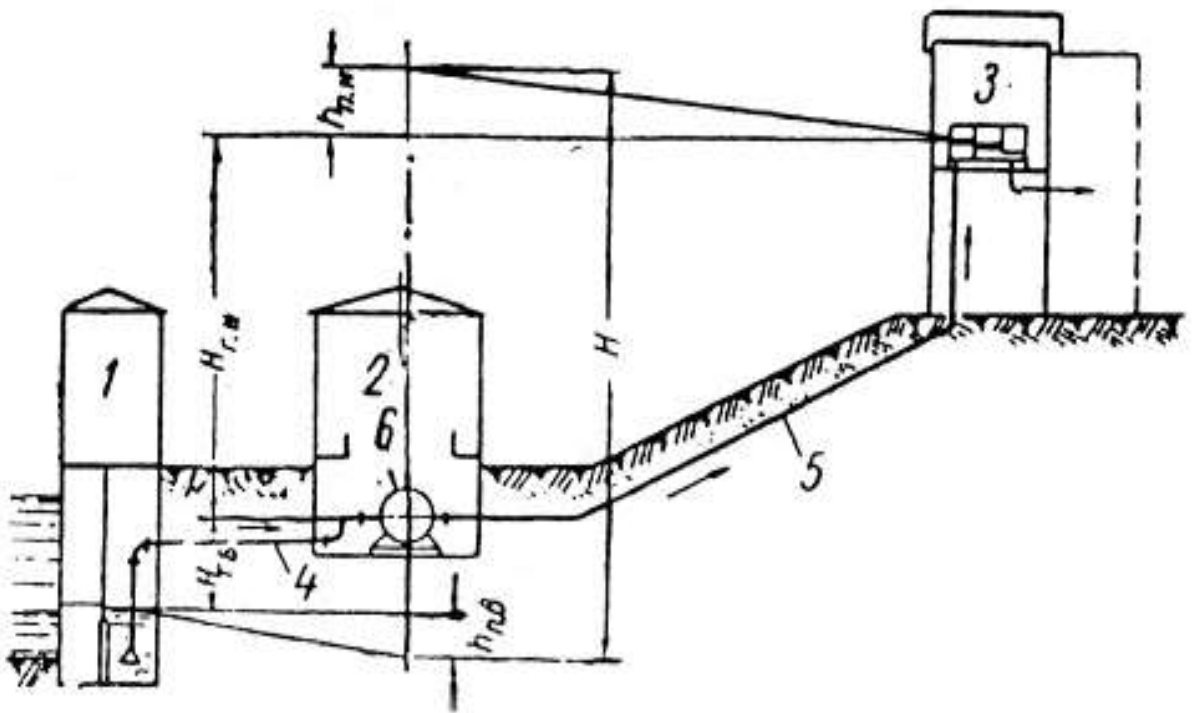


Рисунок 2.1 – Схема розміщення головних споруд водопроводу.

1 – водоприймач; 2 – насосна станція; 3 – очисні споруди;
4 – всмоктуючий трубопровід; 5 – напірний трубопровід; 6 – насос.

Функціонування насосної станції при різних режимах роботи.

Графік роботи насосної станції (в осінній період):

з 6 до 9 год. та з 18 до 23 год. - працює 5 насосів, тиск в водопроводі від 6,6 до 6 атм (заповнення робочих резервуарів водою;

з 9 до 18 год. - працює 2 насоси, тиск в водопроводі від 4,6 до 4 атм;
з 23 до 6 год. - працює 2 або 1 насос (залежить від завантаженості).

Режими роботи насосної станції.

Режими роботи насосної станції, а відповідно їх кількість і продуктивність залежать від графіка водоспоживання, який в різний час доби та різні пори року - різний.

На даній насосній станції застосовується так звана ступінчаста подача води - подача, при якій в різний час доби працює різне число насосів в залежності від водоспоживання.

На рис. 2.2 представлено графік, на якому показані характеристики роботи одного і двох однакових насосів сумісно з однією і двома однаковими нитками водопроводів (лінії 1 і 2) при подачі різних розходів.

Точки А, Б, В і Г фіксують умови сумісної роботи.

Виходячи з вище перерахованого, розроблювана система керування електродвигунами повинна забезпечувати такі показники:

- а) продуктивність - 78 тис. м³/год.;
- б) почергове ввімкнення насосів;
- в) три режими роботи насосної станції в залежності від пори року та часу доби;
- г) перепад тиску в межах ± 3 атмосфери.

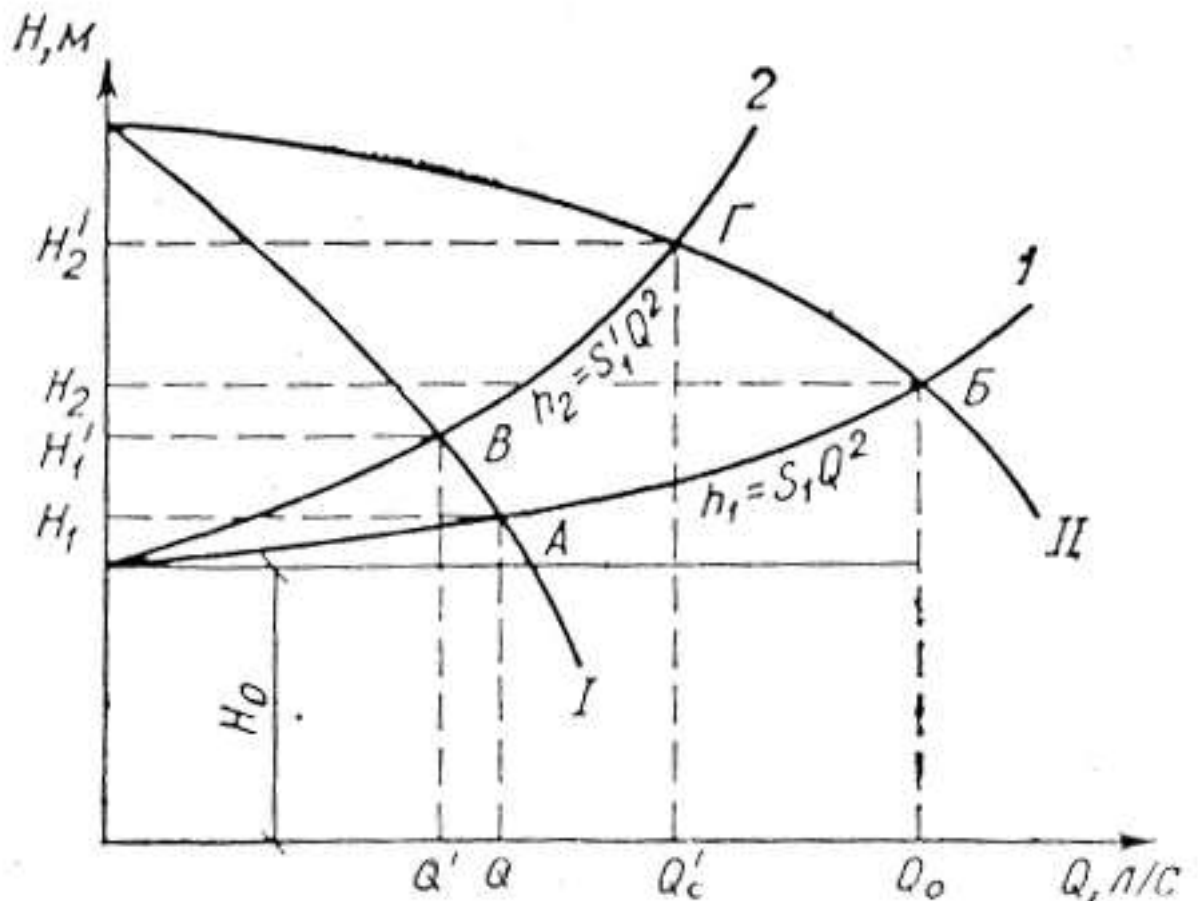


Рисунок 2.2 – Графік суміжної роботи насосів

I - характеристика роботи одного насоса; II - те ж, двох насосів при паралельній роботі; 1 - характеристика водоводу з опором S_1 ; 2 - те ж, при збільшенні опору до S_1' ; А - точка найбільш економічної роботи одного насоса при опорі S_1 ; Б - те ж, при паралельній роботі двох насосів; В і Г - те ж, при збільшенні опору до S_1' ; H_0 - геометрична висота підйому; H_1 , H_2 , H_1' , H_2' - напори в точках А, Б, В і Г.

3 Науково-дослідна частина

3.1 Розроблення математичної моделі автоматизованої системи управління

Система управління складається з чотирьох блоків.

Складові частини системи регулювання і основні елементи системи електропостачання представлені в графічній частині кваліфікаційної роботи [33, 34, 35, 36].

Всі елементи даного блоку є стандартними і приведені в переліку елементів.

Система регулювання складається з синхронного двигуна М, тиристорного збуджувача ТЗб, що живиться від силового трансформатора Т1 і керується фазоімпульсним пристроєм (ФІП) "запалювання" тиристорів і регулятора АРЗ.

Регулятор складається з:

- а) підсилюючого пристрою, який включає сумуючий підсилювач напруги ПН і підсилювач струму ПС;
- б) функціональних перетворювачів у вигляді давача статичного режиму ДСРж, який формує сигнали параметрів регулювання;
- в) вимірювальних пристроїв напруги статора і ротора двигуна.

Вимірювальний пристрій напруги статора являє собою давач напруги статора ДН, підключений через роздільний трансформатор Т6 до вимірювального високовольтного трансформатора Т13. Вимірювальний пристрій струму статора складається з давача струму ДСС.

Давач ДСС підключений до вимірювального трансформатора струму статора Т10. Вимірювальний пристрій струму ротора виконаний у вигляді давача струму ДСР, підключеного до вимірювальних

трансформаторів струму Т2, Т3, Т4 в колах живлення тиристорного збуджувача ТЗб.

Синхронний двигун М живиться від трансформатора підстанції Т, Паралельно до синхронного двигуна підключені суміжні електроприймачі СЕП (наприклад, асинхронні двигуни чи керуючі випрямлячі).

Тиристорний збуджувач живить обмотку збудження синхронного двигуна пульсуючою напругою, середнє значення якої визначається фазою імпульсів, що виробляються ФІП [37, 38].

Фаза імпульсів на виході ФШ задається напругою постійного струму, на виході ФІП - з допомогою підсилювача постійного струму ПС і підсилювача напруги ПН.

Підсилювач ПН сумує і підсилює зміну сигналів з виходів давачів ДСРж, ДН, ДСР. На вхід вказаних давачів подано сигнали змінного струму, виміряні з допомогою трансформаторів напруги чи струму у відповідних колах статора чи ротора.

Давач ДСС являє собою трансформатори струму з потенціометричними подільниками.

Давач ДН перетворює змінний струм в імпульси однієї полярності, які являють собою верхівки від'ємних півхвиль синусоїди.

Давач ДСРж використовується для вироблення сигналу постійного струму, величина якого пропорційна напрузі статора і одній з наступних величин:

- а) струму статора;
- б) реактивному струму статора;
- в) куту φ ;
- г) куту навантаження двигуна.

Отримання потрібного сигналу на виході давача ДСС забезпечується відповідною настройкою і положенням переминок на панелі перемикачів, яка знаходиться на одній платі з давачем напруги.

Давач ДСР перетворює сигнали змінного струму у керуючі сигнали постійного струму, при цьому їх величина пропорційна струму ротора.

Конструктивно частина функціональних елементів знаходиться в блоці А, який складається з трьох плат: АІ, А2, А4. На цих платах відповідно розміщені: давач ДСР, давач ДН, панель перемикачів і підсилювач ПН.

Підсилювач ПС знаходиться в блоці Б на платі Б1. Давач ДСР розміщений в блоці Г, вимірювальні і роздільні трансформатори - поза блоками.

3.2 Формалізований опис функцій управління

Існують кілька методів формалізованого описання процесу. Серед них можна виділити автоматичне описання та метод секвенції. В даній роботі проведемо формалізований опис процесу за допомогою автоматичного описання.

При автоматичному описанні представляють об'єкт у вигляді “чорного ящика” і до нього прикладають вхідні і вихідні сигнали.

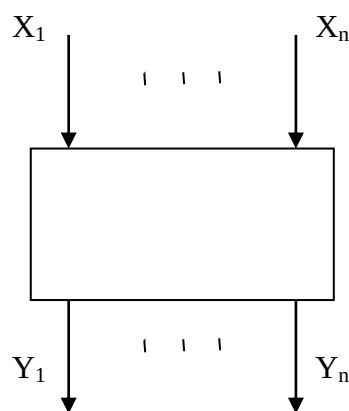


Рисунок 3.1 – Представлення об'єкта при автоматичному описанні

Внутрішнє функціонування об'єкту описується за допомогою внутрішніх станів пристрою. Важливим в цьому випадку є множина допустимих значень, які можуть приймати вхідні і вихідні сигнали.

Набір значень вхідних і вихідних сигналів визначається поліномом такого виду:

$$x_1 \cdot 2^n + x_2 \cdot 2^{n-1} + \dots + x_n \cdot 2^0$$

Проведемо автоматичне описання функцій управління розроблюваною системою керування.

Вхідний сигнал в проектованій системі керування тиристорними перетворювачами через фазоімпульсний блок подається на три пари тиристорів, які повинні подавати імпульси на двигун через кожні 120 електричних градусів.

Імпульси управління з вторинних обмоток трансформатора подаються на управляючі електроди тиристорів. Від 0° до 120° влючається перша пара (П1) тиристорного перетворювача, від 120° до 240° - друга, від 240° до 360° (0°) - третя. Виходячи із завдання на проектування вважаємо, що пристрій має один вхідний сигнал від давача, який приймає три значення.

$$0^\circ < \alpha < 120^\circ, 120^\circ < \alpha < 240^\circ, 240^\circ < \alpha < 360^\circ$$

Для переходу до двійкових сигналів введемо два входи (x_1, x_2), на яких можна реалізувати чотири різні двійкові комбінації ($2^2 = 4$).

00,01,10,11 Потрібно три виходи:

П1: $y_1=1$ - включена; $y_1=0$ - виключена.

П2: $y_2=1$ - включена; $y_2=0$ - виключена.

П3: $y_3=1$ - включена; $y_3=0$ - виключена.

Складаємо автоматну таблицю

Таблиця 3.1

	x1	x2	y1	y2	y3	
X1	0	0	0	0	0	Y1
X2	0	1	1	0	0	Y2
X3	1	0	0	1	0	Y3
X4	1	1	0	0	1	Y4

Також необхідно вказати як формуються вихідні набори, що подаються системою управління на об'єкт. З цією метою складаємо таблицю виходів.

Таблиця 3.2

Стани	Виходи			
	00	01	10	11
Z0	000	100	010	001
Z1	000	100	010	001
Z2	000	100	010	001
Z3	000	100	010	001
	Z0	Z1	Z2	Z3

$$y1 = \bar{x}1x2$$

$$y2 = x1\bar{x}2$$

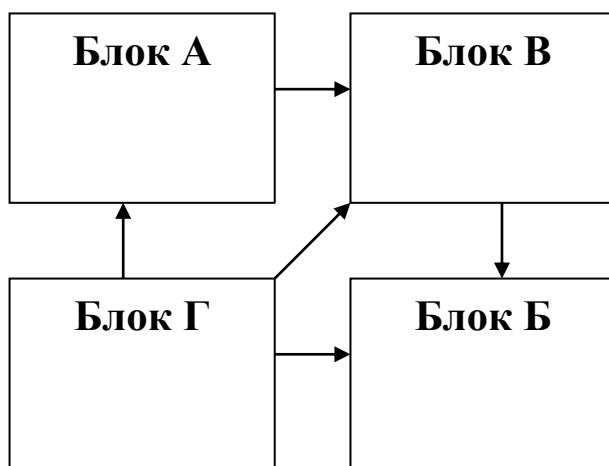
$$y3 = x1x2$$

3.3 Вибір оптимальної компоувальної схеми автоматизованої системи управління

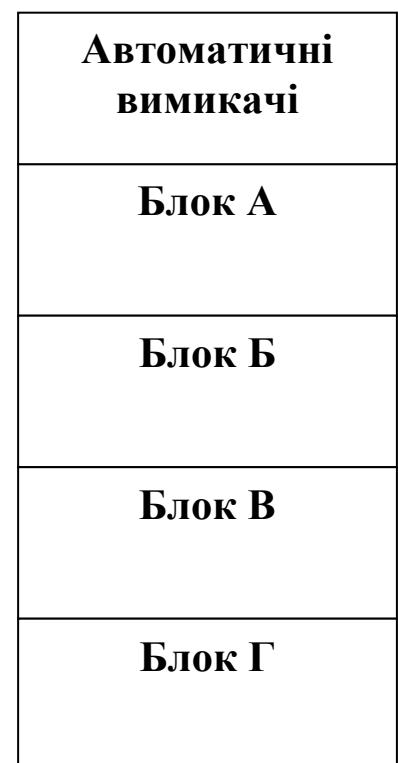
Існує кілька варіантів компоновочного рішення системи керування. Система складається з чотирьох блоків, які можуть бути розміщені в будь-якому порядку при збереженні напрямку електричних зв'язків (сигналів) між ними.

Компоновка 1 (рис. 3.2, а)

Всі чотири блоки розміщуються окремо, кожен в окремому корпусі. Таке компоновочне рішення має перевагу при раптовому пошкодженні будь-якого блоку. Ремонт буде проводитись по кожному блоку окремо, не вникаючи в спільні зв'язки. Але існує ряд недоліків: великі габарити пристрою, утруднення встановлення, більша витрата матеріалу.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Компоувальна схема системи керування

Компоновка 2 (рис. 3.2, б).

Всі чотири блоки пристрою розміщуються в одній шафі. Така компоновка значно полегшує роботу і дозволяє забезпечити: безперебійний технологічний процес без додаткових затрат.

Отже при розробці системи керування використовуємо друге компоновочне рішення - конструкція корпусу системи керування являв собою металічну шафу двостороннього обслуговування.

4 Конструкторська частина

4.1 Загальний опис роботи системи управління

В комплект системи управління входять наступні блоки:

- а) автоматичний регулятор збудження (блок А);
- б) блок управління, обмеження та захисту (блок Б);
- в) фазоімпульсний блок (блок В);
- г) блок живлення (блок Г).

