

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

**КРБ.СІ-15.00.00.000 ПЗ**

**Група СІ-21-1**

**Юрій ПАСТЕРНАК**

**2025**

**Міністерство освіти і науки України**  
**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**  
**Інститут інформаційних технологій**  
**Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем**

**Пастернак Юрій Юрійович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК \_\_\_\_\_  
(індекс)

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

**Розроблення блоку управління станції катодного захисту трубопроводу на базі контролера UC3825**

(назва роботи)

**Системна інженерія – інтернет речей**

(назва освітньої програми)

**151-Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології**

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня \_\_\_\_\_ **Ю.Ю. Пастернак**  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ **Левицький Іван Теодорович, к.т.н.**  
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

**Допущено до захисту**  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **Заміховський Л.М.**  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківськ – 2025**

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 151-Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІТТС д.т.н., проф.**

Л.М.Заміховський

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Пастернак Юрію Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення блоку управління станції катодного захисту трубопроводу на базі контролера UC3825

керівник роботи Левицький Іван Теодорович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "05" травня 2025 року № 281/7

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи Матеріали та результати отримані під час проходження переддипломної практики, технічні вимоги, методичні вказівки.

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

Порівняльний аналіз існуючих систем катодного захисту

Вибір апаратних технологій та середовища розробки

Розробка апаратної частини

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_

Структурна схема

Функціональна схема

Результати розробки

6. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_



## РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 74 сторінок, 34 рисунків, 11 посилань.

Об'єктом дослідження є система управління електрохімзахисту трубопроводу.

Мета роботи – розробка автоматизованої системи управління перетворювачем катодного захисту в умовах електрохімзахисту металевого трубопроводу.

В першій частині роботи проведено аналіз корозійних процесів та електрохімзахисту.

В другій частині здійснено підбір елементів системи управління, виконання принципової електричної схеми, здійснено розроблення друкованої плати, аналіз контролера UC3825.

В третій частині здійснено розробку алгоритмів функціонування та аналіз отриманих результатів.

СТАНЦІЯ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ, МІКРОКОНТРОЛЕР, CODE VISION AVR, МІКРОКОНТРОЛЕР ATMEGA, АЛГОРИТМИ.

## **ABSTRACT**

Calculation and explanatory note: 74 pages, 34 figures, 11 references.

The object of the study is the control system for electrochemical protection of a pipeline.

The purpose of the work is to develop an automated control system for a cathodic protection converter in the conditions of electrochemical protection of a metal pipeline.

In the first part of the work, an analysis of corrosion processes and electrochemical protection was carried out.

In the second part, the selection of elements of the control system was carried out, the execution of a schematic electrical diagram was carried out, a printed circuit board was developed, and the UC3825 controller was analyzed.

In the third part, the development of operating algorithms and analysis of the results were carried out.

CATHODE PROTECTION STATION, MICROCONTROLLER, CODE VISION AVR, ATMEGA MICROCONTROLLER, ALGORITHMS.

## ЗМІСТ

с.

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ .....	7
ВСТУП .....	8
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ....	11
1.1 Аналіз типів корозійних процесів .....	11
1.2 Електрохімічна корозія .....	18
1.3 Теорія електрохімічного захисту .....	25
1.4 Огляд станції ЕХЗ .....	28
2 РОЗРОБЛЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ВУЗЛА КЕРУВАННЯ СКЗ .....	36
2.1 Аналіз і вибір режиму структури функціонування СКЗ .....	36
2.2 Формування вимог до розроблення СКЗ .....	41
2.3 Push-Pull перетворювач .....	47
2.4 Драйвер силового блоку UC3825 .....	55
2.5 Розробка електричної принципової схеми .....	58
2.6 Розробка друкованої плати .....	62
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ СИСТЕМИ СКЗ .....	64
3.1 Результати роботи системи СКЗ .....	64
ВИСНОВКИ .....	72
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА .....	73
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА .....	74

					<b>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Пастернак</i>				<i>Розроблення блоку управління станції катодного захисту трубопроводу на базі контролера UC3825</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перев.</i>	<i>Левицький</i>					6	74	
<i>Н. контр.</i>					<b>ІФНТУНГ ар.СІ-21-1</b>			
<i>Затв.</i>	<i>Заміховський</i>							

## ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ЕХЗ	– Електрохімзахист
МК	– Мікроконтролер
СКЗ	– Станція катодного захисту
ПК	– Персональний комп'ютер
ФС	– Функціональна схема
ЕРС	– Електрорушійна сила
ККД	– Коефіцієнт корисної дії
ТТР	– Трансформатор гальванічної розв'язки

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## ВСТУП

Газотранспортна система України є важливою стратегічною та економічною галуззю України. Проте внаслідок обмежених інвестицій її вік є доволі значним, що створює певні вимоги щодо умов експлуатації. Варто зазначити, що близько 40 відсотків усіх газопроводів України експлуатуються понад 15 років; 29% – 15-25 роки; 14% – 26-35 роки; 15% – 35-50 років; 0,1% – понад 50 років.

Основною причиною збільшення ризиків що зумовлені великим терміном експлуатації є корозійний вплив на трубопровід, що веде до зменшення експлуатаційного тиску, зменшення пропускної здатності трубопроводу. При цьому значно збільшуються аварійні ризики, що можуть спричинити розгерметизацію трубопроводу.

Електрохімічний захист від корозії – ефективний метод захисту від електрохімічної корозії готових виробів. У деяких випадках відновити захисний обгортковий матеріал або лакофарбове покриття неможливо. У таких ситуаціях доцільно та доречно застосовувати електрохімічний захист від корозії. Наприклад, відновлення покриття днища морського судна або підземного трубопроводу є дуже трудомістким і тривалим процесом, а іноді відновлення і зовсім неможливе. Електрохімічний захист від корозії ефективно та якісно захищає будь-який виріб від шкідливого впливу корозії, запобігаючи руйнуванню днищ морського та річкового транспорту, підземних трубопроводів та різноманітних резервуарів.