Схема електрична принципова системи керування представлена в графічній частині кваліфікаційної роботи.

Управління тиристорами випрямляча, здійснюється від імпульсних каналів блока В через перемикач режиму SA1 від потенціометра (резмегора) аварійного управління R5 чи в режимах автоматичного і аварійною управління з блоку Б (плата виставлень).

При збільшенні керуючої напруги фаза управляючих імпульсів також збільшується, що веде до зменшенню струму ротора Відповідно, при зменшенні управляючої напруги струм ротора збільшується. Синхронізуюча напруга поступає у фазово-імпульсний блок із блоку живлення і по фазі співпадає (з зсувом на 30°) з вторинною напругою трансформатора T1.

В збуджувачі в режимі ручного регулювання на вхід плати виставлень поступають сигнали від потенціометра ручного регулювання R5, із схем пуску; обмеження струму ротора, захисту від короткого замикання і форсування.

В режимі автоматичного регулювання на вхід плати виставлень поступає напруга з блоку А.

Схема обмеження струму ротора служить для обмеження струму ротора при перевантаженні, причому час обмеження зворотно пропорційний величині перевантаження. Схема живиться від давача струму ротора.

Давач струму ротора складається з трьох трансформаторів струму Т2...Т4, первинні обмотки, яких включені в вторинне коло трансформатора Т1 і діодного випрямляча (VD1 .. VD6) в блоці Г.

Перемикач SB1 (ключ) служить для включення і відключення кола статора через масляний вимикач Q1. Цей же перемикач може використовуватися в якості ключа управління при управлінні синхронним двигуном зі сторони.

При відключенні масляного вимикача проходить форсоване гасіння поля ротора внаслідок переходу перетворювача в інверторний режим. Сигнал інвертування подається в плату замикаючими контактами реле КЗ (блок Б).

Схема захисту від асинхронного ходу спрацьовує при протіканні струму через пусковий опір; сигнал на включення схеми захисту подається герконовим реле К9. Струм, протікає через пусковий опір в режимі асинхронного ходу під дією змінної напруги в колі ротора.

Схема захисту від короткою замикання живиться від давача струму ротора і спрацьовує при перевищенні заданого виставлення струму перетворювача, тобто при будь-яких видах коротких замикань в силових колах збуджувача. Це веде до зникнення імпульсів, що поступають з блоку В в перетворювач, і до відключення масляного вимикача. Режим інвертування в цьому випадку відсутній.

Схема пуску по струму здійснює автоматичну подачу збудження при пуску синхронного двигуна. Схема живиться від трансформатора струму Т7 в статорному колі двигуна. Якщо струм статора перевищує задане виставлення, імпульси з фазово-імпульсного блоку не поступають.

При реакторному пуску імпульси управління подаються, по закінченню потрібної витримки часу.

Схема пуску синхронного двигуна в функції ковзання здійснює подачу збудження при ковзанні в період пуску до наперед встановленої величини.

Схема форсування призначена для форсування збудження при падінні напруги в статорному колі двигуна. Схема, живиться від трансформатора Т13.

4.2 Аналіз експлуатаційних характеристик блоків автоматизованої системи управління тиристорними перетворювачами

Збуджувач призначений для живлення обмотки збудження і керування струму збудження синхронного двигуна при прямому чи реакторному пуску від мережі.

Збуджувач розрахований на тривалу роботу в закритому приміщенні при наступних умовах:

температура оточуючого середовища	від 1 до 40° С;
висота над рівнем моря	до 1000м;
відносна вологість	не більше 80% (при 20° С);
запиленість повітря	не більше 0,2 мг/м ³ ;
навколишнє середовище	вибухонебезпечне, не
насичене водяними газами і парами	

Вузловий елемент збуджувача – тиристорний перетворювач, живлення якого здійснюється від мережі змінного струму напругою 380 В і з частотою 50 Гц.

Розроблювана система керування тиристорними перетворювачами електроприводів насосної станції повинна забезпечувати:

- формування імпульсного сигналу “запалювання” тиристорів;

- поступання імпульсного сигналу “запалювання” на управляючі електроди тиристорів у відповідні моменти часу,
- автоматичну подачу збудження в процесі пуску синхронного двигуна;
- безконтактне відключення пускового опору і захист його від перенагріву;
- режим інвертування при нормальних і аварійних відключеннях синхронного двигуна;
- автоматичне і ручне керування збудженням синхронного двигуна;
- захист тиристорного випрямляча від короткого замикання;
- необхідне форсування збудження синхронного двигуна;
- захист ротора від тривалих перевантажень по струму.

4.3 Будова та принцип роботи збуджувача

Схема електрична принципова збуджувача представлена в графічній частині кваліфікаційної роботи..

Конструкція збуджувача являє собою металеву шафу двостороннього обслуговування. Шафа збуджувача містить:

- тиристорний випрямляч;
- пусковий опір з тиристорним ключем;
- релейну панель;
- електронну систему управління (ЕСУ);
- автоматичний регулятор збудження (АРЗ).

В комплект ЕСУ входять наступні блоки:

- автоматичний регулятор збудження (блок А);
- блок управління, обмеження та захисту (блок Б);
- фазово-імпульсний блок (блок В);
- блок живлення (блок Г).

Роботу збуджувача розглядаємо по його електричній принциповій схемі.

Паралельно обмотці збудження синхронного двигуна через тиристорний ключ (VS7, VS8) підключений пусковий опір R9. Послідовно з обмоткою збудження ввімкнено реле струму K8 послідовно з пусковим опором – реле струму K9.

Управління тиристорами випрямляча здійснюється від імпульсних каналів блоку В через перемикач режиму SA1 від потенціометра (резистора) аварійного управління R6 чи в режимах автоматичною і аварійного управління з блоку Б (плата виставлень).

При збільшенні керуючої напруги фаза управляючих імпульсів також збільшується, що веде до зменшення струму ротора. Відповідно, при зменшенні управляючої напруги струм ротора збільшується.

Синхронізуюча напруга поступає у фазово-імпульсний блок із блоку живлення і по фазі співпадає (з зсувом на 30°) з вторинною напругою трансформатора T1.

У збуджувачі в режимі ручного регулювання на вхід плати виставлень поступають сигнали від потенціометра ручного регулювання R5, із схем пуску; обмеження струму ротора, захисту від короткого замикання і форсування.

В режимі автоматичного регулювання на вхід плати виставлень поступає напруга з блоку А..

Схема обмеження струму ротора служить для обмеження струму ротора при перевантаженні, причому час обмеження зворотно пропорційний величині перевантаження. Схема живиться від давача струму ротора.

Давач струму ротора складається з трьох трансформаторів струму T2...T4, первинні обмотки, яких включені в вторинне коло трансформатора T1 і діодного випрямляча (VD1 .. VD6) в блоці Г.

Перемикач SB1 (ключ) служить для включення і відключення кола статора через масляний вимикач Q1. Цей же перемикач може використовуватися в якості ключа управління при управлінні синхронним двигуном зі сторони.

При відключенні масляного вимикача проходить форсоване гасіння поля ротора внаслідок переходу перетворювача в інверторний режим. Сигнал інвертування подається в плату замикаючими контактами реле КЗ (блок Б).

Схема захисту від асинхронного ходу спрацьовує при протіканні струму через пусковий опір; сигнал на включення схеми захисту подається герконовим реле К9. Струм, протікає через пусковий опір в режимі асинхронного ходу під дією змінної напруги в колі ротора.

Схема захисту від короткою замикання живиться від давача струму ротора і спрацьовує при перевищенні заданого виставлення струму перетворювача, тобто при будь-яких видах коротких замикань в силових колах збуджувача. Це веде до зникнення імпульсів, що поступають з блоку В в перетворювач, і до відключення масляного вимикача. Режим інвертування в цьому випадку відсутній.

Схема пуску по струму здійснює автоматичну подачу збудження при пуску синхронного двигуна. Схема живиться від трансформатора струму Т7 в статорному колі двигуна.

Якщо струм статора перевищує задане виставлення, імпульси з фазово-імпульсного блоку не поступають. При реакторному пуску імпульси управління подаються, по закінченню потрібної витримки часу.

Схема пуску синхронного двигуна в функції ковзання здійснює подачу збудження при ковзанні в період пуску до наперед встановленої величини.

Схема форсування призначена для форсування збудження при падінні напруги в статорному колі двигуна. Схема, живиться від трансформатора Т13.

4.4. Розроблення, перевірочний розрахунок та опис принципу роботи тиристорного перетворювача

4.4.1 Вибір типу та обґрунтування застосування схеми тиристорних перетворювачів

В даній кваліфікаційній роботі використовується трьохфазна мостова схема тиристорних перетворювачів (схема Ларіонова, див. графічну частину кваліфікаційної роботи). В порівнянні з трьохфазною нульовою схемою вона має ряд істотних переваг:

Менша в два рази зворотня напруга на вентилях, менший нахил зовнішньої характеристики, менші пульсації випрямленої напруги, дуже хороше використання і просте виконання трансформатора, значно менші значення ЕРС вторинної обмотки трансформатора, можливість використання в без трансформаторному виконанні.

У випадку використання тиристорів, що мають мале пряме падіння напруги (приблизно 1 В) і диференційні значення допустимих обернених напруг що визначаються класом вентилів. Схема Ларіонова має істотні переваги перед іншими схемами, і тому її доцільно застосовувати в тиристорних перетворювачах середньої і великої потужності, зокрема в даній кваліфікаційній роботі.

4.4.2 Розрахунок тиристорів та вибір захисту тиристорного перетворювача

Оскільки, при розробці схеми використовуються стандартні лавинні тиристори типу ТЛ4-250-9, то проводимо тільки перевірочний розрахунок.

Параметри тиристора:

- середній максимальний струм в відкритому стані $I_{\text{вс.ср}} = 250 \text{ A}$;
- температура корпуса $T_k = 84^\circ \text{ C}$;
- ударна розсіювана енергія в зворотному непровідному стані $E_{\text{зв.уд}} = 1 \text{ Дж}$;
- зворотна напруга пробою $U_{\text{проб}} = 1080 \text{ В}$;
- повторна імпульсна напруга в закритому стані $U_{\text{зс.п}} = 900 \text{ В}$;
- неповторна імпульсна зворотна напруга $U_{\text{зв.п}} = 900 \text{ В}$;
- ударний струм у відкритому стані $I_{\text{ос.удр}} = 4500 \text{ А}$ при тривалості імпульсу струму $t_i = 10 \text{ мс}$ і зворотній напрузі пробою $U_{\text{зв.п}} = 0$;
- максимально допустима температура переходу $T_{\text{п.мах}} = 140^\circ \text{ C}$;
- прямий, імпульсний струм управління $I_{\text{у,пр}}$: $\text{min} - 2 \text{ А}$; $\text{max} - 10 \text{ А}$;
- максимальна пряма імпульсна напруга управління $U_{\text{пр,і,мах}} = 40 \text{ В}$;
- імпульсна напруга в відкритому стані $U_{\text{вс,і}} = 1,8 \text{ В}$;
- імпульсний струм у відкритому стані $I_{\text{вс,і}} = 785 \text{ А}$;
- відкриваючий струм управління $I_{\text{у,від}} = 400$ при $U_{\text{зс}} = 12 \text{ В}$;
- відкриваюча напруга, управління $U_{\text{у,від}} = 6 \text{ В}$ при $U_{\text{зс}} = 12 \text{ В}$;
- час включення $t_{\text{вкл}} = 15 \text{ мкс}$;
- час затримки $t_{\text{зд}} = 8 \text{ мкс}$;
- час виключення $t_{\text{вкл}} = 70 \dots 250 \text{ мкс}$;
- повторний імпульсний струм в закритому стані $I_{\text{зс,п}} = 20 \text{ мА}$;
- повторний імпульсний зворотній струм $I_{\text{обр,п}} = 20 \text{ мА}$;
- тепловий опір перехід-катод $R_{\text{ТПК}} = 0,13 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$.

Середнє значення випрямленої ЕРС дорівнює [8]:

$$E_{d\alpha} = q \cdot \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \frac{m}{\pi} \sin\left(\frac{m}{\pi}\right) \cdot \cos \alpha \quad (4.1)$$

де $m = 3$ - фазність вентильної групи;

$q = 2$ – числове значення послідовно увімкнених вентильних груп;

$E_2 = 380$ В – величина діючого значення ЕРС вторинної обмотки анодного трансформатора, що випрямляється за допомогою даної схеми;

$\alpha = 47^\circ$ - кут регулювання (відкривання вентилів);

$$E_{d\alpha} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 \cdot \frac{3}{3.14} \sin\left(\frac{3}{3.14}\right) \cdot \cos 47 = 13.4 \text{ В}$$

Максимальне значення оберненої напруги, що прикладається до закритого вентиля рівне:

$$U_{\epsilon, \max} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot E_2 = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 380 = 930.8 \text{ В} \quad (4.2)$$

Усереднена величина струму, що протікає у тиристорному збуджувачі становить:

$$I_a = \frac{I_{an}}{m} = \frac{300}{3} = 100 \text{ А} \quad (4.3)$$

Повинна виконуватися умова [1]:

$$I_a \leq I_{an}(I_{3\phi}) \quad (4.4)$$

$$U_{B\max} \leq U_{B, \text{дон}}(U_{\text{проб}}) \quad (4.5)$$

Оскільки,

$$100 \text{ А} < 250 \text{ А та } 930,8 \text{ В} < 1080 \text{ В},$$

отже, тиристор ТЛ4-250-9 вибраний правильно.

Так як тиристори дуже чутливі до перевантажень і можуть витримувати 15-30 кратні перевантаження, протягом часу не більше 10 мс, то вибрані варистори повинні бути перевірені за цією умовою, виходячи з можливого короткого замикання на виході перетворювача.

При цьому передбачається, що час дії швидкодіючого охоронного пристрою дорівнює половині періоду напруги живлення (10 мс при $f_{\text{нав}} = 50$ Гц) і амплітуда струму короткого замикання за цей час не повинна вивести вентиль з ладу.

Значення струму при короткому замиканні у первинній котушці трансформатора достатньо точно можна визначити за такою залежністю:

$$I_{1к.з} \cong \frac{U_{1н}}{X'_{TP}} - \frac{I_{1н}}{U_{\kappa} \%} \cdot 100 \quad (4.6)$$

де $X'_{TP} = \frac{U_{1н}}{I_{1н}} \cdot \frac{U_{\kappa} \%}{100}$ - значення індуктивного опору розсіювання вибраного трансформатора, що приведений до первинної обмотки;

$U_{1н}$, $I_{1н}$, $U_{\kappa} \%$ - номінальні значення напруги, струму первинної обмотки і напруги короткого замикання вибраного трансформатора

$$I_{1к.з} = \frac{256}{63\%} \cdot 100 = 420 \text{ А}$$

Тоді необхідне за умовою короткого замикання номінальне граничне значення струму тиристора визначається з виразу:

$$I_{ан} > \frac{I_{dk}}{k_{неp}} = \frac{k_{TP}}{k_{неp} \cdot k_u} \cdot I_{1к.з} \quad (4.7)$$

де $k_{пер} = \frac{I_{уд}}{I_{ан}} = \frac{4500}{250} = 18$ - значення коефіцієнта перевантаження попередньо підбраного вентиля по ударному струму;

$K_{тр} = 0,96$ - коефіцієнт трансформації.

$$250A > \frac{0.96}{18 \cdot 1.35} \cdot 420 = 16.6A$$

Умова виконується. Отже тиристор вибраний правильно.

Способи захисту тиристорних перетворювачів від надструмів.

Для захисту тиристорного перетворювача від надструмів використовуються автоматичні вимикачі QF, які встановлюються на стороні змінного струму.

Ці апарати є засобами багатократної дії, здатними захищати вентиль як від короткого замикання, так і від перевантажень, оскільки містять пороговий та тепловий розмикачі, що реагують, відповідно, на струм короткого замикання та струм перевантаження.

Крім того, для захисту самих вентилів від внутрішніх коротких замикань застосовуються швидкодіючі запобіжники FU, що включаються послідовно до кожного тиристора. Також для захисту тиристорного перетворювача від внутрішніх комутаційних перенапруг, які можуть виникати в процесі роботи, використовують ланцюги R-C, увімкнені паралельно до кожного тиристора.

Величина ємності конденсатора C може бути визначена за формулою

$$C = \frac{10 \cdot I_a}{U_{в.дон}} \cdot 10^{-6} \quad (4.8)$$

де I_a - 100 А - значення струму через вентиль перед початком комутації;

$U_{в.доп} = 1080$ В - допустиме значення оберненої напруги вентилля.

$$C = \frac{10 \cdot 100}{1080} \cdot 10^{-6} = 0.92 \cdot 10^{-6} \Phi = 0,92 \mu\Phi$$

Величину опору R можна визначити за виразом:

$$R = \frac{10 \cdot U_{в.доп}}{I_{ан}} \quad (4.9)$$

де $I_{ан} = 250$ А - номінальний (граничний) струм тиристора.

$$R = \frac{10 \cdot 1080}{250} = 43.2 \text{ Ом}$$

Вибираємо такі елементи:

конденсатор $C = C1 \dots C6$ типу МБГЧ-750-1-1

резистор R - R12.... 17 типу ПЕВ – 25 - 45 Ом

4.4.3 Розрахунок та підбір вирівнювальних реакторів для реверсивної схеми

Розрахунок проводимо згідно [8].

Для вентильних перетворювачів із сумісним узгодженим керуванням амплітуда змінної складової вирівнювального струму обмежується з основною сумарною індуктивністю вирівнювального контуру.