Також електрохімічний захист від корозії застосовується у випадках, коли відбувається інтенсивне руйнація металоконструкції. Тобто, коли потенціал корозії знаходиться в зоні швидкого розчинення основного металу.

Суть електрохімічного захисту від корозії ось у чому. Зовні готового металевого виробу є джерело електричного струму, що підключається до

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

виробу. Постійний струм на поверхні виробу, який необхідно забезпечити захистом від корозії, створює катодну поляризацію всіх електродів. На поверхні металу анодні ділянки внаслідок цього стають катодними. В результаті йде руйнування анода, а не металу конструкції за допомогою впливу корозійного середовища.

Електрохімічний захист від корозії – незамінна процедура у наш час у деяких сферах діяльності.

Об'єктом дослідження є система управління електрохімзахисту трубопроводу.

Мета роботи – розробка системи управління перетворювачем катодного захисту в умовах електрохімзахисту металевого трубопроводу.

Використання інноваційного апаратного забезпечення із використанням сучасної елементної бази відомих фірм і виробників, технологічного процесу електрохімзахисту дозволить підвищити ефективність роботи системи катодного захисту, що зменшить витрату енергоносіїв при одночасному зменшенні капітальних витрат.

Використання застарілих способів для управління катодними станціями електрохімічного захисту трубопроводу призводить як до малоефективного використання енергоресурсів, так і до погіршення самої якості електрохімзахисту. Окремо слід відмітити низький коефіцієнт корисної дії трансформаторних станцій катодного захисту. Внаслідок схемотехнічних особливостей, його величина не перевищує 70-80%, що при сучасному розвитку елементної бази, є недостатнім.

Немаловажним негативним моментом трансформаторних станцій катодного захисту є низький рівень автоматизації, що унеможлиблює достатній контроль як на самим процесом катодного захисту, так і над супутніми процесами.

Саме ці обставини зумовили мене запропонувати більш сучасну систему катодного захисту з використання сучасної елементної бази, застосування

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

сучасних методів управління, використання передових алгоритмів регулювання цільових параметрів, дистанційного моніторингу даних параметрів і інформування про аварійні параметри, які можуть мати місце. Це дасть можливість не тільки збільшити ефективність роботи катодної станції, але і зменшити габарити самої катодної захисту. У свою чергу зменшення габаритів дозволить зменшити вагову частку кольорових металів, що зменшує їх цінність для вандалів.

Запропонована мною система може широко застосовуватись в різних об'єктах електрохімзахисту, як така, що відповідає більшості вимогам а також володіє рядом переваг, що збільшує її конкурентоздатність.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						10
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

# 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ

## 1.1 Аналіз типів корозійних процесів

З корозією люди стикаються з того часу, як навчилися добувати та обробляти метал. З того часу існують різні способи боротьби з нею. Незважаючи на те, що проблема добре вивчена, дослідження протікання процесу корозії та методів боротьби з ним продовжуються і зараз. Тому розуміння теоретичних основ корозійного процесу важливе для правильного вибору способу боротьби з іржавінням та ефективного використання обраного засобу.



Рисунок 1.1 – Фото процесів корозії металічних конструкцій

Термін корозія походить від латинського слова "corrodere", що означає роз'їдати. Поняття застосовується як до самого процесу руйнування, і його результату. Система української стандартизації (ГОСТ 5272-68) визначає

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

корозію металів як руйнування металів внаслідок хімічної та електрохімічної взаємодії їх із корозійним середовищем. У системі міжнародної стандартизації ISO це поняття трактується трохи ширше: фізико-хімічна взаємодія між металом і середовищем, в результаті якого змінюються властивості металу, і часто відбувається погіршення функціональних характеристик металу, середовища або технічної системи, що включає [1].

Корозійний процес є мимовільним. Викликається термодинамічною нестійкістю більшості матеріалів, їх прагненням перейти до нового стану в умовах експлуатації.

Корозійні процеси можуть відбуватися у різноманітних умовах та середовищах. Корозію класифікують:

- за механізмом взаємодії металів із зовнішнім середовищем;
- за видом корозійного середовища та умовами протікання процесу;
- за видом (геометричним характером) корозійних руйнувань на поверхні або в обсязі металу.

Головною є класифікація за механізмом перебігу процесу. Розрізняють два основні види:

Хімічна корозія — це процес взаємодії металевої поверхні з агресивним середовищем без участі електрохімічних реакцій на межі поділу фаз. У цьому випадку, після руйнування металевого зв'язку, атоми металу утворюють хімічні сполуки з атомами або їх групами, які належать до складу окисників, що приймають валентні електрони металу. До цього типу корозії належать процеси, які відбуваються у неелектролітних рідинах, а також газова корозія (див. рис. 1.2).