Величина індуктивності зрівнюючих реакторів L може бути визначена з рівняння:

$$L_{зр} = L_{зк} - \lambda \cdot \xi \cdot L_{ТР} \quad (4.10)$$

де
$$L_{зк} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{\omega_0 \cdot I_{зк}} \cdot k_{ср}, \text{ Гн}$$

$L_{зк}$ - індуктивність зрівнюючого контуру;

$k_{ср} = 0,35$ - коефіцієнт, що характеризує середнє значення вирівнювального струму;

$\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1}$ - кутова частота сітки;

$E_2 = 220 \text{ В}$ - значення діючої фазної ЕРС вторинної котушки трансформатора;

$I_{зр} = 5 \text{ А}$ - середнє значення зрівнюючого струму;

$L_{ТР} = 0,00025 \text{ Гн}$ - індуктивність фази трансформатора;

$\lambda = 2, \xi = 1$ - коефіцієнти, які залежать від схеми з'єднання кожного вентильного комплексу.

$$L_{ТР} = \frac{X_{ТР}}{\omega_0} \quad (4.11)$$

де $X_{ТР} = 0,08 \text{ Гн}$ – значення індуктивного опору фази.

$$L_{ТР} = \frac{0,08}{314} = 0,00025 \text{ Гн}$$

$$L_{зк} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{314 \cdot 5} = 0,07 \text{ Гн}$$

$$L_{зр} = 0,07 - 2 \cdot 1 \cdot 0,00025 = 0,0695 \text{ Гн}$$

По величині індуктивності $L_{зр} = 0,0695$ Гн вибираємо зрівнюючий реактор

Типу УР – І – 1500 ПС.

4.4.4 Складання рівнянь динаміки силової частини електроприводу

Запишемо в оперативній формі рівнянь динаміки силової частини електроприводу [11] відносно основних, регулюючих координат: швидкості двигуна W , струму якорного ланцюга I_a , напруги U_d і ЕРС E_d двигуна, середнього значення випрямленої ЕРС тиристорного перетворювача $E_{d\alpha}$, що відповідає певному куту регулювання α . Для випадку номінального потоку збудження двигуна, $\Phi_d = \Phi_{д.п}$ дані рівняння можуть бути записані в формі:

$$W(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{c \cdot T_{eb}} \cdot \left[R_{яц} \cdot I_{яц}(p) - \frac{R_{яц}}{c} \cdot M_c(p) \right] \quad (4.12)$$

$$R_{яц} \cdot I_a(p) = \frac{E_{d\alpha}(p) - E_d(p)}{p \cdot T_{яц} + 1} \quad (4.13)$$

$$E_{d\alpha}(p) = \frac{k_m}{p \cdot T_{III} + 1} \cdot U_y(p) \quad (4.14)$$

$$E_d(p) = c \cdot \omega(p) \quad (4.15)$$

$$U_d(p) = E_d(p) + R_{яц,д} \cdot I_a(p) \cdot (p \cdot T_{яц,д} + 1) \quad (4.16)$$

де $T_{EM} = \frac{I_{\Sigma} \cdot R_{ЯЦ}}{C^2}$ - електро механічна стала часу приводу;
 $c = \frac{U_{Д.Н} - I_{ЯН} \cdot R_{ЯЦ.Д}}{\omega_H}$ - стала двигуна, що визначається за номінальними параметрами;

M_c - момент опору на валу двигуна, що визначається навантаженням;

$R_{ЯЦ} = R_{ЯЦ.Д} + R_{ТП}$ - опір якірного ланцюга системи тиристорний перетворювач - двигун, що включає активний опір якірного ланцюга двигуна і еквівалентний активний опір силового ланцюга, тиристорного перетворювача.

$T_{ТП} = T_y + \tau$ - еквівалентна стала часу тиристорного перетворювача.

Передавальна функція і коефіцієнт передачі датчика струму.

Коефіцієнт передач вимірного шунта Ш (на електричній схемі збуджувача Р1), застосований для контролю струму, визначається за його номінальним параметром;

$$K_{Ш} = \frac{U_{Ш.Н}}{I_{Ш.Н}} \quad (4.17)$$

де $U_{ШН} = 75$ мВ – номінальне значення напруги шунта,

$I_{ШН} = 105$ мА – номінальне значення струму шунта.

$$K_{Ш} = 75/105=0,71$$

Коефіцієнт передачі датчика струму ДС, що встановлений для підсилення сигналу від шунта, а також для гальванічного розділення силового ланцюга системи керування, визначається, з виразу:

$$K_{ДС} = \frac{U_{ДС.Н}}{U_{Ш.маx}} \quad (4.18)$$

де $U_{дс.н} = 8,3$ В – напруга, що знімається з шунта при максимально можливому струмі.

$U_{ш.маx} = 12$ В – напруга, що знімається з шунта при максимально можливому струмі.

$$K_{дс} = \frac{8,3}{12} = 0,7$$

4.5 Розроблення автоматизованої системи управління

4.5.1 Розроблення та опис принципу роботи фазово-імпульсного блоку

Схема електрична принципова фазово-імпульсного блоку (блок В) представлена в графічній частині кваліфікаційної роботи.

Кожен імпульсний канал блока В складається з:

- діодно-транзисторного синхронізатора (VD1, VT1);
- схеми утворення пилкоподібних сигналів (VT1, R2, R3, C1);
- компаратора (VT2);
- формувача імпульсів (VT3, VT4, VT5);
- трансформатора розмноження імпульсів ТІ.

Діод VD1 виконує роль синхронізуючого елемента, який пропускає позитивну півхвилю напруги, то надходить із блоку живлення на базу транзистора VT1. Після цього він закривається на час $t_1 - t_2$ і конденсатор C1 заряджається від стабілізованого джерела напруги через резистори R2 і R3.

Конденсатор заряджається по початковій ділянці експоненти, що забезпечує практично прямолінійний ріст напруги U_3 на конденсаторі C1. Стала часу заряду прийнята рівною 10 мс. В момент часу t_2 , коли

синусоїдальна напруга U_2 на базі транзистора VT1 досягне нуля, транзистор відкривається від'ємною напругою, яка поступає на його базу через резистор R1 і конденсатор C1 розряджається через транзистор VT1.

В інтервалі від t_2 до t_3 транзистор VT1 знаходиться в відкритому стані, а діод VD1 - в закритому стані. Як тільки потенціал бази транзистора VT2 стає від'ємним відносно емітера, на який по колу 129 подається від'ємна керуюча напруга, транзистор VT2 відкривається.

На його колекторі формуються прямокутні імпульси, рівні проміжку часу на протязі якого транзистор VT2 відкритий. Передній фронт імпульса при зміні величини керуючої напруги може зсуватися по фазі, а задній фронт співпадає по часу з моментом часу розряду конденсатора C1.

Імпульс підсилюється транзистором VT3. Позитивний перепад напруги з колектора транзистора VT3 передається через деференціюючий ланцюг C2 - R8 на базу транзистора VT4, емітер якого включений на базу вихідного транзистора VT5. Вихід підсилювача на транзисторі VT5 подано на первинну обмотку трансформатора розмноження імпульсів T1.

Імпульси управління U_4 з вторинних обмоток трансформатора подаються на управляючі електроди тиристорів. Величина управляючої напруги U_y , поданої на емітер транзистора VT2, визначає положення імпульсів в часі, і відповідно, величину кута відкривання тиристорів α .

Кожен канал містить чотири гальванічне розділених імпульсних виходи. В перший імпульсний канал включений контакт реле K9, котрий розряджає конденсатор C1 і тим самим відключає даний канал при протіканні струму через пусковий опір по колу 107-109.

4.5.2 Розроблення та опис принципу роботи блоку автоматичного регулятора збудження (АРЗ)

Складові частини системи регулювання і основні елементи системи електропостачання представлені в графічній частині кваліфікаційної роботи.

Всі елементи даного блоку є стандартними і приведені в переліку елементів.

Система регулювання складається з синхронного двигуна М, тиристорного збуджувача ТЗб, що живиться від силового трансформатора Т1 і керується фазоімпульсним пристроєм (ФІП) "запалювання" тиристорів і регулятора АРЗ.

Регулятор складається з:

а) підсилюючого пристрою, який включає сумуючий підсилювач напруги ПН і підсилювач струму ПС;

б) функціональних перетворювачів у вигляді давача статичного режиму ДСРж, який формує сигнали параметрів регулювання;

в) вимірювальних пристроїв напруги статора і ротора двигуна.

Вимірювальний пристрій напруги статора являє собою давач напруги статора ДН, підключений через роздільний трансформатор Т6 до вимірювального високовольтного трансформатора Т13. Вимірювальний пристрій струму статора складається з давача струму ДСС.

Давач ДСС підключений до вимірювального трансформатора струму статора Т10. Вимірювальний пристрій струму ротора виконаний у вигляді давача струму ДСР, підключеного до вимірювальних трансформаторів струму Т2, Т3, Т4 в колах живлення тиристорного збуджувача ТЗб.

Синхронний двигун М живиться від трансформатора підстанції Т, Паралельно до синхронного двигуна підключені суміжні електроприймачі СЕП (наприклад, асинхронні двигуни чи керуючі випрямлячі).

Тиристорний збуджувач живить обмотку збудження синхронного двигуна пульсуючою напругою, середнє значення якої визначається фазою імпульсів, що виробляються ФІП.

Фаза імпульсів на виході ФШ задається напругою постійного струму, на виході ФП - з допомогою підсилювача постійного струму ПС і підсилювача напруги ПН.

Підсилювач ПН сумує і підсилює зміну сигналів з виходів давачів ДСРж, ДН, ДСР. На вхід вказаних давачів подано сигнали змінного струму, виміряні з допомогою трансформаторів напруги чи струму у відповідних колах статора чи ротора.

Давач ДСС являє собою трансформатори струму з потенціометричними подільниками.

Давач ДН перетворює змінний струм в імпульси однієї полярності, які являють собою верхівки від'ємних півхвиль синусоїди.

Давач ДСРж використовується для вироблення сигналу постійного струму, величина якого пропорційна напрузі статора і одній з наступних величин:

- а) струму статора;
- б) реактивному струму статора;
- в) куту φ ;
- г) куту навантаження двигуна.

Отримання потрібного сигналу на виході давача ДСС забезпечується відповідною настройкою і положенням переминок на панелі перемикачів, яка знаходиться на одній платі з давачем напруги.

Давач ДСР перетворює сигнал змінного струму в сигнал постійного струму, величина якого пропорційна струму ротора.

Конструктивно частина функціональних елементів знаходиться в блоці А, який складається з трьох плат: АІ, А2, А4. На цих платах відповідно розміщені: давач ДСР, давач ДН, панель перемикачів і підсилювач ПН.

Підсилювач ПС знаходиться в блоці Б на платі Б1. Давач ДСР розміщений в блоці Г, вимірювальні і роздільні трансформатори - поза блоками.

В якості регулятора струму ротора приймаємо сітковий повторювач напруги, виконаний на інтегральній аналоговій гібридній мікросхемі 284УЕ1Б.

Технічні дані мікросхеми 284УЕ1Б:

Основні технічні дані (при температурі $25 \pm 10^\circ \text{C}$).

Напруга джерела живлення	$\pm 6 \text{ В} \pm 10 \%$
Коефіцієнт підсилення напруги при $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$, $f = 1 \text{ кГц}$	не менше 0,97
Приведена до входу напруга шумів в смусі частот від 0,02 до 20 кГц	не більше 20 мкВ
Вхідна ємність при $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$, $f = 100 \text{ кГц}$	не більше 12 пкФ
Вхідний опір при $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$, $f = 0,04 \text{ кГц}$	не менше 100 МОм
Вихідний опір $f = 1 \text{ кГц}$, $R_{\text{н}} = 10 \text{ КОм}$	не більше 150 Ом
Коефіцієнт гармонік при $f = 1 \text{ кГц}$, $R_{\text{н}} = 10 \text{ КОм}$	не більше 2 %
Коефіцієнт ослаблення на верхній граничній частоті	не більше 3 дБ
Зміна коефіцієнту підсилення: напруги	не більше +1.0 %

Розрахунок - параметрів регулятора струму (РС) - давача струму ротора (ДСР) [8].

Структурна схема контуру струму представлена в графічній частині кваліфікаційної роботи. При аналізі схеми не враховується дія внутрішнього зворотного зв'язку за ЕРС двигуна, показаної пунктиром.

Суттєвою сталою часу, що підлягає компенсації в контурі струму, є стала часу якірного контуру $T_{\text{ця}}$. В якості некомпенсованої малої сталої часу контуру, котра визначає його швидкодію, приймемо сталу $T_{\text{мт}}$, що є сумою сталих часу фільтра на виході датчика ДС $T_{\text{фт}}$ і еквівалентна сталій часу тиристорного перетворювача $T_{\text{тп}}$:

$$T_{\mu T} = T_{\phi T} + T_{TP} \quad (4.19)$$

Передавальна функція контуру струму, що розімкнений у точці поміж входом регулятора РС та датчиком ДС (одиничний зворотній зв'язок) при невідомій передавальній функції регулятора РС, має вигляд:

$$W_P^T(p) = \frac{U_{ДС}}{U_{ЗС}} = W_{PT}(p) \cdot \frac{k_{TP}}{pT_{\mu T} + 1} \cdot \frac{1}{pT_{ЯЦ} + 1} \cdot k_{ос.т} \quad (4.20)$$

де $U_{ДС}$ - напруга на виході датчика струму ДС;

$U_{ЗС}$ - напруга задання при вході в регулятор РС;

$k_{ос.т} = k_{П} + k_{ДС}$ - передавальний коефіцієнт лінії зворотнього зв'язку по струму.

З рівняння передаточної функції слідує, що для оптимізації контуру необхідно в якості - регулятора РС використати ПІ - регулятор, з передаточною функцією виду:

$$W_{PT}(p) = \frac{pT_{ЯЦ} + 1}{p\alpha_T \cdot T_{\mu T} \cdot k_{ос.т} \cdot k_{TP}} \quad (4.21)$$

Характеристики вхідних елементів або елементів на зворотних зв'язках регулятора РС можуть бути визначені через коефіцієнти передаточної функції із співвідношень:

$$R_{0T} = \frac{T_{ЯЦ}}{C_{0T}} \quad (4.22)$$

$$R_{2T} = \frac{\alpha_T \cdot T_{\mu T} \cdot k_{ос.т} \cdot k_{TP}}{C_{0T}} \quad (4.23)$$

$$R_{1T} = \frac{U_{3.T \max} \cdot R_{2T}}{k_{oc.m} \cdot R_{яц} \cdot I_{CT}} \quad (4.24)$$

Останнє співвідношення описує стан контура, що відповідає режиму «заклинювання» приводу, якщо сигнал задання зрівнюється з сигналом каналу зворотнього зв'язку по струму.

Враховуючи значення ємності та максимальної вихідної напруги регулятора швидкості РС (гранична напруга) $U_{3.T \max}$, вище визначили останні параметри регулятора РС.

Передавальна функція контура струму, враховуючи співвідношення виразу попередньої передавальної функції для параметрів регулятора, має вигляд:

$$W_3^T(p) = \frac{R_{яц} \cdot I_{я}(p)}{U_{3.T}(p)} = \frac{k_{IP.T} / k_{OC.T}}{p \cdot \alpha_T \cdot T_{\mu T} (pT_{\mu T} + 1) + 1} \quad (4.25)$$

де $k_{IP.T} = \frac{R_{2T}}{R_{1T}}$ - коефіцієнт приведення сигналу задання U_{3T} до сигналу зворотного зв'язку по струму.

У випадку оптимізації контуру струму для умов технічного оптимального значення, коефіцієнт $\alpha = 2$. У даному випадку, перехідний процес для струму $I_{я}(t)$ буде мати перерегулювання $\sigma - 4,3\%$, та час регулювання $t_p = 4,1 T_{MT}$.

Принципова схема блока А представлена представлена в графічній частині кваліфікаційної роботи.

Виконавчим елементом (DA1) схеми авторегулювання являється послідовний інтегральний переривач струму 124КТ1А.

Принцип роботи електричної схеми блоку А (авторегулювання) полягає у наступному.

Напруга, пропорційна напрузі статора, подається прямо на ключ DA1 інтегральний переривач струму). Від'ємна півхвиля цієї напруги проходить Г-подібний фільтр вищих гармонік (резистори R16, R17 і конденсатор C7), а додатна півхвиля зрізається діодом VD10.

Стабілітрони VD4...VD9 допускають в схему тільки вершину від'ємної півхвилі, яка заряджає конденсатор C2, розрядка якого через резистори R3 і R4 визначає форму голкоподібної напруги. На ключ DA1 подається напруга пилкоподібної форми, амплітуда якої пропорційна напрузі статора синхронного двигуна, що є в свою чергу забезпечує рівномірний і плавний хід двигуна в процесі роботи.

Стабілітрон VD1 при відповідній налазці налагоджувального резистора R16 забезпечує постійність амплітуди пилкоподібної напруги при рості напруги статора (наприклад, вище 95% від номінального), створюючи зону нечутливості при зниженні напруги від 100 до 95% номінального.

Між генератором пилкоподібної напруги і ключом DA1 в коло може бути увімкнений трансформатор струму, завдяки чому сигнал на запам'ятовуючому конденсаторі буде пропорційний напрузі і струму відключення.

Сигнали струму і напруги для запуску блокінг-генератора подаються через Т-подібні фільтри і сумуються на базі транзистора VT2. Цей транзистор в момент переходу сумарного сигналу на базі від від'ємного до позитивного вкривається і через конденсатор C3 запускає блокінг-генератор з транзистором VT1 і трансформатором T1. Величини вхідних сигналів встановлюються потенціометром R8.

Підсилювач напруги (транзистори VT3, VT4) сумує вхідні сигнали на базі транзистора VT4. Потенціометрами R1S, R29 встановлюється напруга на колекторі транзистора VT3, тобто робоча точка системи регулювання, яка визначає струм збудження.

Від'ємна напруга в гнізді Х9 змінюється від декількох вольт при відкритому транзисторі VT3 до 12В при закритому транзисторі. Напруга на колекторі транзисторі VT3 задає напругу порівняння в імпульсному каналі, і для забезпечення повного відкривання силових тиристорів в блоці Б включений стабілітрон VD3, який зрізує до нуля залишкову напругу колектора повністю відкритого транзистора VT3.

Резистором R25 вибирається величина стабілізуючого зворотного зв'язку по струму збудження.

4.5.3. Розроблення та опис принципу роботи блоку управління, обмеження та захисту

Схема електрична принципова блоку управління, обмеження і захисту (блок Б) представлена в графічній частині кваліфікаційної роботи.

Схема виставлень являє собою ланцюг послідовно увімкнених трьох емітерних повторювачів (VT1, VT2, VT3). На вхід системи (контрольне гніздо Х1) по ланцюгу 130 поступає напруга з блока А з виходу системи (контрольне гніздо Х3) напруга управління поступає в імпульсні канали по ланцюгу 162-129.

Обмеження напруги збудження по мінімуму проводиться потенціометром R14 в блоці Б.

Обмеження максимальної напруги збуджувача в режимі «Ручне» проводиться потенціометром R11 в блоці Г. Крім того, в блоці Б є додатковий ланцюг обмеження мінімальної напруги, який складається з резисторів R14, R10 і діода VD1.

Ланцюги встановлення кута інвертування, максимального струму, вихідний ланцюг схеми обмеження струму ротора, ланцюг сіткового

захисту від короткого замикання, вихідний ланцюг схеми пуску зведені на базу другого транзистора VT2 схеми встановлення.

Напруга управління U_3 , яка відповідає потрібному куту інвертування $150... 170^\circ$ і визначається положенням повзунка потенціометра R13, поступає на базу транзистора VT2 при замиканні замикаючого контакту реле K3, яке включається при відключенні масляного вимикача Y1 по колу 121-124.

Коло обмеження максимального струму збудження (R18, R11, VD3) живиться від давача струму ротора і працює, якщо напруга на базі транзистора VT2 спадає до величини, достатньої для відкриття стабілітрона VD3. Таким чином, при форсуванні величина струму ротора відповідає виставленню, що визначається потенціометром R11, а весь діапазон зміни керуючої напруги в колі 129 обмежений з двох сторін.

Напруга U_1 визначає максимальний струм збудження, напруга U_2 – мінімальну напругу збудження, напруга U_3 – кут інвертування.

Схема порогового форсування (плата Б3).

Дана схема живиться від трансформатора ТІЗ (схема електрична принципова збуджувача). Напруга в схему подається через автоматичний вимикач QF3 і роздільний трансформатор Т5. По колу 107-146 в схему гадається змінна напруга 100 В. Напруга випрямляється діодами VD8...VD11 (блок Б), згладжується RC фільтром (R21, C6) і зрівнюється з напругою виставлення, яка визначається стабілітроном VD16. Різниця напруг подається на реле K4.

Виставлення напруги форсування регулюється потенціометром R22. При падінні напруги в статорній мережі нижче $80...85\%$ від номінальної величини реле K4 та K5 відключаються. Розмикаючі контакти реле K5 шунтують базовий ланцюг транзистора VT1, завдяки чому управляюча напруга стає рівною нулю і виникає форсування. Відключення

форсування проходить при збільшенні напруги мережі сітки до 90...92 % від номінального значення.

Схема захисту від тривалого асинхронного ходу (плата Б4).

В схему входить реле часу з регульованим виставленням, яке включається в тому випадку коли через пусковий опір R9 протікає струм.

Асинхронний хід супроводжується виникненням змінної складової напруги в обмотці збудження. Струм через R9 буде протікати в тому випадку, коли амплітуда напруги на роторі перевищить поріг спрацювання стабілітронів VD8, VD9.

Давачом наявності струму в колі R9 являються контакти герконового реле K9. Контакти реле замикаються при протіканні через R9 струму більше 20 А. і включають коло зарядки конденсаторів C7, C8, які входять в реле часу схеми захисту. Конденсатор C8 заряджається по колу R24...R33 через контакти реле K9 (схема електрична принципова збуджувача).

Коли напруга на конденсаторі C8 рівна напрузі виставлення інтегральної мікросхеми DA2, включаються реле K6, K7, K1. Масляний вимикач QF6 відключається, одночасно включається реле K3 і випрямляч переходить в інверторний режим.

При протіканні струму через пусковий опір R33 контактом реле K9 періодично відключається перший імпульсний канал, що сприяє закриванню тиристора VS7 (схема електрична принципова збуджувача), якщо цей тиристор не закривається після подачі збудження.

Такий режим необхідний при куті регулювання від 0 до 30 ° (електричних), при більшому куті тиристори VS7, VS8 закриваються внаслідок переходу напруги збудження через нуль. Час зарядки конденсатора C8 встановлюється при допомозі перемикача SB1.

Схема захисту від асинхронного ходу одночасно здійснює функцію реле обриву поля. При зникненні струму в колі ротора розмикаються

контакти геркона реле K8, відпадає реле K5, замикається коло з розмикаючих контактів K5 і K3 і включається коло зарядки конденсаторів C7, C8 реле часу захисту. Спрацювання реле захисту призводить до відключення масляного вимикача.

Індикаторна лампа HL4 схеми захисту від асинхронного ходу загоряється при спрацюванні реле K7 в платі Б4, котре самоблокується по колу: 121-19-28-K7-136- S4-122. Реле K7 і лампа HL4 відключаються кнопкою деблокування захисту SB4 (схема електрична принципова збуджувача).

Схема порогового обмеження струму ротора (плата Б2).

Виконавчим елементом схеми являється реле K3, давачем струму збудження – трансформатори T2...T4 (схема електрична принципова збуджувача). Напруга на виході трансформаторів випрямляється діодами VD1...VD6 (блок Г). Постійна напруга, пропорційна струму ротора, знімається з резистора R9 платі Г2 і подається в схему обмеження ротора I₃. При перевищенні виставлення спрацьовує схема обмеження.

Напруга з повзунка потенціометра R15 подається через стабілітрон VD18 і резистор R16 на конденсатори C2, C3. Конденсатор C3 може бути відключений перемичкою, що дозволяє виставити необхідне виставлення (значення) струму ротора I₃.

В нормальному стані струм збудження менше номінального, схема обмеження не працює, реле K3 (блок Б) знеструмлено. Якщо струм збудження стає більший за номінальний ($I_2 > I_3$) в момент часу t_1 і тривало утримується на підвищеному рівні, то напруга на конденсаторі C2 зростає і через деякий час, визначається постійною часу $\tau = C2 \cdot R16$, вмикається підсилювач інтегральної схеми DA1 і спрацьовує реле K3.

Замикаюче контакт реле, підключене до кола потенціометра R19, замикається. Якщо до моменту часу t_2 причина, що викликає перевантаження, не зникла, струм збудження втримується на рівні

обмеження I_4 тривалий час (до моменту часу t_3 усунення причини, яка викликає перевантаження). Струм I_4 завжди перевищує струм I_3 і складає $1,05 I_3$.

Час затримки ($T = t_2 - t_1$) залежить від величини струму I_2 .

Параметри схеми вибрані таким чином, що $I_2 = 1,41 I_4$ час обмеження рівний 50 с, при цьому $I_3 = 1,05 I_3$

Схема захисту від коротких замикань (плата Б1),

Дана схема безінерційно відключає імпульси управління і через деякий час, обумовлений затримкою в релейних колах, відключає масляний вимикач. Схема складається з реле К1, К2. Одна обмотка реле К1 включена послідовно в коло давача струму ротора (коло 336-R8-331).

Резистор R8 визначає поріг спрацювання схеми захисту. При виникненні струму короткого замикання реле К1 спрацьовує, самоблокується по колу: 121-R5-136, включає реле К2 і своїм замикаючим контактом подає напругу -12 В на базу транзистора VT2 схеми встановлень. Реле К2 замикаючими контактами включає реле захисту К1 (схема електрична принципова), масляний вимикач відключається. Лампа HL3 загоряється при спрацюванні реле К2 в платі Б1.

Реле К1, К2 і лампа HL4 відключається при допомозі кнопки деблокування захисту SB4.

Схема подачі збудження в функції ковзання (плата Б5).

Дана схема складається з давача ковзання та часовимірювальної схеми. Давачем ковзання є трансформатор Т9 (схема електрична принципова збуджувача), розміщений на панелі в шафі і підключений на дві секції пускового опору.

Часовимірювальна схема складається з генератора пилкоподібних сигналів R38...R45, C12, VT8; компаратора (VT6, VT7); транзистора VT5; виконавчих реле К8, К9; схеми часового блокування (C10, R50, VD20).

Принцип дії схеми пуску заключається у вимірюванні одного півперіода напруги, яка прикладена під час пуску до кола пускового опору, і у видачі сигналу на подачу збудження, якщо тривалість вимірюваного півперіода більше виставлення.

У вихідному стані трансформатор Т9 знеструмлено, транзистор VT8 закритий, конденсатор С12 заряджений до рівня напруги виставлення стабілітрона VD27, компаратор VT6, VT7 відкритий, транзистор VT5 відкритий, реле К8, К9 включені, розмикаючий контакт реле К9 – К9.2 розімкнуті. В цьому стані напруга управління на виході емітерних повторювачів у платі Б1 не залежить від схеми подачі збудження.

В період пуску через пусковий опір протікає струм з частотою ковзання. Напруга в секції пускового опору поступає через трансформатор Т9 в базовий ланцюг транзистора VT8. При позитивній півхвилі напруги ковзання транзистор VT8 закритий і конденсатор С12 заряджається через резистори R38...R45 виставлення.

При негативній півхвилі, транзистор VT8 буде у відкритому стані, а конденсатор С12 буде розряджений, транзистори VT6, VT7 закриті, реле К8, К9 відключені. Швидкість зарядки конденсатора С12 залежить від положення перемички в платі Б5.

Якщо за час позитивного півперіоду амплітуда пилкоподібної напруги на конденсаторі С12 не досягає рівня виставлення стабілітрона VD27, то реле К8, К9 залишаються відключеними. На базу другого транзистора емітерних повторювачів подається від'ємна напруга 12 В, а на виходах фазово-імпульсних генераторів імпульси відсутні.

По мірі зниження частоти ковзання в процесі пуску синхронного двигуна амплітуда напруги на конденсаторі С12 зростає і при її рівності напрузі виставлення стабілітрона VD27 відкривається компаратор (VT6, VT7). Реле К8, К9 включаються, і проходить подача управляючих імпульсів в перетворювач.

Ланцюг часового блокування реле K9 використовується для підтримки включеного стану реле K9 якщо після подачі збудження змінюється полярність струму і на базу транзистора VT8 з трансформатора T9 поступає від'ємний імпульс напруги. При цьому конденсатор C12 розряджається, реле K8 відключається, але реле K9 залишається включеним за рахунок струму заряду конденсатора C10, і подача управляючих імпульсів не переривається.

Через деякий час перехідні процеси в роторі закінчуються, пусковий опір відключається, трансформатор T9 знеструмлюється, конденсатор C12 заряджається до рівня напруги на стабілітроні VD27 і реле K8, K9 залишаються включеними. При цьому конденсатор C10 заряджається повністю.

При виникненні асинхронного режиму при проходженні першої від'ємної півхвилі напруги на базу транзистора VT8, реле K8, K9 відключаються, подача імпульсів управління закінчується, конденсатор C10 розряджається по колу резистора R24, і коло часового блокування підготовлюється до наступного включення збудження.

4.5.4 Схема пуску та увімкнення збудження по струму статора

Схема здійснює пуск синхронного двигуна і подачу збудження після закінчення процесу пуску. До її складу функційно входить пусковий опір сумісно з пристроєм його ввімкнення. Процес пуску розглядається по схемі електричній принциповій збуджувача.

При повороті ключа SB1 вправо спрацьовує електромагніт включення Y5 масляного вимикача QF6. Замикаючі контакти Y1 по колу 121-122 включають реле K2, яке своїми замикаючими контактами подає напругу в блок живлення.

Одночасно розмикаючі контакти масляного вимикача відключають реле інвертування КЗ по колу 121-124, яке відпадає з визначеною витримкою часу. За час відпадання реле КЗ струм статора зростає до величини, достатньої для спрацювання реле струму К7. Реле К4 включається по колу: замикаючий контакт реле К7 - замикаючий контакт реле К3 і блокується замикаючим контактом реле К4.

Другий замикаючий контакт реле К4 заведений в схему виставлень по колу: 101-175. До тих пір, поки процес пуску не закінчений і реле К4 включено, на базу транзистора VT2 в плачі Б1 поступає напруга - 12 В.

Керуюча напруга перевищує амплітуду пилки в імпульсному каналі блока В і імпульси в тиристорний випрямляч не поступають. В процесі пуску при підсинхронній швидкості струм статора знижується до величини, достатньої для відпадання реле К7.

Коло реле К4 відпадає і керуюча напруга з цього моменту починає визначатися напругою U_1 на вході схеми виставлень.

При відключенні масляного вимикача ключом S1 чи при спрацюванні реле захисту К1 включається реле інвертування КЗ. Замикаючі контакти КЗ по колу 101-131 включають коло інвертування і проходить форсоване гасіння поля. Живлення блоків електронної системи управління (ЕСУ) після відключення масляного вимикача здійснюється на протязі 1,5...2,0 с за рахунок часової затримки при відпаданні замикаючих контактів реле К2, увімкнених в коло трансформатора Т1 (блок Г) блока живлення.

4.5.5 Будова та опис принципу роботи блоку живлення

Блок живлення (блок Г) - покупний елемент. Оскільки він береться стандартним, то пояснимо лише його роботу.

Принципова схема блоку Г представлена в графічній частині кваліфікаційної роботи.

Блок живлення складається з трьохфазного трансформатора, первинні обмотки якого з'єднані в зірку і живляться напругою від вторинних обмоток трансформатора Т1 через контакти реле К2 (схема електрична принципова збуджувача).

З обмоток ІІ знімається синхронізуюча напруга U_2 , яка подається на діодні комутатори VD1 (блок В). Синхронізуючі напруги зсунуті по фазі на 30° відносно фазних напруг U_ϕ , які живлять тиристор, з допомогою RC - фільтрів (C1...C3, R1...R6).

Транзисторним стабілізатор напруги - 12 В, виконаний на транзисторі VT1. Стабілізатор захищений від короткого замикання на виході при допомозі резистора R13. Параметричний стабілізатор напруги зміщення +5,6 В виконаний на стабілітроні VD15. Блок стабілізатора живиться від випрямляча (VD7...VD14), який випрямляє напругу, що поступає з трансформатора Т1.

Проведемо розрахунок RC-ланок.

$$\tau = R \cdot C \quad (4.26)$$

Приймаємо, $R = 220 \text{ Ом}$, $\tau = 35 \text{ мс}$

Тоді

$$C = \frac{\tau}{R} = \frac{35 \cdot 10^{-3}}{220} = 160_{\text{мкФ}} \quad (4.27)$$

Вибираємо елементи:

резистори R - R1 ... R6 МЛТ - І - 220 Ом - $\pm 5 \%$

конденсатори C - C1 ... C3 МБГО - 2 -160 - 4

Транзисторний стабілізатор напруги виконаний на транзисторі КТ814Г (VT1), де вхідна напруга з трансформатора стабілізується до 12 В,

після чого проходячи через стабілітрон VD10 (КС 168А) вона понижається до 6,8 В,

Стабілітрон VD11 повинен стабілізувати напругу 5,6 В. Цій характеристиці відповідає стабілітрон КС156А., який має напругу стабілізації явну 5,6 В та мінімальний струм стабілізації 3 А.

Електролітичні поляризовані конденсатори С2, С3 обрізають змінну складову в емітерному колі і виводять стабілітрон VD11 на робочу характеристику, що в свою чергу веде до спрацювання стабілітрона VD15 та подальшої стабілізації напруги виходу до необхідного значення 5,6 В.

4.6. Розрахунок надійності системи управління тиристорним перетворювачем

Методи розрахунку надійності апаратури умовно поділяються на дві групи: повний і наближений розрахунок.

Відомо багато методик наближеного аналізу надійності технічних систем, з яких можна виділити наступні:

- а) розрахунок надійності за раптовими відмовами;
- б) розрахунок надійності з урахуванням старіння елементів;
- в) розрахунок надійності з врахуванням допусків на параметри елементів.

Визначення кількісних характеристик використовується на стадії проєктування обладнання і являється орієнтовним, допомагає визначити слабкі місця системи і знайти шляхи їх усунення.

Вихідними даними для такого розрахунку є:

- а) принципова схема системи з вказанням типів елементів;
- б) режими роботи всіх елементів;
- в) значення інтенсивностей відмов при номінальних і фактичних режимах;

г) значення середнього часу справної роботи елементів і дисперсії для елементів, що піддаються поступовим відмовам.

Отже, необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи для проміжку часу t . Розрахункові значення критеріїв надійності порівнюють із заданими. Якщо вони співпадають, припиняється подальший розрахунок. В іншому випадку - застосовуються способи та заходи для підвищення надійності.

В даній роботі проводимо розрахунок надійності по раптових відмовах, беручи до уваги той факт, що схема розрахована точно, а термін старіння елементів схеми триваліший, ніж гарантований час роботи.

Для розрахунку надійності використовуємо метод розрахунку надійності при раптових відмовах. При розрахунку цим методом вводяться такі умови:

- а) відмови елементів, що входять в склад обладнання є раптовими;
- б) інтенсивність відмов має постійне значення;
- в) відмова будь-якого з елементів веде до відмови всього обладнання.

На основі принципової схеми фазово-імпульсного блоку складаємо розрахункову блок-структурну схему надійності, на якій зображуємо всі блоки і зв'язки між ними та визначаємо кількість елементів, що входять в кожен з блоків, а також режими роботи кожного з елементів.

Введемо умовні позначення:

m - кількість елементів блоків;

v – порядковий номер елемента в блоці;

M - кількість блоків;

N - порядковий номер блоку в системі;

λ_v - інтенсивність відмов v -го елемента, [1/год];

λ_n - інтенсивність відмов N -го блоку, [1/год]

$$\lambda_{\text{заг}} = \sum_{N=1}^M \lambda_N \cdot k_N \quad \lambda_M = \sum_{v=1}^m \lambda_v \cdot k_v \quad (4.28)$$

де k_v - число елементів v -го типу та номіналу;

k_N - число блоків N -го типу;

$\lambda_{\text{заг}}$ - узагальнена інтенсивність відмови розроблюваної системи.

Оскільки, кожен блок - це система, в якій необхідна неперервна справна робота на протязі тривалого часу, тоді для кожного окремого блоку ймовірність безвідмовної роботи розраховується за формулою:

$$P_N(t) = e^{(-t/T_N)} \quad (4.29)$$

де t - час повноцінної роботи блоку, год;

$T_N = \frac{1}{\lambda_N}$ - середній час справної роботи блока, год.

Сумарна (загальна) ймовірність безвідмовної роботи одного каналу СІФК на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_{\text{заг}}(t) = \prod_{N=1}^M P_N(t) \quad (4.30)$$

Приймаємо час безвідмовної роботи $t = 36\,000$ год.