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

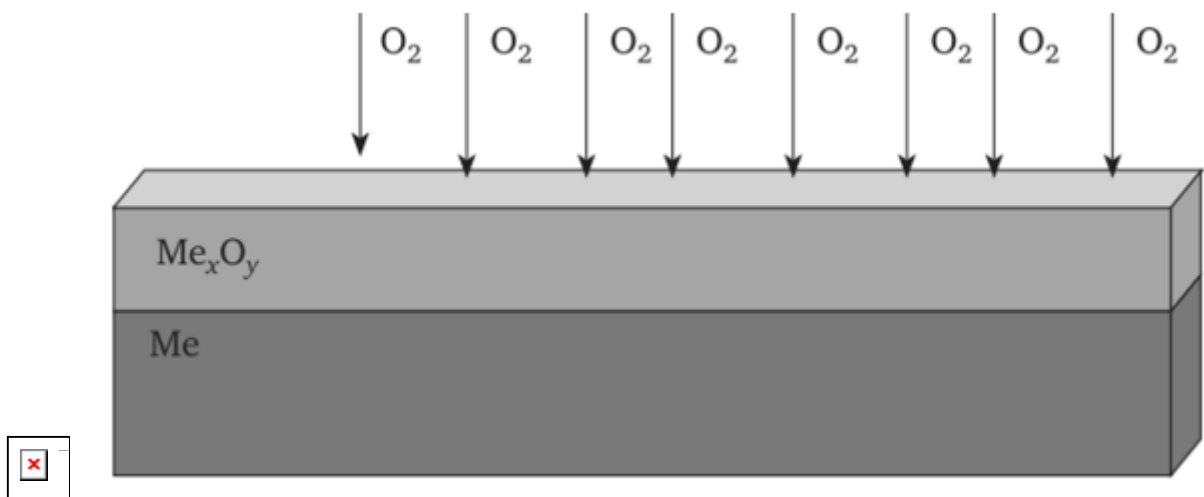


Рисунок 1.2 – Схема хімічної корозії

До неелектропровідних рідких середовищ насамперед відносять органічні рідини – бензол, тетрахлорид вуглецю, фенол, хлороформ, тетрахлорид вуглецю, нафту, гас, бензин та спирти.

Внаслідок хімічної корозії метал покривається плівкою оксиду. Плівки деяких металів, що вийшло, міцні і добре оберігають метал від подальшого руйнування. Йдеться про алюміній, хром, молібден і деякі інші. Плівки заліза та інших чорних металів легко руйнуються і не можуть перешкоджати корозії, яка здатна проникати в метал на велику глибину [2].

Зазвичай, хімічна корозія руйнує деталі механізмів, що працюють за високої температури - камери внутрішнього згорання палива, хімічні реактори, поршневі двигуни тощо. буд.

Електрохімічна корозія - це процес взаємодії металу з електролітом, при якому іонізація атомів металу та відновлення окисного компонента корозійного середовища протікають не в одному акті та їх швидкості залежать від електродного потенціалу, рос. 1.3.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

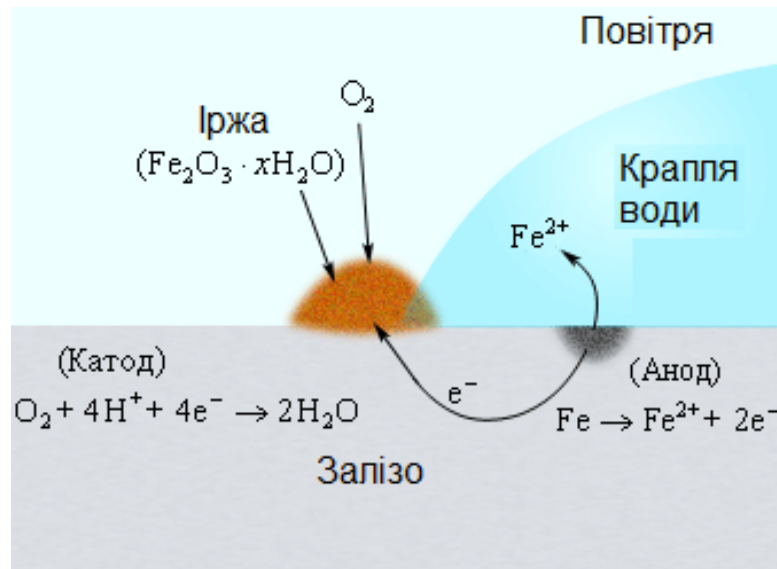


Рисунок 1.3 – Схема електрохімічної корозії

Так як поверхня будь-якого металу електрохімічно неоднорідна, містить домішки інших металів та неметалічних речовин, це призводить до того, що на ній у розчині електроліту утворюються гальванічні мікроелементи. Метал із більш негативним потенціалом починає руйнуватися – його іони переходять у розчин, а електрони переходять до менш активного металу, на якому відбувається відновлення розчиненого іонів водню або відновлення розчиненого у воді кисню.

При цьому досить невеликий шар електроліту, щоб виникла електрохімічна корозія. Навіть 65% відносної вологості вистачить, щоб на поверхні металу утворився електроліт, який може спричинити корозію. Тому електрохімічна корозія спостерігається у закритих приміщеннях [3].

Таким чином, електрохімічна корозія характеризується тим, що потік електронів спрямований від активнішого металу до менш активного, і більш активний метал кородує. Швидкість процесу корозії залежить від того, наскільки далеко розташовані один від одного метали, що утворюють гальванічну пару, серед стандартних електродних потенціалів, рис.1.4

Li Rb K Ba Sr Ca Na Mg Al Mn Zn Cr Fe Cd Co Ni Sn Pb (H) Sb Bi Cu Hg Ag Pt Au

Активність металів зменшується →

Рисунок 1.4 – Ряд активності металів

Крім того, швидкість корозії залежить від кислотності електроліту. Чим вона вища (тобто менше рН), тим більше вміст у ньому окислювачів, а отже тим швидше протікає процес іржавіння. Також корозія суттєво зростає із зростанням температури.

В окремих випадках спостерігається таке явище, як пасивація. Деякі метали у певних середовищах переходять у пасивний стан, у якому різко уповільнюється корозія. Так, залізо стає пасивним у концентрованій азотній кислоті. За таких умов на поверхні металу утворюється щільна оксидна захисна плівка, яка перешкоджає контакту металу з середовищем і істотно уповільнює процес корозії. У сухому повітрі плівка утворюється на поверхні алюмінію, міді, хрому, цинку, нікелю, берилію та інших металів. Пасивуванням також досягається корозійна стійкість нержавіючих сталей та сплавів.

Крім того, експерти виділяють ще два види корозії, які протікають паралельно з хімічною чи електрохімічною корозією:

Біохімічна корозія – викликається різними мікроорганізмами, які використовують метал як живильне середовище або виділяють продукти, які руйнівні діють на метал. Так, ряд ґрунтових бактерій виробляє речовини, що агресивно діють на метали: CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S та ін., рис.1.5.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 1.5 – Біохімічна корозія

Зазвичай цей вид корозії накладається на хімічну та електрохімічну. Найбільш сприятливі для біохімічної корозії ґрунти певного складу, застійні води та деякі органічні продукти.