У відповідній графі таблиці (табл. 4.2-4.5) вказуємо кількість потрібних елементів, а при необхідності - створюємо нові елементи, якщо вони відсутні в базі даних для розрахунку. ЕОМ автоматично проводить розрахунок ймовірності безвідмовної роботи і виводить результати у файл у вигляді таблиці.

Блок живлення є покупним виробом з гарантованим часом напрацювання на відмову більше $t = 36\,000$ год. Тому для нього приймаємо $P(t) = 0,95$.

Результати розрахунку зведені в таблиці. Для блоку А - табл. 4.2, для блоку Б – табл. 4.3, для блоку В - табл. 4.4

Із проведених розрахунків можна зробити висновок, що критерії надійності системи керування тиристорним перетворювачем електроприводів насосної станції задовільняють необхідні умови, бо загальна імовірність безвідмовної роботи системи на протязі часу t з урахуванням міжблочних з'єднань становить:

$$P_{\text{заг}}(t) = (0.7734 + 0.8279 + 0.8046) / 3 \cdot 0.931 = 0.747$$

В документацію на розроблене обладнання також включається відомість ЗІП, в яку входять запасні частини, інструменти та приналежності, які в першу чергу виходять з ладу. Відомість ЗІП для розроблюваної системи телекерування трансформаторами містить чотири типи елементів і подана в таблиці 4.5

Таблиця 4.2 - Дані розрахунку блоку авторегулювання

Елемент	Кількість	Інтенсивність відказів елементів
Резистори:		
вугільні плівочні	20	$0,55 \cdot 10^{-5}$
змінні резистори	9	$0,74 \cdot 10^{-5}$
Конденсатори:		
паперові	8	$0,07 \cdot 10^{-5}$
Діоди	6	$1,14 \cdot 10^{-5}$
Транзистори	2	$0,90 \cdot 10^{-5}$

Трансформатори	1	$0,16 \cdot 10^{-5}$
Запобіжники	3	$1,25 \cdot 10^{-5}$
Перемикачі:		
тумблери	2	$0,08 \cdot 10^{-5}$
роз'єми	1	$0,85 \cdot 10^{-5}$
З'єднання пайкою	5	$0,02 \cdot 10^{-5}$
Друкарська плата	3	$0,28 \cdot 10^{-5}$

Імовірність безвідмовної роботи вузла за період 36000 год. становить 0.8046

Таблиця 4.3 - Дані розрахунку блоку управління, обмеження і захисту

Елемент	Кількість	Інтенсивність відказів елементів (ступінь (-6))
Резистори:		
вугільні плівочні	51	$1,41 \cdot 10^{-5}$
змінні резистори	6	$0,49 \cdot 10^{-5}$
Конденсатори:		
паперові	8	$0,07 \cdot 10^{-5}$
керамічні	3	$0,02 \cdot 10^{-5}$
Діоди	17	$3,23 \cdot 10^{-5}$
Транзистори	6	$2,70 \cdot 10^{-5}$
Перемикачі:		
поворотні	1	$0,14 \cdot 10^{-5}$
Реле:		
загального типу	9	$1,60 \cdot 10^{-5}$
роз'єми	1	$0,85 \cdot 10^{-5}$
З'єднання пайкою	4	$0,01 \cdot 10^{-5}$
Друкарська плата	5	$0,46 \cdot 10^{-5}$

Імовірність безвідмовної роботи вузла за період 36000 год. становить 0.7734

Таблиця 4.4 - Дані розрахунку фазово-імпульсного блоку

Елемент	Кількість	Інтенсивність відказів елементів
Резистори:		
вугільні плівочні	11	$0,30 \cdot 10^{-5}$
змінні резистори	4	$0,33 \cdot 10^{-5}$
Конденсатори:		
Паперові	2	$0,02 \cdot 10^{-5}$
керамічні	1	$0,01 \cdot 10^{-5}$
Діоди	4	$0,76 \cdot 10^{-5}$
Транзистори	5	$2,25 \cdot 10^{-5}$
Трансформатори	1	$0,16 \cdot 10^{-5}$
Роз'єми	1	$0,85 \cdot 10^{-5}$
З'єднання пайкою	4	$0,01 \cdot 10^{-5}$
Друкарська плата	6	$0,55 \cdot 10^{-5}$

Імовірність безвідмовної роботи вузла за період 36000 год. становить 0.8279

Таблиця 4.5

Назва елемента	Кількість елементів, шт
Запобіжник ВП-I ТУ 14-2-256	5
Реле струмове РЕС-9 РСЧ.524.200сп	2
Конденсатор МБГО-2-160-4-II	2
Тиристор ТЛ4-250-9 ГОСТ10860-79	6

В системі керування передбачена схема захисту, яка конструктивно виконана на базі блоку управління, обмеження і захисту (блок Б). Даний блок містить такі схеми захисту:

- а) схема захисту від тривалого асинхронного ходу - плата Б4;
- б) схема порогового обмеження струму ротора - плата Б2;
- в) схема захисту від коротких замикань - плата Б1.

Також для захисту трансформаторів в системі керування від короткого замикання використовуються запобіжники FU.

Для захисту тиристорів використовуються RC-ланки.

4.7 Розроблення тест-плати для виявлення несправностей в автоматизованій системі управління

Для виявлення несправностей в електричній будові системи використовується тест-плата (див. графічну частину кваліфікаційної роботи). В своєму складі вона містить: випрямляч, згладжуючий фільтр, блок аналогово порівняння вхідної напруги і індикатор. Плата контролює наявність напруги на вході блоку живлення системи керування.

Схема працює таким чином: вхідна змінна напруга від трансформатора надходить на випрямляч VD1-VD4, в якому відбувається її випрямлення і послідовне згладження фільтром C1.

Постійна напруга з цього конденсатора подається на інвертований вхід ОП DA1, на прямий вхід якого подається сигнал порівняння (він знімається з подільника R3, R4). Резистори R1, R2 необхідні для зменшення значення напруги із трансформатора, яка може перевищувати максимально допустиме значення.

Таблиця 4.6 - Можливі несправності в системі і шляхи їх усунення

<i>Несправність</i>	<i>Причина</i>	<i>Спосіб усунення</i>
Після пуску двигуна не подається збудження	Несправний блок живлення; Обрив кола управляючого сигналу	Виміряти напругу у вихідних гніздах X1..X4 (Блок Г); Виміряти напругу у гніздах X3 (Блок Б)
Після пуску двигуна не подається збудження	Не відключається режим інвертування	Перевірити коло: розмикаючі контакти вимикачів Y1, Y2-K3, виміряти напругу в контрольному гнізді X3 блоку Б
Передчасна подача збудження при пуску двигуна	Несправне реле пуску K7 або його коло; Несправне реле інвертування, реле K3 не включається	Перевірити реле і усунути несправність.
Через пусковий опір йде струм (чути характерний звук “шипіння”)	Несправне коло відключення пускового опору	Відключити збуджував, перевірити ланцюги тиристорів VS7, VS8, ланцюг герконового реле K9. несправні елементи замінити
Відключається статорне коло двигуна. Збудження знімається. Горить лампа HL1	Коротке замикання в колі перетворювача; Порушена настройка схеми захисту від короткого замикання	Перевірити тиристори перетворювача, несправні замінити; Потенціометром R7 в блоці Б, настроїти систему

При нормальній вхідній напрузі від трансформатора, компаратор DA1 видає на виході нульовий сигнал. При суттєвій різниці вхідної напруги і заданого її значення, компаратором формується сигнал різниці, який переключає тригер DD1 і останній через транзистор VT1 подає живлення на індикаторну лампу HL1. Це вказує на аварійний режим.

Налагодження плати тестування здійснюється під налагоджуваними резисторами R4 і R6. Резистором R4 встановлюється необхідне значення опорної напруги порівняння, а резистором R6 - чутливість схеми до зміни величини вхідної напруги.

Можливі несправності в системі керування і способи їх усунення приведені в табл. 4.6.

4.8 Розроблення системи імпульсно-фазового керування та опис її принципу роботи

Регулювання напруги тиристорних перетворювачів, що використовуються для автоматизованого електроприводу, здійснюється за рахунок зміни кута керування тиристорів α . З цією метою кожен тиристорний перетворювач обладнують системою керування, яка забезпечує формування керуючих імпульсів, а також зсув цих імпульсів по фазі відносно анодної напруги тиристорів.

Такі системи керування називають імпульсно-фазовими (СІФК). Функціональна схема даної системи приведена на рис. 4.1.

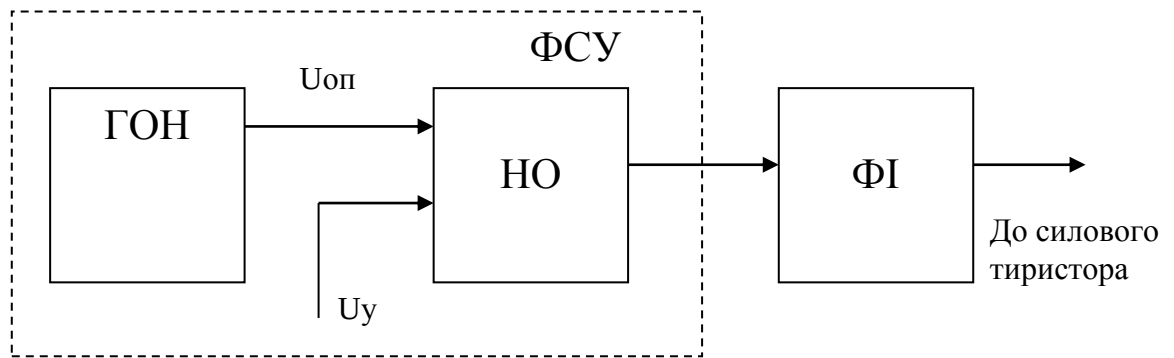


Рисунок 4.1 - Функціональна схема СІФК.

До складу системи входять: фазозсуваючий пристрій (ФСУ) і формувач імпульсів (ФІ). Фазозсуваючий пристрій в свою чергу складається з генератора опорної напруги (ГОН) і нуль-органу (НО). На вхід НО (вхід СІФК) подається крім опорної напруги $U_{оп}$ також зовнішня напруга керування U_y .

В загальному випадку напруга U_y може подаватись через спеціальний пристрій, який здійснює узгодження параметрів сигналу керування з входом СІФК.

В момент рівності опорної напруги і напруги керування нуль-орган перемикається і формувач імпульсів ФІ в цей момент часу видає керуючий імпульс.

Дана СІФК забезпечує необхідні вимоги до системи керування приводом. Вона забезпечує необхідні струм і напругу керування, що складає для тиристорів ТІ06-10-6 відповідно 0,1 А та 7 В.

Мінімальна тривалість керуючого імпульсу більша часу вмикання тиристора, що складає 10 мс. Витримуються також вимоги щодо крутизни імпульсів. Керуючий імпульс формується так, що крутизна переднього фронту імпульсу струму складає до 15 А/мкс, що менше критичного значення.

Система забезпечує необхідний максимальний діапазон регулювання кута α до 210° , володіє досить високою симетрією керуючих імпульсів по фазі (асиметрія $1,5^\circ$), а також дана СІФК має високу швидкодію.

Розглянемо більш детально роботу вибраної системи СІФК, принципова схема якої представлена на рис. 4.2. Система СІФК працює по принципу вертикального регулювання з пилкоподібною опорною напругою.

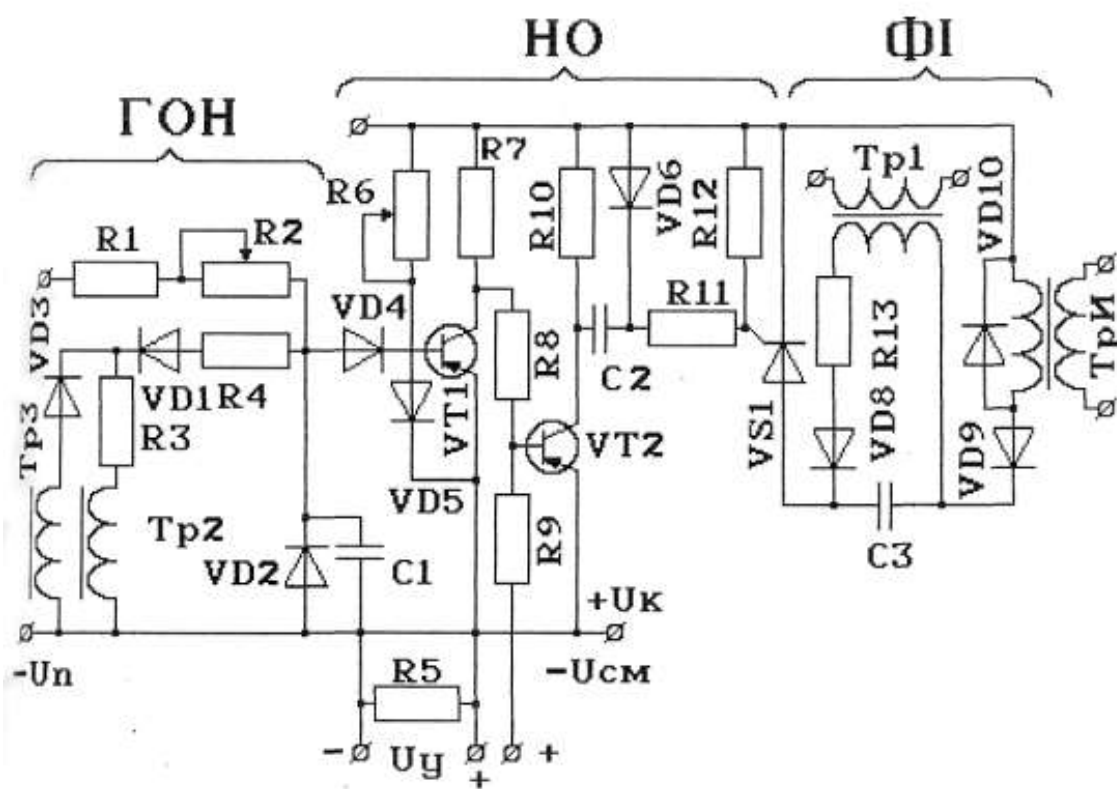


Рисунок 4.2 - Принципова схема СІФК

В якості генератора опорної напруги використовується генератор із зарядом ємності від джерела постійної напруги U_{Π} і діодним комутатором з розширеним діапазоном. Тут напруга комутації U_{κ} є результуючою від

двох синусоїдальних напруг U_{2a} і U_{2b} , зсунутих на 60° (U_{2a} і U_{2b} – анодні напруги відповідно фаз а і b).

Робота схеми ґрунтується на циклічному процесі заряду/розряду конденсатора C1, що визначає часову затримку імпульсу.

Доки керуюча напруга U_k має додатну полярність, діод VD2 залишається закритим, і конденсатор C1 переходить у фазу заряду. Напруга на конденсаторі U_c зростає до моменту, коли вона досягає значення U_k . Після цього моменту напруга U_c починає зменшуватися. Коли діод VD2 відкривається, напруга U_c дорівнює лише падінню напруги на ньому. Як тільки діод VD2 закривається, цикл заряду C1 відновлюється, і процес повторюється.

Напруга керування U_y , що знімається з виходу емітерного повторювача, та опорна напруга U_{op} подаються на вхід нуль-органу (НО), реалізованого на транзисторах VT1 і VT2.

Напруга НО формується як різниця напруг U_k та U_{op} і подається на перехід база-емітер транзистора VT1.

При $U_{вх} < 0$ ($U_{вх}$ – напруга НО) транзистор VT1 відкрито завдяки протіканню струму по ланцюгу: $+U_k \rightarrow$ емітер VT1 $\rightarrow$ база VT1 $\rightarrow$ R6 $\rightarrow -U_k$.

Транзистор VT2 при цьому закритий, оскільки його база має додатний потенціал відносно емітера, що забезпечується напругою замикання $U_{зм}$, яка надходить на базу VT2 через резистор R9.

При досягненні вхідною напругою НО дуже малого додатного значення відносно емітера VT1 цей транзистор переходить у закритий стан. Закриття VT1 викликає зміну потенціалу бази VT2 і призводить до його швидкого відкривання.

Внаслідок відкривання транзистора VT2 на резисторі R12 формується короткий імпульс напруги.

Напруга $U_{зм}$ слугує для плавного регулювання початкової фази вихідних імпульсів, забезпечуючи можливість корекції фазування в системі керування.

Сформований на R12 імпульс ($U_{вих.но}$) подається на керуючий електрод допоміжного тиристора VS1, який є частиною тиристорного формувача імпульсів (ФІ).

Основне призначення ФІ – підсилення вихідного імпульсу нуля-органу та забезпечення необхідної гальванічної розв'язки між схемою керування та потужним силовим колом.

Конденсатор C3 напругою задання по колу $U_3 \rightarrow C3 \rightarrow VD8$. З моменту відкриття тиристора конденсатор розряджається по колу $C \rightarrow$ первинна обмотка імпульсного трансформатора $Tr1 \rightarrow VS1 \rightarrow R13 \rightarrow C3$.

Параметри даного кола підбирають таким чином, щоб по первинній обмотці імпульсного трансформатора Tr1 протікав короткочасно потужний імпульс струму. В результаті у вторинній обмотці трансформатора індукуюється потрібний короткий імпульс струму $i_{уп}$.

В якості вхідного пристрою використовується емітерний повторювач, схема якого приведена на рис.4.3. Емітерний повторювач перетворює сигнал на його вході в сигнал управління U_y значно більшої потужності.

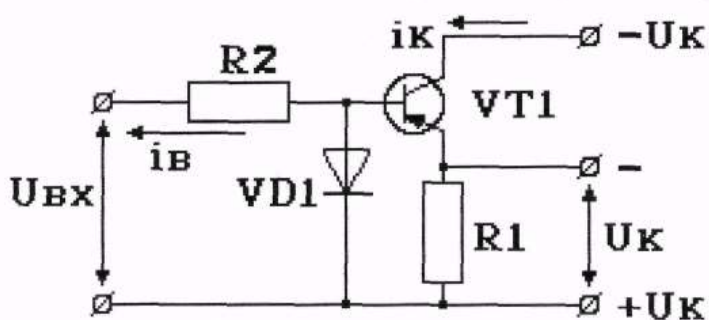


Рисунок 4.3 - Вхідний пристрій

При протіканні струму i_b через емітер та базу транзистора VT1 за рахунок вхідного сигналу U_{bx} транзистор відкривається, і по колу: $+U_k \rightarrow R1 \rightarrow \text{емітер VT1} \rightarrow \text{колектор VT1} \rightarrow -U_k$ протікає струм i_k в h_{21e} раз більший струму i_b .