Електрокорозія – посилення електрохімічної корозії під дією анодної поляризації, спричиненої зовнішнім електричним полем (наприклад, при виробництві зварювальних робіт на плаву, за наявності блукаючих струмів в акваторії).

За видом корозійного середовища та умовами перебігу процесу корозію можна розділити на:

- атмосферну. Найпоширеніший вид корозії. Метали руйнуються в атмосфері, як окислювач виступає кисень;
- газову. Метали руйнуються під впливом газів за високих температур;
- рідинну. Корозії металу в рідкому середовищі. Рідини можуть бути електролітами та неелектролітами;
- ґрунтову. Корозія металу в ґрунтах та ґрунтах;
- корозію блукаючими струмами. Це вид електрохімічного руйнування під впливом блукаючих струмів;

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- контактну корозію. Цей вид корозії виникає при контакті металів, що мають різні стаціонарні потенціали в електроліті;

- корозію під напругою. Руйнування металу при одночасному впливі агресивного середовища та механічних напруг;

- фреттінг-корозію. Це вид корозії, що виникає при коливальних переміщення двох поверхонь відносно один одного в умовах корозійного середовища;

- корозійну ерозію. Вид корозії, що відбувається при одночасному впливі на метал тертя та корозійного середовища.

За характером руйнування види корозії поділяються на:

- суцільну. Процес корозії зачіпає всю поверхню металу, що перебуває під впливом корозійного середовища. Можна поділити на рівномірну, нерівномірну та вибірккову;

- місцеву. Корозія зачіпає лише деякі ділянки поверхні металу. Місцевий вид корозії буває: плямами, піттинговою, виразковою, наскрізною, ниткоподібною, міжкристалітною, підповерхневою, ножовою, корозійним розтріскуванням та корозійною крихкістю;

Корозія поширена в енергетичній, транспортній, хімічній, харчовій, нафтовій та механічній галузях промисловості. Вона щороку призводить до мільярдних збитків. За різними даними, втрати металу, що включають масу металевих конструкцій, виробів, обладнання, що вийшли з ладу, складають від 10 до 20% річного виробництва сталі. Корозія також може призвести до трагедій з людськими жертвами – наприклад, конструкційні деталі моста, що проржавіли, можуть призвести до його обвалення [4].

Завдяки постійному вивченню процесу корозії було винайдено способи боротьби з ним. Серед основних способів боротьби з корозією:

- захисні покриття. Металеві поверхні покривають іншим металом чи спеціальними лаками, фарбами, емалями;

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- легування. Введення до складу металу добавок, що утворюють захисний шар поверхні;

- протекторний захист. Металевий виріб з'єднують із більш активним металом. Таким чином, при електрохімічній корозії активніший метал руйнується в першу чергу.

- електрохімічний захист. Заснована на накладенні негативного потенціалу на деталь, що захищається.

- інгібітори корозії. Зміна складу середовища шляхом додавання до корозійного середовища спеціальних засобів, що уповільнюють корозію.

Цілком уникнути корозії металу неможливо, проте процес можна суттєво уповільнити. Економічний ефект від застосування антикорозійних засобів відчуватиметься десятиліттями. Тому розробка та покращення існуючих способів захисту від корозії найважливіша частина сучасної науки та промисловості.

## 1.2 Електрохімічна корозія

Електрохімічна корозія відноситься до процесів поступового руйнування металу, що найбільш часто зустрічаються. Як ми знаємо, наше оточення наповнене електрикою. Залежно від середовища змінюються показники провідності. Не відрізняється те, що при контакті з таким середовищем сталь починає поступово псуватися. Процес має кілька важливих відмінностей. Насамперед – неодночасне перебіг відновлення окислювального процесу та іонізації атомів металу. На інтенсивність поширення цьому впливає такий параметр, як електродний потенціал металу. Головна причина електрохімічної корозії у цьому, більшість металів виявляють термодинамічну нестійкість. Приклади поширення корозії такого типу зустрічаються у воді, ґрунті, на відкритому повітрі. Вона часто стає причиною втрати міцності та поступового

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

руйнування металу на днищі суден, трубопроводів, опор ЛЕП та інших об'єктів. Якщо говорити про типи електрохімічної корозії, то називають три різновиди:

- щілинні ураження;
- піттинги;
- міжкристалічне ушкодження.

Пошкоджуватися можуть різні типи металів залежно від їхнього розташування. Іржа з'являється при контакті зі стоячою та поточною водою, у місцях з'єднання різних металів, а також на зварних швах [5].

Які механізми відповідають за протікання електрохімічної корозії? Таке пошкодження металу проводиться двома механізмами: гомогенним та гетерогенним. Розглянемо кожен із них докладно.

**Гомогенні.** Спочатку торкається поверхневий шар металевого виробу. Поступово метал починає розчинятися під впливом актів – катодного чи анодного. Протягом певного часу відбувається міграція катода та анода. Згодом процес пришвидшується. Особливість гомогенного механізму в тому, що торкається як твердих, так і рідких металів. Змінюється лише швидкість течії.

**Гетерогенний.** Більшість твердих металів немає гомогенної поверхні. Це з тим, що у самому матеріалі склад кристалічних ґрат може відрізнитися. Також як і в описаному вище випадку формується анодний і катодний процеси, метал починає поступово руйнуватися. Такий вид процесу має кілька особливостей. Насамперед – чіткий поділ на катодний та анодний процес. Один з основних факторів, що впливають на їхню швидкість протікання щодо один одного – це час, рис.1.6.

Залежно від типу металу корозія може бути локалізована на окремих ділянках. Також спостерігається розчинення поверхневого шару на анодах, що дозволяє ураженню торкнутися великих площ. Тут з'являється ще одна особливість процесу - формування гальванічних елементів. Це відбувається через специфіку структури поверхні, на якій присутні мікроелектроди.

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



На інтенсивність поширення корозійного процесу впливають дві групи чинників – зовнішні та внутрішні.

**Поточний стан поверхні металу.** Коли поверхня металу нерівна, корозійний процес протікає набагато інтенсивніше. Якщо на поверхні є невеликі виступи, вони починають накопичувати воду. Це може негативно вплинути на інтенсивність розповсюдження. Щоб не допустити такого фактора, важливо використовувати відшліфований чи відполірований метал. Коли сталь гладка, вода не так сильно ушкоджує її, тому що поступово відбувається формування рівномірної плівки по всій поверхні. Також хорошим засобом зменшення ураження стає застосування пасивування, і навіть ряд інших способів.

**Ступінь термодинамічної стійкості металу.** Різні види матеріалів відрізняються різними показниками термодинамічної стійкості. Найбільш стійкі різновиди матеріалу не руйнуються при розміщенні в агресивне середовище.

Саме такий фактор дуже впливає на потенційний вплив середовища на поступовий розвиток корозії. На жаль, у більшості представлених у продажу марок металів стійкість невисока. Є й нестійкі різновиди, які цей ризик нівелюється завдяки схильності до утворення пасивних плівок лежить на поверхні [6].

**Кристалографічна структура** має прямий вплив на метал. Як відомо, атоми в кристалічній решітці розташовуються по-різному. Краще захищені ті різновиди, які атоми упаковані щільно. Особливості ґрат також враховують при плануванні захисту матеріалу методом створення на ньому спеціальних плівок. І плівка і сам основний матеріал повинні чітко відповідати за складом один одному або максимально наближеними. У цьому випадку виключається поява напруги, яка негативно відбивається на стані заготівлі. Якщо контакт із агресивним середовищем таки відбувається, матеріал починає руйнуватися шар за шаром.

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

**Гетерогенність.** Цей фактор розглядається у безпосередньому зв'язку з величиною зерна металу. Якщо сплави є виражені анодні включення, вони сильно впливають прискорення протікання корозії. Катодні включення не такі небезпечні, тому що на інтенсивності процесу не відбиваються. Величина зерна як фактор ризику розглядається не так часто і цим показником можна знехтувати.

Не варто скидати з рахунків і механічні фактори/ Важливо розуміти, що багато конструкцій з металу використовуються під постійною напругою. До цієї категорії відноситься підвищена внутрішня напруга, коли сильно збільшується ризик деформації.

Такий фактор значно впливає на інтенсивність поширення пошкодження. Навіть якщо сама сировина спочатку мала стійкість до потенційних пошкоджень, в такому випадку вона зменшиться - плівки, що формуються, просто не закріплюватимуться на поверхні. Тому краще відразу виключити цю умову електрохімічної корозії - постаратися не використовувати металоконструкції під сильними піковими навантаженнями, не допускати виникнення тертя і дотику між собою сталевих деталей.

Основні зовнішні фактори електрохімічної корозії. Окрім внутрішніх, на метал також впливають і зовнішні фактори. Вони можуть не тільки прискорювати, а й уповільнювати процес, а також впливати на його протікання. До них належать такі:

**Температура.** Температура сильно впливає на те, як поводить ся метал у різних умовах. Від неї залежить те, наскільки швидко будуть розчинятися вторинні продукти корозії. Серед інших особливостей – запуск та стимуляція дифузійних процесів у металі, створення перенапруги на електродах та інші прояви. Коли металевий виріб міститься в розчинах з кисневою деполаризацією, у міру прогрівання електроліту дифузія окислювача прискорюється. З огляду на цього спостерігається сильне зниження

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

перенапруги іонізації кисню. Якщо деталь міститься в розчинах кислот, що не окислюються, спостерігається корозія з водневою деполяризацією.

Окремо варто наголосити на ситуації, коли метал вже покривається спеціальною захисною плівкою. У цьому випадку сам тип плівки впливатиме на те, як саме вона поведеться при контакті з різними видами зовнішніх загроз, у тому числі з підвищенням температури. Нагрів та охолодження можуть відбитися на стані катодів та анодів через їх внутрішні процеси. У деяких випадках полярність електродів значно змінюється. Як ми вже зазначали вище, проблеми могу виникати через те, що різні ділянки деталі нагріті до температур, що відрізняються одна від одної. І тут стрімко збільшується кількість термогальванічних пар, стимулюючих поширення корозії нові ділянки.

**Рівень рН розчину, в який поміщений метал.** Такий показник, як рН, вказує, наскільки в розчині будуть активними іони водню, і як швидко корозія поширюватиметься по матеріалу. Це небезпечно, тому що може непередбачено змінювати потенціал катодних процесів, формування окисних плівок. Також створюється значне перенапруга реакції на електродах. Рекомендується не допускати контакту металу з середовищами, які мають рН високий. Якщо з якихось причин металева заготовка виявилася поміщена в розчин, велике значення матиме швидкість, з якою він рухається, а також наявність внутрішніх коливань. Заздалегідь визначити точну дію буде складно з тієї причини, що завжди непросто передбачити, як поведуться нейтральні електроліти. Вважається, що при змішуванні електроліту змінюються показники дифузії кисню, що значно відбивається на процесі протікання корозії. Можна приділяти менше уваги швидкості руху електроліту в тому випадку, якщо ви маєте справу із середовищами підвищеної кислотності. На них подібна поразка має мінімум впливу.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Якщо уважно простежити за тим, як працює гальванічний елемент, то очевидно, що в ньому протікають одразу два пов'язані один з одним процеси – анодний та катодний. Розглянемо їх докладніше.

**Анодний процес.** У хімії є формулою  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e$ . Вона показує, що поступово запускається окиснення, іони металу починають перехід у розчин.