5 Спеціальна частина

5.1 Розроблення укрупненого алгоритму роботи системи керування

Укрупнений алгоритм роботи системи керування показаний рис. 5.1. Система керування тиристорними перетворювачами електроприводів насосної станції повинна забезпечувати певну послідовність ввімкнення тиристорних перетворювачів шляхом керування подачею сигналів керуючої напруги з фазоімпульсного блоку на управляючі електроди тиристорів у відповідності з сигналами, які поступають від давачів.

В процесі роботи безперервно аналізується сигнал від давача струму ротора: при виявленні струмів короткого замикання відбувається миттєве блокування імпульсів блоку В та подача команди на вимикач, оминаючи режим інвертування.

5.2 Моделювання та побудова статичних швидкісних характеристик розімкненої та замкненої системи автоматичного регулювання в середовищі MathCAD

При розрахунку характеристик і фізичних величин системи імпульсно-фазового керування повинні враховуватися реальні параметри раніше розрахованих та вибраних елементів схеми.

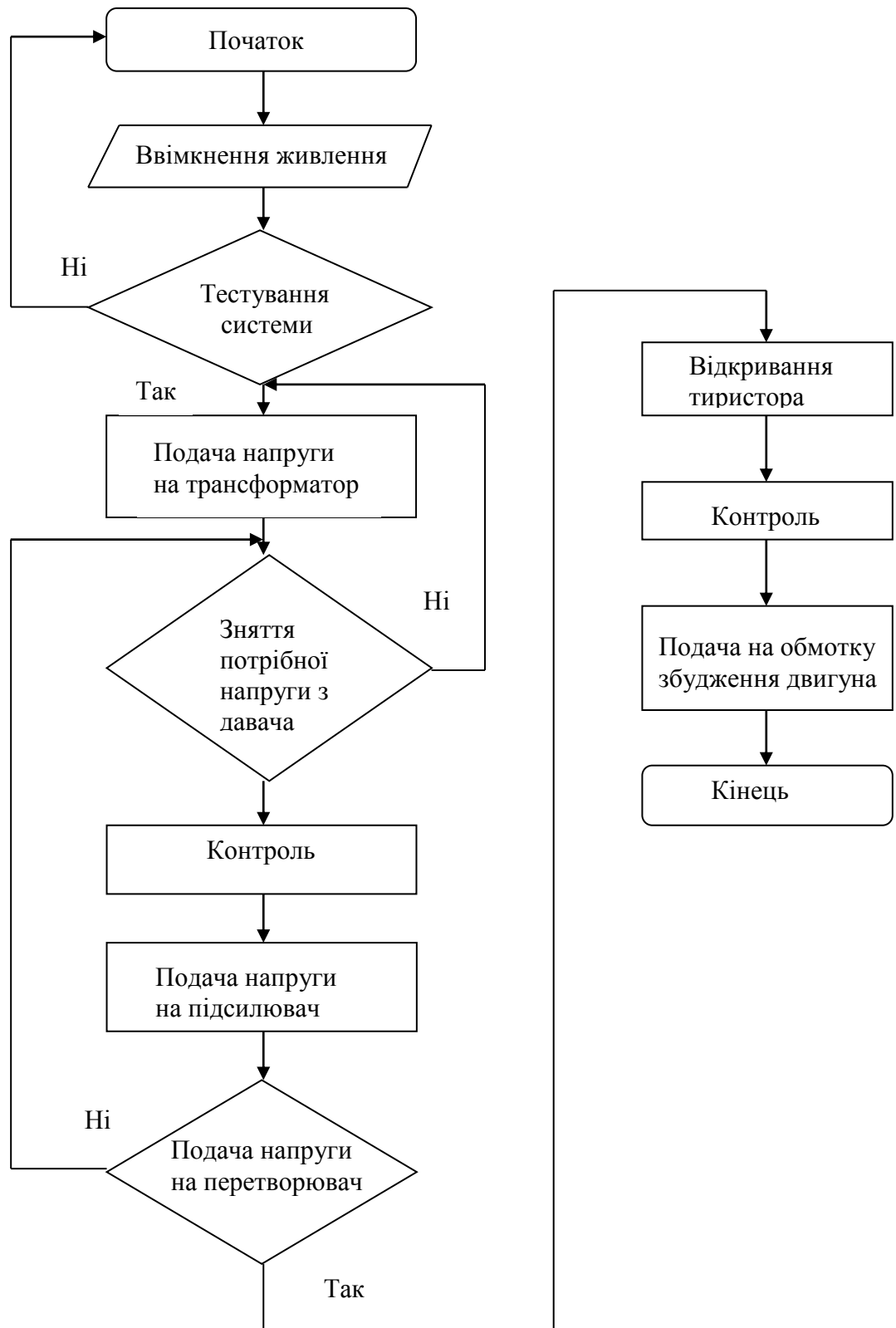


Рисунок 5.1 – Алгоритм функціонування системи керування

Залежність вихідної напруги електроприводу (ЕП) [11] $U_{\text{еп}}=U_y$ від напруги на його вході показана на рис. 5.2. Напруга на вході ЕП $U_{\text{вх.еп}}$ є алгебраїчною сумою напруги зміщення $U'_{\text{см}}$ та зовнішньої напруги управління U'_y , тобто $U_{\text{вх.еп}} = U'_{\text{см}} \pm U'_y$.

Напруга $U'_{\text{см}}$ обирається з умови встановлення бажаного початкового фазування, що дозволяє, наприклад, досягти кута регулювання α , рівного 90° , коли напруга $U'_y = 0$, при цьому регулювання самої напруги $U'_{\text{см}}$ дає можливість плавно змінювати це початкове фазування.

Також, в СІФК передбачено ступінчаста зміна первинної фази вихідних імпульсів за рахунок кроків через 30° . Це реалізовано за допомогою фазування напруги на трансформаторі, що заживлює діодний комутатор.

Напруга керування $U'_y=0$ (на вході емітерного повторювача ЕП) визначає вихідну напругу $U'_{\text{е.п}}$ (див. рис. 5.2). Якщо на вхід ЕП подається напруга керування $U'_{y,\text{п}}$ узгодженої полярності, напруга $U'_{\text{е.п}}$ зростає, причому схема ЕП обмежує це зростання на максимальному рівні $U'_{\text{е.п max}}$. І навпаки, при подачі на вхід ЕП напруги керування U'_y зворотної полярності, напруга $U'_{\text{е.п}}$ зменшується, маючи також обмеження мінімального значення на рівні $U'_{\text{е.п min}}$.

Робота СІФК ілюструється часовими діаграмами (рис. 5.3, а, б), де зображено криві анодної напруги тиристора u_a та опорної напруги $u_{\text{оп}}$ (рис. 5.3, б), причому керуючий імпульс формується точно у момент зрівнювання напруг $u_{\text{оп}}$ і $U'_{\text{е.п}}$.

При вказаному фазуванні, коли вхідна напруга U'_y на ЕП рівна нулю, вихідна напруга $U'_{\text{е.п}}=U'_{\text{е.п0}}$. Отже керуючий імпульс буде згенерований у момент часу, який відповідає куту $\alpha_0=90^\circ$.

В емітерному повторювачі реалізована функція зміни рівнів $U'_{e.n.max}$ і $U'_{e.n.min}$, що дозволяє встановлювати максимальний кут α_{max} для інверторного режиму та мінімальний кут α_{min} для випрямляючого режиму.

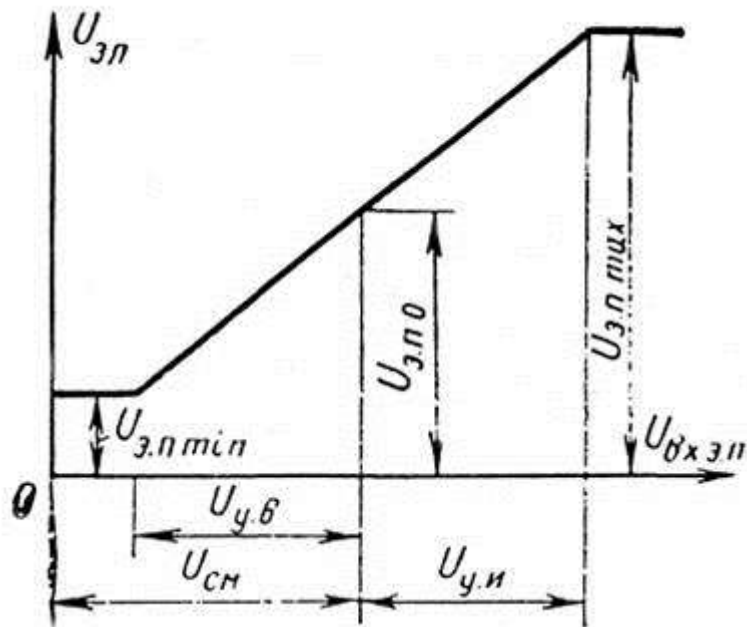


Рисунок 5.2 - Залежність вихідної напруги електроприводу від вхідної

Для прикладу, на рис. 5.3 представлено випадок обмеження вихідної напруги ЕП, при якому кут α змінюється в межах $30^\circ < \alpha < 150^\circ$. Далі, імпульси напруги, що сформовані за допомогою нуля-органу та зняті з резистора R12 (див. рис. 4.2), подаються на керуючий електрод допоміжного тиристора Т тиристорного генератора імпульсів ФІ. При цьому вихідні імпульси знімаються з вторинної котушки імпульсного трансформатора ТрІ та надходять у силове коло.

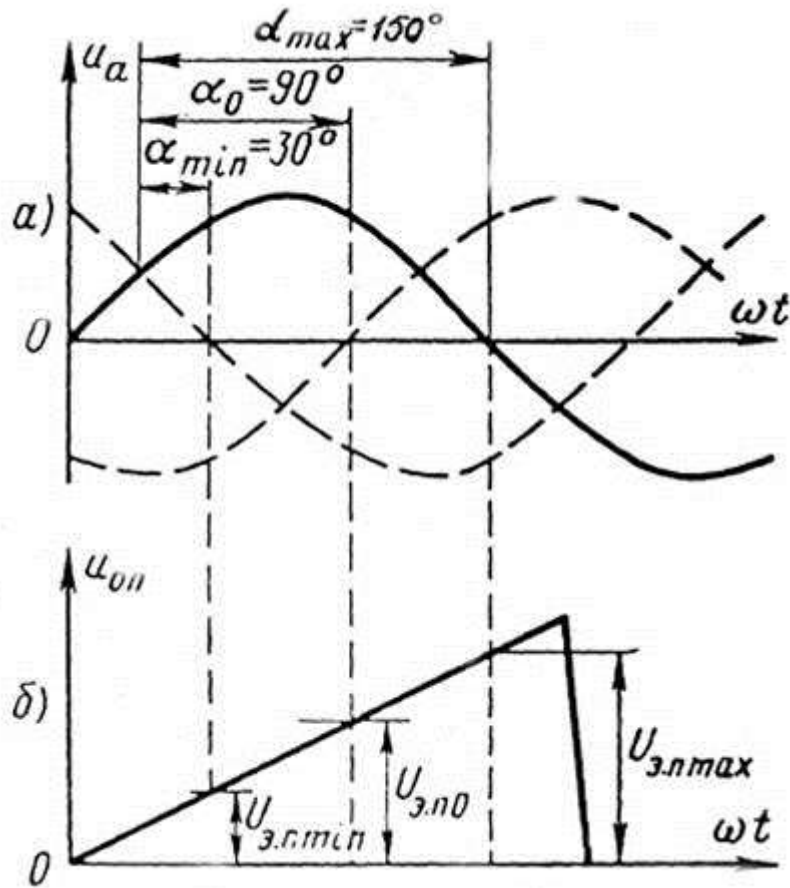


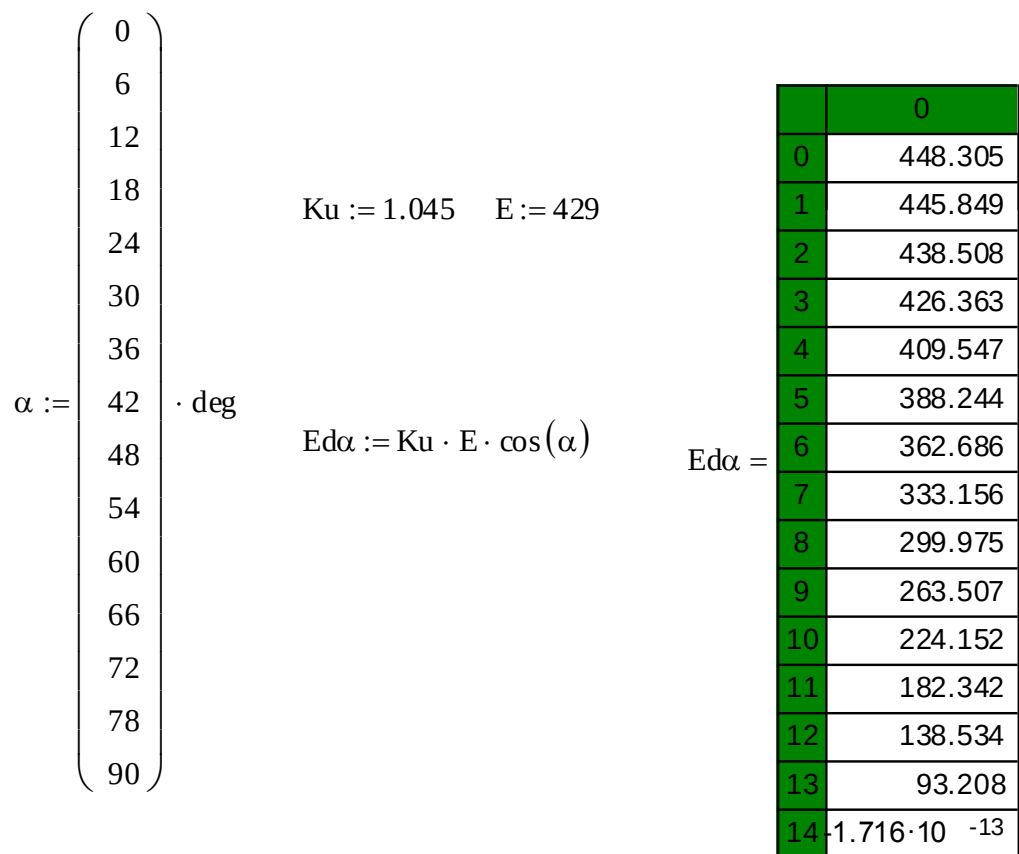
Рисунок 5.3 - Часові діаграми роботи СІФК

Регульовальна характеристика являє собою залежність середнього значення випрямленої е.р.с. $E_{d\alpha}$ від кута регулювання α , і може бути побудована по формулі:

$$E_{d\alpha} = q \cdot \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{m}{\pi} \cdot \cos \alpha = K_U \cdot E_2 \cdot \cos \alpha \quad (5.1)$$

де $K_U = 1,045$ та $E_2 = 429$ В.

При підстановці в (5.1) значень α від 0 до 90 електричних градусів, отримуємо характеристику для випрямного режиму. Результати обчислень:



Побудована по цих даних характеристика представлена на рис. 5.4

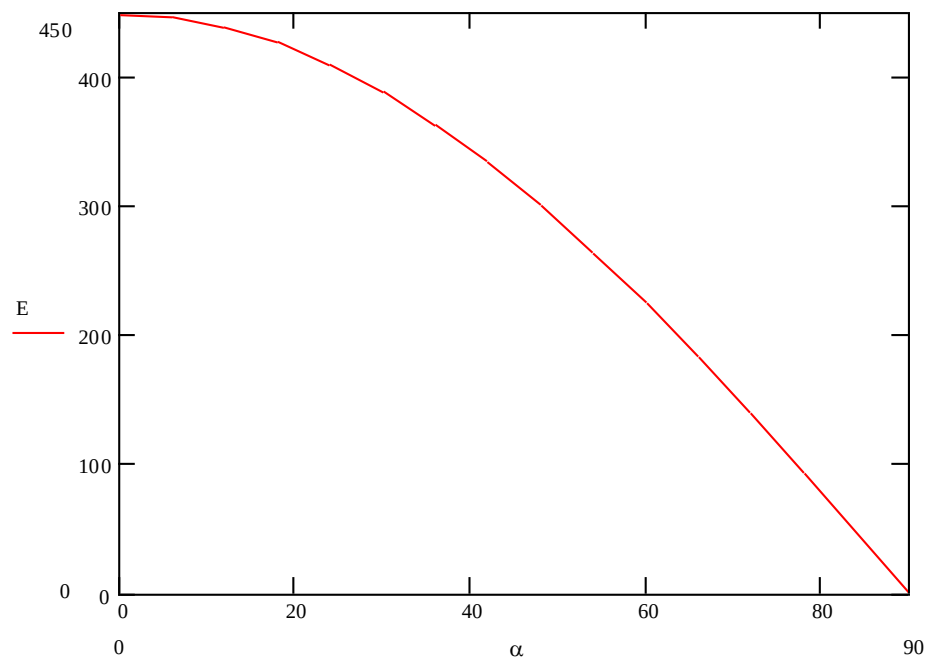


Рисунок 5.4 - Регулювальна характеристика.

Проведемо визначення кутів регулювання і побудову зовнішньої характеристики.

Зовнішня характеристика перетворювача для випрямляючого режиму $U_{d\alpha} = f(I_d)$ може бути визначена по формулі:

$$U_{d\alpha} = E_{d0} \cdot \cos \alpha - \Delta U_a - I_d \cdot (K_X \cdot X_{TP} + K_R \cdot R_{TP} + R_{qp} + R_{np}) \quad (5.2)$$

Вираз (5.2) представляє собою рівняння похилої прямої лінії, нахил (жорсткість) якої визначається виразом в дужках.