**Катодний процес** може протікати по-різному. Зокрема, надлишок електронів вирішується асиміляцією атомами електроліту та його молекул. На тлі цього відбувається відновна реакція безпосередньо на самому катоді. Формула залежатиме від того, в яких умовах відбувається реакція. Так, за наявності водневої деполаризації можна записати процес як  $2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}_2$ . Важливо розуміти, що обидва процеси сильно пов'язані один з одним під впливом кінетичного фактора. З часом може відбуватися взаємне уповільнення чи прискорення анодного чи катодного процесу. При цьому сам анод завжди залишатиметься тим місцем, де формується корозія металу. Під час аналізу перебігу процесу корозії часто звертають увагу на електропровідні фази та момент після їхнього дотику. Зазвичай одна фаза має позитивний заряд, тоді як інша – негативний. Це призводить до появи різниці потенціалів. Таким чином виникає ЕРС або як його часто називають вчені – подвійний електричний шар з асиметричним розташуванням частинок у місцях, де фази поділяються.

Небезпечним для металу стає стрибок потенціалів. Він може стимулюватись двома центральними причинами:

**Велика накопичена енергія гідратації.** У такому разі спостерігається відрив іонів металу та поступове перетікання їх у розчин. На поверхні в результаті залишається аналогічна кількість електронів, заряд стає негативним. Далі, відповідно до законів фізики, спостерігається перетікання катіонів з розчину, формується ДЕС на кордоні, як ми вже описували вище.

**Розрядження катіонів електроліту.** В результаті метал починає швидко приймати позитивний заряд. ДЕС утворюється через активність аніонів розчину в контакті з катіонами електроліту. Що відбувається у тому випадку,

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

якщо поверхневий шар металу зовсім не має певного заряду? У такому разі ЕРС не спостерігатиметься, виникне явище нульового заряду. Його потенціал відрізнятиметься залежно від того, з яким металом вам доводиться працювати. Описаний процес значно відбивається у тому, як протікає корозія і як швидко вона захоплює дедалі нові ділянки металу.

Якщо розглядати питання, пов'язані з процесом поляризації, можна написати окрему статтю з цієї теми. Тому ми розглянемо інший важливий показник – поляризацію. Поляризація та її вплив на швидкість протікання корозії. Процес поляризації пов'язаний з інтенсивністю поширення електрохімічної корозії. Цей показник відбиває, наскільки сильне перенапруга спостерігається певному ділянці. Прийнято виділяти три види поляризації:

**Електрохімічна.** Найчастіше спостерігається у ситуації, коли катодний та анодний процеси починають сповільнюватися.

**Фазова.** Виникає у разі, якщо поверхні матеріалу формується нова фаза.

**Концентраційна.** Цей процес виникає у тому випадку, якщо є дуже малі показники швидкості відведення продуктів корозії, а також підходу деполяризатора.

Особливості поляризації також варто враховувати у тому випадку, якщо ви зацікавлені у додатковому захисті металів від поступового руйнування.

### 1.3 Теорія електрохімічного захисту

Електрохімічним називається захист металу від корозії, який здійснюється, залежно від умов, катодною або анодною поляризацією.

Катодний захист заснований на тому, що при зменшенні потенціалу металу можна анодний струм знизити до нуля, або до величини, при якій швидкість корозії стає безпечною для роботи споруди, що захищається.

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

При анодному захисті потенціал металу збільшують, зміщуючи його в область пасивності, тим самим зменшуючи анодний струм (тобто швидкість корозії) до мінімальної величини.

Катодна поляризація підземних металевих споруд здійснюється за допомогою дренажної (поляризовані та посилені дренажі), катодного та протекторного захисту.

Катодний захист - спосіб захисту споруд примусовою катодною поляризацією за допомогою зовнішнього джерела постійного струму. Негативний полюс зовнішнього джерела струму підключають до споруди, що захищається, яка виконує роль катода. Для утворення замкнутого по струму ланцюга позитивний полюс джерела з'єднується з допоміжним електродом - анодом, який знаходиться в тому ж середовищі (грунт, вода), що і об'єкт, що захищається, рис.1.7.

Анод електричного кола – спеціальне анодне заземлення. Потенціал анода більш позитивний, ніж потенціал об'єкта, що захищається. Отже, відбувається його анодне розчинення. Для збільшення терміну служби анодів їх зазвичай виготовляють з матеріалів, що по можливості менше піддаються анодному розчиненню, стійкими до інших хімічних та фізичних впливів, що допускають високе струмове навантаження і мають досить низький опір.



Рисунок 1.7 – Катодний захист

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ

Арк.

26

Таким чином, катодний захист полягає в тому, що об'єкт, що захищається негативно поляризується і його потенціал зсувається до величини, при якій значно або повністю пригнічується процес корозії металу.

Поряд із добре ізольованими ділянками трубопроводів зустрічаються ділянки, що мають як окремі дефекти ізоляційних покриттів, так і розподілені точкові ушкодження. Трубопроводи з такими розподіленими пошкодженнями, без катодного захисту, поляризуються при контакті з електролітом ґрунту до величини природного потенціалу ( $U_{пр}$ ).

При включенні станцій катодного захисту (СКЗ) під впливом захисного струму, що протікає через наявні ушкодження ізоляційного покриття, починаються поляризаційні процеси, що змінюють будову подвійного електричного шару межі метал - електроліт ґрунту.

Струм, що йде в ланцюзі (позитивний полюс СКЗ – анод – корозійне середовище – трубопровід – негативний полюс СКЗ), називається захисним струмом (див. рис.1.8).

Від джерела струму електрони подаються на споруду, що захищається, де електрони надходять на мікроанод корозійного елемента і пригнічують його роботу, і на мікрокатод, де йде процес відновлення іонів водню.