Для випрямлячів середньої потужності часто індуктивний опір X_{TP} набагато більше активних опорів, і тому ними можна знехтувати, тоді рівняння зовнішньої характеристики матиме вигляд:

$$U_{d\alpha} = E_{d0} \cdot \cos \alpha - \Delta U_a - I_d \cdot K_X \cdot X_{TP} \quad (5.3)$$

Якщо в якості базисної величини прийняти E_{d0} , то рівняння зовнішньої характеристики випрямляча у відносних величинах з врахуванням того, що:

$$R_{екв} = K_X \cdot X_{TP} + K_R \cdot R_{TP} + R_{qp} + R_{np} = K_X \cdot X_{TP} + \sum R \quad (5.4)$$

буде мати вигляд:

$$U_{d\alpha}^* = \frac{U_{d\alpha}}{U_{d0}} = \cos \alpha - \frac{\Delta U_a}{E_{d0}} - \frac{R_{екв} \cdot I_d}{E_{d0}} \quad (5.5)$$

або:

$$U_{d\alpha}^* = \cos \alpha - \frac{\Delta U_a \%}{100} - \frac{\Delta U_x \%}{100} \quad (5.6)$$

де

$$\Delta U_{\alpha} \% = \frac{\Delta U_{\alpha} \cdot 100\%}{E_{d0}}, \quad \Delta U_x \% = \frac{I_d \cdot K_x \cdot X_{TP} \cdot 100\%}{E_{d0}} \quad (5.7)$$

- відносні значення спадів напруги на вентилях, активних та реактивних опорах, виражені в процентах до середнього значення випрямленої е.р.с. E_{d0} .

Величина $\Delta U_x \%$ визначає нахил графіку зовнішньої характеристики, що описує схему, а $\Delta U_{\alpha} \%$ величина визначає величину паралельного зміщення характеристики.

Як уже було вказано вище, величиною $\Delta U_{\alpha} \%$ можна знехтувати, тоді рівняння зовнішньої характеристики у відносних одиницях приймає вигляд:

$$U_{d\alpha}^* = \frac{U_{d\alpha}}{U_{d0}} = \cos \alpha - \frac{\Delta U_x \%}{100} \quad (5.8)$$

Побудована по залежності (5.8) характеристика, представлена на рис. 5.5.

Кут регулювання визначає величину напруги в колі постійного струму, відповідно, його граничні значення можуть бути знайдені виходячи з потрібних величин напруг, що визначаються діапазоном регулювання, і з розв'язку рівняння зовнішньої характеристики відносно косинуса кута керування. Отже вирішуємо (5.3) відносно $\cos \alpha$:

$$\cos(\alpha) = \frac{U_{dTP} + \Delta U_{\alpha} + I_d \cdot (K_x \cdot X_{TP} + \sum R)}{E_{d0}}$$

де U_{dTP} - необхідне значення випрямленої напруги, В;

α_{TP} - необхідний кут регулювання.

Підставивши необхідні дані, одержимо:

$U_{dTP} = 220 \text{ В}; \Delta U_a = 2 \text{ В}; I_d = 7.9 \text{ А}; E_{d0} = 418 \text{ В}; K_x = 0.955; X_{TP} = 2 \text{ Ом}; \Sigma R = 0.76 \text{ Ом};$

$$\cos \alpha_{TP} = (220 + 2 + 7,9(0,955 \cdot 2 + 0,76)) / 418 = 0,6816$$

$$\alpha_{TP} = \arccos(0.6816) = 47.03$$

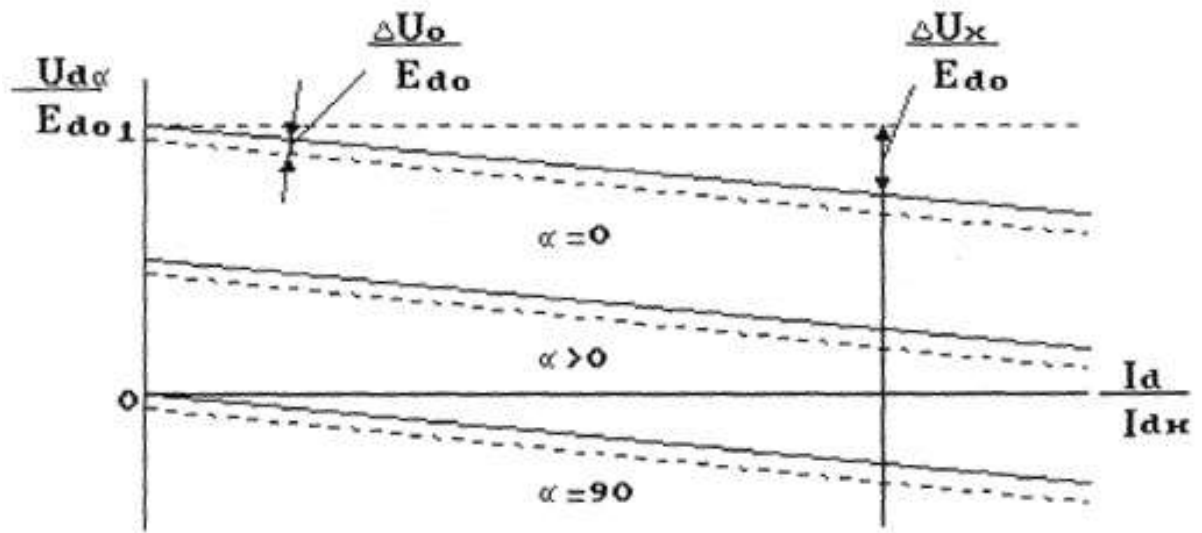


Рисунок 5.5 - Зовнішня характеристика системи електроприводу

6 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

6.1 Заходи з охорона праці

Забезпечення безпеки праці - це складний процес, в якому можна виділити елементарні складові, вихідні положення, ідеї, що називаються принципами. Специфіка виробництва, особливості технологічних процесів, різноманітність застосування обладнання - все це обумовлює безпосередність принципів забезпечення безпеки. Ці принципи мають важливе методологічне значення.

Повноцінна профілактична робота по забезпеченню безпеки на стадії науково-дослідних, дослідно-конструкторських, проектних робіт, а також при експлуатації та реконструкції виробничих об'єктів можлива лише на основі осмислення врахування принципів безпеки та охорони праці.

Теоретичне та пізнавальне значення принципів полягає в тому, що з їх допомогою визначається рівень знань про небезпеки навколишнього світу, і відповідно формуються вимоги до проведення захисних заходів і методи розрахунку.

Значення принципів можливе в практичному відношенні, так як вони дозволяють знаходити оптимальні рішення захисту від небезпек на основі порівняльного аналізу конкуруючих варіантів.

Принципи забезпечення безпеки та заходи по охороні праці необхідно розглядати у взаємодії, тобто як елементи, що доповнюють один одного.

Принципи забезпечення безпеки по ознаці їх реалізації умовно поділяють на чотири класи:

- орієнтуючі;
- технічні;
- управлінські;
- організаційні.

Орієнтуючі принципи являють собою основоположні ідеї, що визначають напрям пошуку безпечних рішень та служать методологічною та інформаційною базою. До них відносяться принципи системності, деструкції, ліквідації та зниження небезпеки, заміни оператора, інформації, класифікації, нормування.

Технічні принципи направлені на безпосереднє попередження дії небезпечних факторів та базуються на використанні фізичних законів. До них відносяться принципи захисту відстанню та часом, екранування, міцності, недоступності, блокування, герметизації, дублювання.

Управлінським називають принципи, що визначають взаємозв'язок і відношення між окремими стадіями та етапами процесу забезпечення безпеки.

До організаційних відносяться принципи, з допомогою яких реалізуються положення наукової організації праці.

Існує багато методів створення здорових і безпечних умов праці, нормального мікроклімату в робочих приміщеннях підприємств, які забезпечують високу продуктивність праці. В основному - це організаційні, загально санітарні, технічні й індивідуально-захисні методи, які треба здійснювати згідно з технологічним процесом виробництва.

Організаційні методи, що забезпечують нормальне самопочуття працюючих, такі:

1. Встановлення раціонального режиму праці та відпочинку;
2. Обладнання близько розташованих та зручних місць для

відпочинку.

3. Точне додержання граничнодопустимих концентрацій отруйних газів, парів і пилу в повітрі робочої зони виробничих приміщень.

4. Планово-запобіжний ремонт і попередження розладнання апаратів та механізмів, особливо порушень щільності, що має важливе значення для уникнення аварій і очищення повітря виробничих приміщень.

5. Навчання робітників правильних прийомів праці, засобів ліквідації неполадок і аварій.

6. Організація правильного зберігання, видачі, транспортування, застосування і знищення отруйних та шкідливих речовин.

Загально санітарні заходи повинні відповідати вимогам «Санітарних норм проєктування промислових підприємств». До цих заходів належать:

1. Раціональний питний режим. Встановлено, що протягом робочої зміни в гарячому цеху організм робітника втрачає до 4-5 л. води, а з нею - близько 50-80 г. Кухонної солі, необхідної для нормального функціонування людського організму. Сильну спрагу, що виникає через втрату такої кількості води, а особливо солі, не можна задовольнити питною водою. Для відновлення водного і сольового балансу в організмі працюючих гарячі цехи забезпечуються газованою підсоленою водою.

2. Санітарне навчання робітників, що особливо важливо для робітників, які працюють з отрутами.

3. Обов'язкова організація при кожному підприємстві лікувальних установ і пунктів першої допомоги.

4. Дотримання особистої гігієни, для чого досить мати в побутових приміщеннях цехів достатню кількість душів, умивальників, посуду для полоскання рота содовим розчином.

5. Періодичний медичний огляд усіх, хто працює в шкідливих цехах, щоб запобігти тяжким наслідкам отруєння.

До технічних методів належать:

1. автоматизація виробничих процесів, бо тяжка фізична праця посилює порушення терморегуляції.
2. Правильна розстановка устаткування, машин і апаратів у приміщеннях.
3. Обмеження надходження конвекційного тепла і променистої енергії в робочу атмосферу.
4. Ізоляція апаратури з великими тепловиділеннями від усього приміщення і правильне розташування щодо сонячної радіації.
5. Влаштування теплових повітряних завіс біля дверей або вікон для захисту від різкого охолодження повітря навколо робочих місць.
6. Очищення від пилу промислових та вентиляційних викидів і припливного повітря.
7. Охолодження газів та мокре уловлювання.
8. Герметизація технологічного процесу, якої досягають укриттям місця утворення пилу і відсмоктування.
9. Широке застосування вентиляції, що дає можливість створити у виробничих приміщеннях нормальні метеорологічні умови (температуру, вологість і швидкість руху повітря).

Індивідуально-захисні методи - це попередній і періодичний огляди робітників, спецхарчування, Індивідуальні захисні пристрої та спецодяг.

До основних методів і засобів забезпечення здорових умов праці на підприємствах приладобудування належать попередній і періодичний огляди робітників.

На роботи, пов'язані із застосуванням отруйних речовин, не допускаються жінки і підлітки, а також особи з певними вадами в стані здоров'я згідно з особливим переліком професій.

Щоб запобігти розвитку хронічних професійних захворювань, регулярно проводяться медичні огляди від одного до чотирьох разів на рік (залежно від умов виробництва).

Під час навчання робітників обов'язково треба ознайомлювати з дією отрут і пилу на організм, ознаками отруєння та заходами першої допомоги, а також з особистою гігієною, якої слід неухильно дотримуватися.

Спецхарчування, що видається на деяких роботах, пов'язаних з виділенням отрут, також належить до профілактичних заходів.

Дуже важливо запроваджувати індивідуально-захисні засоби проти травматизму та професійних отруень: одяг для захисту тулуба, рук, ніг і пристрої для захисту органів дихання, зору, слуху.

Норми видачі спецодягу для працівників підприємств установлюють згідно з існуючими типовими галузевими нормами.

Для захисту тіла від лугів, кислот, отруйних речовин, пилу, сильно забруднюючих речовин, променистої енергії та ін. служить захисний одяг (спецодяг), який не порушує теплорегуляції організму. Він має відповідати певним гігієнічним вимогам: бути повітронепроникним, гігроскопічним, мати малу теплопровідність, не зв'язувати рухів робітника, зшитий так, щоб частини його не потрапляли в рухомі деталі механізмів тощо.

Для захисту голови залежно від роду роботи застосовують головні убори, що зберігають волосся від захвачування рухомими частинами машин, косинки для захисту від пилу.

Руки захищають рукавицями: від хімічних уражень -брезентовими, комбінованими, гумовими; від електричного струму - діелектричною гумою; від лаків, фарб та ін. - з сириці.

Працюючи з шкідливими речовинами, слід захищати відкриті частини тіла.

Захист шкіри рук робітників і профілактика шкірних захворювань

поряд із засобами особистої гігієни здійснюється за допомогою профілактичних (буферних, бар'єрних) паст (мазей) і спеціальних миючих та очисних засобів.

Основне призначення захисних мазей полягає в утворенні буфера (бар'єра) між шкірним покривом людини і несприятливими для нього зовнішніми факторами.

Щоб зберегти шкіру від дії охолоджуючих емульсій і содових розчинів, застосовують ожиряючі мазі (з олії, вазеліну, ланоліну).

Для очищення шкіри від виробничих забруднень жирами, лаками, фарбами, вживаються такі миючі засоби, як паста Рахманова та мило санітарного інституту імені Ерісмана, а також мильно-ланолінова паста.

Для захисту ніг застосовують взуття з шкіри або замінювачів, ботинки, чоботи, взуття на товстій підошві. Ураженню електрострумом запобігають боти, калоші й чоботи з діелектричної гуми, а промоканню, дії лугів та кислот - спеціальне гумове взуття.

Органи дихання захищають від шкідливих парів, газів та пилу за допомогою респіраторів і протигазів. Распірати призначені для очищення повітря від пилу і в деяких випадках - від газів і парів, а протигази - для захисту органів дихання від отруйних речовин.

Фільтруючі респіратори і протигази мають фільтри для очищення забрудненого повітря при вдиханні; шлангові протигази подають чисте повітря для дихання; ізолюючі - подають кисень з балона, що є складовою частиною протигазу.

Ізолюючі респіратори і протигази застосовують тоді, коли в повітрі менше 15 % кисню або велика концентрація отруйних парів та газів, які не може поглинути фільтруючий респіратор або протигаз.

Для захисту органів зору від пилу, інфрачервоної та ультрафіолетової радіації користуються різними типами окулярів.

Ефективним засобом захисту очей, обличчя та шиї від шкідливих променів є шоломи або щитки із встановленими в них відповідними захисними скельцями.

6.1.1 Вплив електричного струму на людину

Дія електричного струму на людину може проявлятися в різних аспектах. Електричний струм може викликати теплові опіки, ураження нервової системи та інших порушень нормальної життєдіяльності людського організму.

Розрізняють два типи уражень електричним струмом - електричний удар, при якому ураженими виявляються внутрішні органи людини, в тому числі нервова система, і порушується нормальна робота організму.

Найбільш небезпечними для людини електричні ударами. Найбільш частими причинами ураження струмом є дотикання до оголених або ж погано ізольованих струмоведучих частин виявлених під напругою.

У випадку, коли гальванічний контакт організму людини з струмоведучими частинами приладу (наприклад, електродами) необхідний відповідно до умов проведення терапевтичної процедури, ураження пацієнта електричним струмом може відбутися через неполадки електричної схеми приладу.

Основні фактори, що визначають безпеку приладу ураження електричним струмом і його наслідки являються:

- сила струму, що протікає через організм людини;
- характер діючого струму (постійний чи змінний);
- частота (для змінного струму);
- площа контакту струмоведучих частин з організмом потерпілого і

тривалість дії струму;

- стан організму потерпілого і шляхи проходження струму через організм;
- стан навколишнього середовища.

Малі струми до **12-25 мА** змінного струму і до **25-30 мА** постійного струму не є небезпечними для організму людини, при більшій величині струму, починаючи приблизно з **20-25 мА** для змінного і **40-50 мА** для постійного струму, м'язи кінцівок судомно скорочуються, а інколи паралізуються, і потерпілий в не змозі самостійно відірватися від струменевих частин, при величині змін струму порядку **100 мА** більше настає параліч дихання і в ряді випадків також параліч серцевої діяльності.

Чим довше людина знаходиться під дією електричного струму небезпечної модальності, тим сильніше ураження. З підвищенням частоти змінного струму небезпека зменшується. Найбільш небезпечним є струм частотою 40-50 Гц. Сюди відноситься і електричний струм, що використовується для живлення більшості стаціонарної апаратури від мережі ~220 В. (частота 50 Гц.). Струми високих частот (порядку десятків і сотень тисяч герц) електричного удару не викликають. Однак вони є небезпечними, оскільки можуть привести до виникнення опіків.

На результат ураження значно впливає опір тіла людини проходженню електричного струму. Організм людини складається в середньому на 70% з розчинів солей, які володіють високою електропровідністю, але поряд з цим в організмі є ділянки, що володіють досить великим опором. Опір організму падає при довгочасному впливові електричного струму, що приводить до погіршення наслідків ураження.

Основною складовою активного опору організму є електричний опір

організму зовнішнього рогового покриву шкіри - епідермісу. Опір шкірної оболонки додає при зволоженні шкіри із збільшенням площі дотику струмоведучими частинами, він змінюється у обернено пропорційному відношенні до площі дотику. Опір шкірної оболонки падає з ростом температури і вологості зовнішнього середовища. Опір організму і наслідки ураження залежать також від індивідуальних властивостей організму. Небезпека зростає, якщо впливу електричного струму піддаються люди із захворюваннями серцево-судинної системи, нервової системи, органів внутрішньої секреції, хворі туберкульозом і т.д.

Велика кількість і різноманітність факторів, що впливають на опір організму, приводять до того, що воно змінюється в досить широких межах - від декількох сотень до декількох десятків тисяч ом, в силу чого опір організму в розрахунках може вважатися лише орієнтовною величиною. При сухій непошкодженій шкірі опір людського організму, як показують дослідження, рівний приблизно 40000-100000 Ом, при знятому верхньому роговому шарі шкіри він зменшується до 800-1000 Ом.

На наслідки ураження впливає шлях проходження струму. Найбільш небезпечним є струм, що проходить через миттєво важливі центри: серце, легені, головний мозок, а також вздовж нервових стовпів. Тому особлива небезпека виникає при проходженні електричного струму через грудну клітку, а також вздовж осі тіла (рука-нога-земля).