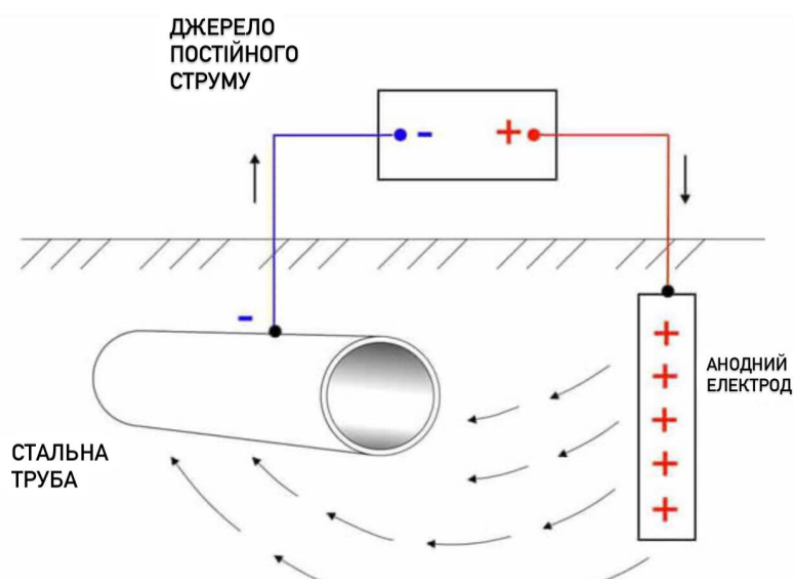


Рисунок 1.8 – Функціональна схема катодного захисту трубопроводу

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ

Арк.

27

Основним параметром, що визначає якість катодного захисту, є захисний потенціал - електродний потенціал металоконструкції, при якому корозійні реакції не йдуть взагалі, або йдуть з такою швидкістю, що їх можна знехтувати.

На реальному ізолюваному трубопроводі є маса різних за розмірами та формою наскрізних дефектів в ізоляційному покритті. При катодній поляризації трубопроводу поверхня металу в них у загальному випадку має різні потенціали.

Катодний захист регламентується шляхом підтримки необхідного захисного потенціалу, що вимірюється між трубопроводом та мідносульфатним електродом порівняння [7].

Електрохімічний захист повинен забезпечувати протягом усього терміну експлуатації безперервну за часом катодну поляризацію трубопроводу на всьому його протязі (і на всій його поверхні) таким чином, щоб значення потенціалів на трубопроводі були (за абсолютною величиною) не меншими від мінімального і не більшими за максимальні значення.

Значення мінімального та максимального захисних потенціалів залежно від умов прокладання та експлуатації трубопроводу наведено у таблицях 1 та 2.

На всіх новозбудованих та реконструйованих трубопроводах мають бути забезпечені лише поляризаційні потенціали (потенціали без омичної складової). До проведення комплексного обстеження з подальшою реконструкцією допускається контроль захисту за потенціалом омичної складової.

#### 1.4 Огляд станції ЕХЗ

Промисловістю виготовляються відносно невелика кількість різновидів СКЗ що зумовлено закритістю самого ринку ЕХЗ а також індивідуальними вимогами операторів трубопровідного транспорту, тому вони відрізняються за принципом регулювання і будови.

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Станція катодного захисту УКЗТ НПП «Дон».

В одному конструктивному та схемотехнічному виконанні випускаються пристрої двох типів:

1. Пристрій катодного захисту УКЗТ. Призначений для катодного захисту металевих споруд від електрохімічної корозії.
2. Пристрій дренажного захисту УЕДЗ. Призначено для захисту металевих споруд від електрохімічної корозії, що викликається блукаючими струмами.

Станціям цього типу властиві всі переваги і недоліки трансформаторних станцій. Перевагою, перш за все, є простота схеми та конструкції. Як наслідок вони легко ремонтуються, не вимагають для цього глибокого знання електроніки. Недоліки – типові для трансформаторних станцій: низький ККД, велика вага та габарити, високий рівень пульсацій, низький коефіцієнт потужності. Також недоліком є відсутність стабілізації вихідного струму.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики станцій УКЗТ та УЕДЗ

Параметр	УКЗТ - 1 ОПЕ					УЕДЗ – 1 ОПЕ
	0,24	0,6	1,2	3,0	5,0	1,8
Вихідний струм, А - Режим 1 - Режим 2	12 ± 0,6 24 ± 1,2	25 ± 1,2 12 ± 0,6	25 ± 1,2 50 ± 2,5	63 ± 3,2 32 ± 1,6	100 ± 5,0 50 ± 2,5	250 ± 2,5 125 ± 6,25
Вихідна напруга,	24 ± 1,2 12 ± 0,6	24 ± 1,2 48 ± 2,4	48 ± 2,4 24 ± 1,2	48 ± 2,4 96 ± 4,8	48 ± 2,4 96 ± 4,8	6 ± 0,3 12 ± 0,6
Вихідна потужність, кВт	0,24 ± 0,02	0,6 ± 0,06	1,2 ± 0,1	3,0 ± 0,3	5,0 ± 0,5	1,8 ± 0,2
Живлення : - Напруга, В - Частота, Гц	однофазна мережа змінного струму 220 ± 22 50 ± 1,25					
ККД у номінальному режимі, %, не менше	70					
Діапазон вимірювання випрямленої напруги, %	5 ... 100					

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		29

Конструктивно станція типу УКЗТ складається з металевого корпусу, всередині якого на панелі, що відкидається, розміщені силовий трансформатор, діодний міст, тиристори, плата управління, панель з приладами (рис.1.9).



Рисунок 1.9 – Конструкція трансформаторної станції

Охолодження пристрою – природна вентиляція. Холодне повітря надходить через жалюзі в основі корпусу і виходить через жалюзі бічних стінок.