Аналізуючи параметри діючого на організм людини струму, що використовується згідно методики з рівнями небезпечних впливів, що описані вище, легко бачити, що в нормальному експлуатаційному режимі прилад не є небезпечним. Конструкція електродів дозволяє локалізувати вплив на певній ділянці (рефлекторній зоні). Варто відмітити, що всі прилади розглянуті раніше здійснюють вплив електричного струму через електроди, спільного затискача, що приводить до того, що струм протікає

через все тіло пацієнта, впливаючи не тільки на рецептори, крім того, як фактор безпеки проведення процедури проектованим приладом можна вважати і те, що вихідні схеми його працюють в джерелах струму, тобто при будь-якому опорі електродної тканини, як видно з попереднього, довгочасній дії струм зменшується, діючий струм залишається незмінним. Тобто виключається можливість пробою стимульованої тканини.

Таким чином, небезпека експлуатації приладу з'являється лише при виникненні певних неполадок.

6.1.2. Розрахунок місцевої витяжної вентиляції при пайці друкованої плати

При пайці електрорадіоелементів використовують припої і флюси. В якості припоїв використовують найчастіше сплав олова з свинцем. В якості флюсу найчастіше використовують каніфоль, що є смолою хвойних дерев. Випари свинцю і олова є шкідливими для організму. Найбільш небезпечними є випари свинцю. Хронічна свинцева інтоксикація відноситься до числа найбільш серйозних професійних захворювань. Встановлено допустиму концентрацію свинцю та його неорганічних сполук в повітрі робочих приміщень 0.01 мг/м^3

Тому для виконання цих вимог застосовують місцеву вентиляцію. Одним із варіантів її виконання є відсмоктувальні панелі, їх розташовують збоку від джерела випаровувань вертикально чи похило.

Проведемо розрахунок.

Об'єм повітря, що засмоктується, ($\text{м}^3/\text{год}$)

$$L = 0.6 * C * Q^{1/3} * (H + B)^{5/3},$$

де: С - коефіцієнт пропорційності;

Q - коефіцієнт пропорційності;

Н - Відстань від верху джерела до центру отворів, м.;

В - ширина, м.

$$C = 240 * \left(\frac{1}{H + B} \right)^{\frac{2}{3}} = 240 * \left(\frac{0.3}{0.2 + 0.2} \right)^{\frac{2}{3}} = 198$$

Орієнтовне значення коефіцієнта Q=1200. Тоді об'єм повітря, всмоктуваного за 1 год., буде рівний:

$$L = 0.6 * 198 * 1200^{\frac{1}{3}} * (0.2 + 0.2)^{\frac{5}{3}} = 590 \quad \left(\frac{m^3}{год} \right)$$

Для кращої вентиляції, разом з місцевою вентиляцією використовується і загальна.

Підсумовуючи розрахунок, можна сказати, що рівень експлуатаційної безпеки в цеху пайки відповідає нормам.

6.1.3. Розробка заходів безпеки у спроектованих конструкціях

При експлуатації даної системи слід дотримуватися заходів безпеки при роботі з електронними приладами, що живляться від мережі 220В, на розетках вводу напруги повинні бути написи «~220В», на кришках блоків живлення УБП-С повинні бути написи «Обережно! напруга ~220В» та «З відкритою кришкою блока в електромережу не вмикати!», на з'єднаннях кабелів, що підводять живлення ~220В повинні бути бірки з написом «~220В». На внутрішній стороні задньої стінки Корпуса ПО, над клемниками підводу сигналів ТУ повинен бути напис «Обережно! напруга ~220В».

При монтажі Корпуса ПО спочатку проводиться монтаж кабелів

сигналів ТУ, ТС та ТІ з сторони апаратури контролю, а пізніше з сторони виконавчих механізмів. При монтажі кабелів внутрішня сторона задньої стінки контейнера повинна бути добре освітлена.

При монтажі та експлуатації апаратури ЦДПК також слід дотримуватися правил безпеки при експлуатації електронних пристроїв та мережі змінного струму $\sim 220\text{В}$. При монтажі каналних комплектів, особливо при монтажі антени, яка встановлюється висотних баштах або стовпах, слід дотримуватися правил безпеки при роботі на висоті, використовувати страхуючий пояс.

Екран ПЕОМ диспетчера повинен відповідати міжнародним стандартам стосовно пониженого рівня випромінювання, таких як «Low radiation», «Energy Star», «MPR II», TCO-99, а також повинен бути захищений захисним фільтром. При відсутності оперативного втручання диспетчера в роботу ПЕОМ, використовувати режим програмного виключення високої напруги монітора та перехід його в режим чекання.

Стосовно екологічної безпеки дана система не становить жодної загрози і не виділяє шкідливих речовин. Електропостачання є найбільш екологічно чистою галуззю енергетики. Проектована система навпаки, допоможе оперативно втручатися у процес загрози екологічній ситуації. Наприклад при аварії високовольтної лінії система автоматики автоматично вимикає подачу електроенергії на цю лінію.

Автоматизована система дозволить дистанційно вимкнути додаткові роз'єднувачі лінії та увімкнути заземлення ВЛ, що усуне необхідність виконувати дану процедуру оперативній бригаді, яка зразу ж може приступати до ліквідації аварії.

6.2 Заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях.

6.2.1 Радіаційний захист населення в надзвичайних ситуаціях.

Організація дозиметричного контролю.

Дозиметричний контроль проводиться під керівництвом начальників всіх ступенів та командирів формувань ЦО.

Дозиметричний контроль включає:

- контроль опромінення;
- контроль радіоактивного забруднення.

Контроль опромінення проводиться з метою отримання даних при поглиненні дози радіації для первинної діагностики. Для вимірювання дози опромінення застосовуються дозиметри. Контроль опромінення людей поділяється на дві групи — груповий та індивідуальний.

При груповому контролі один дозиметр видається на групу людей (бригаду, ланку, тощо) або проводиться розрахунковим методом за допомогою формули:

$$D = \frac{P_{сер.} \cdot T}{K_{посл.}}$$

де D — поглинута доза;

$P_{сер.}$ — середній рівень радіації (визначається за допомогою приладу);

$K_{осл.}$ — коефіцієнт послаблення захисної споруди.

При індивідуальному контролі дозиметр видається кожному працівнику. Цей метод застосовується для тих категорій, до яких не можна застосувати груповий метод.

Для обліку поглинених доз опромінення ведуться наступні документи дозиметричного контролю:

- відомість видачі вимірювачів дози та обліку показників;
- журнал контролю опромінення;
- карта обліку доз опромінення;
- журнал відбору і здачі проб (тільки у службах та штабах ЦО);
- донесення про працездатність і зараження людей, техніки і інше.

Контроль опромінення потрібен для того, щоб поглинені дози радіації не перевищували допустимих норм опромінення.

Допустимі дози опромінення:

а) на воєнний час:

- при одноразовому опроміненні (до 4 діб) — 50 Р;
- при багаторазовому опроміненні за 30 діб — 100 Р;
за 3 місяці — 200 Р;
за 1 рік — 300 Р.

б) на мирний час:

- у нормальних умовах на 1 рік — 0,5 бер.;
- для персоналу в нормальних умовах на 1 рік — 2 бер.;
- для населення аварійне опромінення на 1 рік — 10 бер.;
- для персоналу аварійне опромінення на 1 рік — 25 бер.

Згідно з цими нормами для населення поглинена доза в нормальних умовах не повинна перевищувати — 0,5 бер за рік.

Згідно з Законом України „Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання” № 15/98-ВР передбачені наступні перевищення допустимої дози опромінення:

- для населення: 1 мЗв/рік (1000/рік — 0,1 бер);
- для персоналу: не більше 20 мЗв/рік (2000/рік — 2 бер).

Допускається до 5 бер (50 мЗв) за умов, що середньорічна доза

протягом п'яти років не більше 20 мЗв за рік (2 бер) в середньому.

Структура дози опромінення поглинутої за рік виглядає таким чином:

- природний фон — 200 мбер;
- медична рентгенодіагностика — 150 мбер;
- будівельні матеріали — 100 мбер;
- додаткові джерела опромінення — 50 мбер.

Природний радіаційний фон обумовлюється космічним випромінюванням та природними радіоактивними речовинами.

Інтенсивність космічного випромінювання залежить від висоти над рівнем моря та сонячної активності. Земним джерелом є природні радіонукліди, які містяться в речовинах, які людина використовує у повсякденній діяльності.

Природний радіаційний фон для України становить 0,01...0,03 мр/рік.

На земній кулі є місцевості, у яких поглинені дози значно перевищують допустимі:

- Індія, штат Карала є місцевість де доза складає 40,2 рад за рік;
- Бразилія — 20 рад/рік;
- США — 26 рад/рік;
- Франція — 170 рад/рік.

Контроль радіоактивного забруднення здійснюється з метою визначення ступеня забруднення радіоактивними речовинами людей, тварин, а також техніки, одягу, засобів індивідуального захисту, продуктів, води, фуражу та інших об'єктів.

Ступінь радіоактивного забруднення оцінюється шляхом замірів потужності експозиційної дози випромінювання від цих об'єктів приладами (ДП-5, ІМД-21 та інші) та порівнянням їх з нормою.

На мирний час користуємося нормами, які визначені в „Основних санітарних правилах.

6.2.2 Режими радіаційного захисту та порядок впровадження їх в дію.

Під режимом радіаційного захисту розуміють порядок дії людей, використання способів та засобів захисту в зонах радіаційного зараження, який передбачає максимальне зменшення можливих доз опромінення.

Він передбачає послідовність та тривалість використання захисних споруд, захисних властивостей, промислових та житлових приміщень, обмеження перебування людей на відкритій місцевості.

Тривалість дотримування режиму захисту залежить від ряду факторів:

- рівня радіації;
- захисних властивостей захисних споруд;
- захисних властивостей промислових та житлових будівель.

На випадок ядерного вибуху відпрацьовано 8 типових режимів радіаційного захисту: [10]

- № 1-3 — для населення, яке не працює
- № 4-7 — для робітників та службовців об'єктів, які продовжують виробничу діяльність в умовах радіаційного зараження (працюють у закритих приміщеннях);
- № 8 — для особового складу формувань, які проводять аварійно-рятувальні роботи на зараженій місцевості.

Виконання режиму радіаційного захисту передбачає декілька етапів:

а) для населення:

- 1-й етап — укриття населення в захисних спорудах;
- 2-й етап — почергове укриття в захисних спорудах та будинках;
- 3-й етап — укриття в будинках з обмеженим перебуванням на вулиці;

б) для робітників та службовців:

- 1-й етап — укриття в захисних спорудах;
- 2-й етап — робота з використанням для відпочинку захисної споруди;
- 3-й етап — робота з відпочинком у житлових будинках з обмеженим перебуванням на відкритій місцевості.

Користуючись режимами, необхідно вважати, що робоче місце повинно бути розташовано в закритому приміщенні. Якщо люди працюють на відкритій місцевості, то запроваджується режим № 8, який передбачає позмінну роботу особового складу формувань в умовах радіаційного зараження.

Для захисту населення у випадку ускладнення радіаційної обстановки на АЕС передбачені тимчасові норми (режим захисту), які наведені в таблиці 6.1 .

У Законі України НР 15/98-ВР „Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання”, визначені заходи щодо укриття людей з тимчасової евакуації та йодної профілактики населення.

Заходи щодо укриття людей: якщо протягом перших десяти діб сукупна ефективна очікувана доза опромінення може перевищувати 5 мЗв (0,5 бер).

Тимчасова евакуація людей: якщо протягом тижня ефективна доза опромінення може досягти 50 мілізівертів (5 бер).

Йодна профілактика застосовується: якщо очікувана поглинута доза опромінення щитовидної залози від накопичення в ній радіоактивного йоду може перевищувати 50 мілігрей (5 рад) згідно з встановленими міністерством охорони здоров'я України нормами.

Рішення на введення режимів радіаційного захисту приймають:

- для населення — НЦО міста, району, сільської Ради, де проживає населення;
- для робітників та службовців — НЦО об'єкта.

Таблиця 6.1 - Тимчасові режими захисту населення у випадку ускладнення обстановки на АЕС.

№ режиму	Сила експозиційної дози, Мр/год.	Режимні заходи по захисту населення
1	0,1÷0,3	Укриття дітей, герметизація приміщень, укриття та упаковка продуктів харчування. Обмеження перебування на відкритому повітрі дорослих. Обладнання санітарних бар'єрів на входах в квартири
2	0,3÷1,5	Заходи першого режиму, йодна профілактика дітей, обмежене перебування на вулицях всього населення. Обладнання санітарних бар'єрів на сходах у будинки
3	1,51÷15	Заходи попередніх режимів, йодна профілактика всього населення, часткова евакуація (дітей та вагітних жінок)
4	15,1÷100	Заходи 1, 2, 3 режимів. Евакуація всього населення, крім контингенту, задіяного в аварійно рятувальних роботах
5	Більше 100	Повна евакуація населення

Якщо на території населеного пункту або об'єкта різні рівні радіації, то режим вибирається за найбільшим рівнем. При наявності на об'єкті ЗС з різними $K_{\text{осл}}$. Режим захисту визначається за найменшим $K_{\text{осл}}$, або окремо для кожної захисної споруди.

При рівні радіації, коли захист не може бути забезпечений введенням режиму, проводиться евакуація. Рішення про евакуацію приймає старший начальник.

Висновок:

Таким чином, завчасне розроблення та впровадження режимів радіаційного захисту робітників та службовців об'єктів, а також населення зменшить або повністю виключить ураження людей.

Висновки

В кваліфікаційній роботі розроблена електронна система керування тиристорними перетворювачами електроприводу насосної станції. В порівнянні з базовим варіантом удосконалились такі вузли:

- схема обмеження і захисту;
- схема управління імпульсами;
- автоматичний регулятор збудження.

Розроблена нова схема захисту від тривалого асинхронного ходу.

При проєктуванні системи керування в цілому значна увага приділялася простоті та зручності роботи пристрою. Значну увагу присвячено питанню охорони праці обслуговуючого персоналу.

Розроблена система керування забезпечує додаткові режими роботи електроприводу, що значно розширює його технологічні можливості.

Перелік посилань

1. ABB Technical Guide. Guide to Variable Speed Drives. – ABB, 2023. – 68 р. – Режим доступу: https://library.e.abb.com/public/a209d9dc29b24b789e0650b8de9c3f22/TechnicalGuideBook_EN_3AFE64514482_RevI.pdf
2. Ayaz M. et al. Power Electronics and Variable Frequency Drives. – 2017. – Режим доступу: https://www.academia.edu/34898398/Power_Electronics_and_Variable_Frequency_Drives
3. Kumar D., Ahmad S. Variable Frequency Drives: Topology and Its Testing Procedure. – ResearchGate, 2024. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/385047121_Variable_frequency_drives_topology_and_its_testing_procedure
4. VFD – Variable Frequency Drive: Technical Explainer and Industrial Guide. – Precision Electric, 2025. – Режим доступу: <https://www.precision-elec.com/wp-content/uploads/2025/07/VFD-Variable-Frequency-Drive-Technical-Explainer-and-Industrial-Guide.pdf>
5. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
6. Головка Д.Б., Рого К.Г., Скрипник Ю.О. Основи метрології та вимірювань. Навч. посібник. - К.: Либідь, 2001. - 408 с.
7. Донець О. В. Теорія електропривода / В. І. Колотіло, О. В. Донець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 148 с.
8. Загірняк М. В., Коренькова Т. В., Калінов А. П., Гладир А. І., Ковальчук В. Г. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода: навчальний посібник. - Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2023. - 206 с.

9. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікро схемотехніка: теорія і практикум: Навч. посіб./за ред. А.Г.Соскова. – К.: Каравела, 2004.- 432с.
10. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «Безпека в надзвичайних ситуаціях» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., –156 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196>.
11. Навчальний посібник «Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»» / автор-укладач В.С. Стручок – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424>
12. Основи наукових досліджень і теорія експерименту : Навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / укл. Ю. Б. Капаціла, П. О. Марущак, В. Б. Савків, О. П. Шовкун. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. 186 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/40843>
13. Коноваленко І. В. Платформа .NET та мова програмування C# 8.0 : навч. посіб. / І. В. Коноваленко, П. О. Марущак. – Тернопіль : В. А. Паляниця, 2020 – 320 с. <http://library.megu.edu.ua:8180/jspui/handle/123456789/4115>
14. Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Письціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>
15. Капаціла Ю.Б., Савків В.Б. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 60 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48495>
16. Капаціла Ю.Б., Шовкун О.П. Дослідження релейного електронного регулятора температури. /Методичні вказівки до лабораторної роботи з курсу «Приводи та автоматика мехатронних систем» для здобувачів

освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль: ТНТУ. 2025. 15 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/50560>.

17. Козбур І.Р., «Дослідження часових характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39206>

18. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1551>

19. Методичні вказівки по роботі з програмним симулятором "AVR simulator IDE" з курсу "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 21 с.

20. Моделювання нелінійних систем керування у пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2019. - 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28057>

21. Моделювання систем керування в пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. - 23 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28056>

22. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Multisim. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо . - Тернопіль : ТНТУ Імені Івана Пулюя, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26404>
23. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Proteus VSM. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26397>
24. Методичні вказівки до курсового проектування з курсу "Проектування систем автоматизації" / Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Пісьціо В.П. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 128 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48646>
25. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка”. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. – 53 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44635>
26. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль 3. «Імпульсна техніка, вторинні джерела живлення, основи цифрової електроніки» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. -26 с.
27. Трембач Р.Б., Шовкун О.П. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Інформаційно – вимірювальні системи” Модуль І. «Вимірювальна техніка» – Тернопіль: ТНТУ., 2024. – 67 с.
28. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп’ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.

29. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.
30. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.
31. Буров Є., Митник М. Комп'ютерні мережі. (у 2-х томах). Львів, Магнолія, 2018.
32. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем. Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А. Г. Микитишин, М. М. Митник, О. С. Голотенко, В. В. Карташов. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42625>
33. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський)/ укл.: О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.
34. Навчально-методичний посібник до практичних заняття з дисципліни «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» для студентів освітнього ступеня „бакалавр" усіх спеціальностей та форм навчання / Укладачі : О. Я. Гурик, І. Б. Окіпний, В. С. Сенчишин, С. Ю. Мариненко, О. І. Король. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. 123 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48496>
35. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>

36. Паламар М. І., Стрембіцький М. О., Паламар А. М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 150 с.
37. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>.
38. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка. – Львів: Бескид Біт, 2003. - 544 с.