Станція катодного захисту «АГІДЕЛЬ-3000»

Станція катодного захисту «АГІДЕЛЬ-3000» призначена для ефективного та безперебійного електрохімічного захисту сталевих трубопроводів та підземних сталевих споруд. СКЗ створена за схемою імпульсного перетворювача і відноситься до станцій інверторного типу, що забезпечує високий коефіцієнт корисної дії, низьке значення пульсації корисного виходу напруги (струму), малі габарити та вагу. Станція має міцний корпус та обладнана антивандальною конструкцією замків.

СКЗ виготовлена у кліматичному виконанні У категорії 1 для роботи в атмосфері типу II за ГОСТ 15150-69 та призначена для встановлення на відкритому повітрі.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 1.2 - Технічні характеристики

Параметри	Значення
Максимальний вихідний струм ( $I_m$ ), А	63
Максимальна вихідна напруга, ( $U_m$ ), В	48
Номінальна вихідна потужність, Вт	3000
Напруга мережі живлення, В	230±20
Частота мережі живлення, Гц	50±0,4
Число фаз	1
Максимальний опір ланцюга навантаження, ( $R_n$ ), Ом	0,76
Повна споживана потужність, кВА, не більше	4,2
Коефіцієнт корисної дії в номінальному режимі, %, не менше	88
Коефіцієнт потужності в номінальному режимі, не менше	0,95
Пульсації напруги (струму) на виході в номінальному режимі, %, не менше	3
Габаритні розміри, мм, не більше	640x466x430
Маса, кг, не більше	50

На рисунку 1.10 зображено зовнішній вигляд СКЗ.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31



Рисунок 1.10 - Станція катодного захисту «АГІДЕЛЬ-3000»

Переваги:

1. Оснащена телемеханічною системою контролю управління, яка є програмно-технічним комплексом, призначеним для:

- моніторингу поточного стану контрольованих параметрів СКЗ;
- оповіщення операторів про події, що потребують втручання;
- керування режимами роботи СКЗ;
- зберігання та аналізу інформації про стан СКЗ;
- формування звітів та графіків зміни контрольованих параметрів СКЗ.

Наявність вбудованого контролера телеуправління (КТУ) із GSM-модемом, що забезпечує передачу вимірних значень на виділений Інтернет-сервер та керування роботою станції у всіх режимах.

2. Зменшена вага та габарити за рахунок застосування перспективних схем перетворення частоти, керованих мікропроцесорними контролерами.

3. Наявність цифрового порту стандарту RS-232 для підключення комп'ютера, що забезпечує програмне управління мікропроцесорними контролерами.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

4. Можливість роботи в 4-х режимах:

- у режимі стабілізації напруги;
- у режимі стабілізації струму навантаження;
- у режимі стабілізації різницевого потенціалу;
- у режимі стабілізації поляризаційного потенціалу.

5. Наявність цифрової індикації:

- всіх вихідних параметрів;
- кодів помилок та відключення.

6. Наявність електронної захисту:

- від навантажень;
- від внутрішніх коротких замикань;
- від перенапруги на сторонах живлення та навантаження.

7. При зниженні напруги мережі живлення відбувається відключення мережі СКЗ і автоматичне включення при відновленні напруги мережі.

8. Станція обладнана примусовою системою охолодження.

9. Станція автоматично відстежує та за допомогою кольорового індикатора інформує про виникнення наступних аварійних ситуацій:

- перевищення температури на силових елементах;
- обрив ланцюга навантаження;
- коротке замикання в ланцюзі навантаження;
- обрив ланцюга виміру захисного потенціалу;
- внутрішні помилки у роботі станцій.

10. Станція не цікавить «любителів» кольорового металу, має міцний корпус і обладнана антивандальною конструкцією замків.

Станція катодного захисту ПН-600-50

Перетворювач напруги призначений для перетворення напруги змінного струму 220 В 50 Гц в напругу постійного струму (постійний струм) заданого значення (значення напруги постійного струму на виході перетворювача

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

задається в діапазоні від 2,5 В до 50 В, значення постійного струму задається в діапазоні від 0,1 А до 12 А).

Перетворювач напруги в складі системи електрохімічного захисту призначений для електрохімічного (катодного) захисту від корозії металевих споруд (газопроводів, нафтопроводів, продуктопроводів, об'єктів комунального господарства і т.д.) в якості джерела захисного струму. Захист металевих споруд від корозії відбувається шляхом поляризації їх постійним струмом негативної полярності (рис.1.11).



Рисунок 1.11 - Станція катодного захисту ПН-600-50

Перетворювач призначений для стаціонарного розміщення на місці експлуатації в оболонці комплектних пристроїв категорій розміщення 1, 1.1, 2, конструкція котрих виключає можливість конденсації вологи на вбудованих елементах. Режим роботи: тривалий, безперервний.

Структура умовного позначення перетворювача напруги ПН-600-50:

1. ПН — перетворювач напруги;
2. 600 — номінальна вихідна потужність, 600 Вт;
3. 50 — максимальна (номінальна) вихідна напруга, 50 В.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ

Арк.

34

Таблиця 1.3 - Технічні характеристики

Параметри	Значення
Робочий діапазон напруги мережі живлення, В	180 – 260
Максимальна вихідна потужність, Вт, не менше	600
Максимальне значення напруги на виході перетворювача, В	50
Максимальне значення обмеження струму на виході перетворювача, А	12
Коефіцієнт корисної дії в номінальному режимі роботи*, %, не менше	90
Діапазон встановлення значення напруги на виході перетворювача, В, не гірше	2,5 – 50
Дискретність встановлення значення обмеження струму на виході перетворювача, А	0,1
Похибка встановлення значення напруги на виході перетворювача, %, не більше	$2 \pm 0,1$ В
Похибка вимірювання значення напруги на виході перетворювача, %, не більше	$1,5 \pm 0,1$ В
Діапазон встановлення значення обмеження струму на виході перетворювача, А, не гірше	0,1 – 12
Похибка встановлення значення обмеження струму на виході перетворювача, %, не більше	$2 \pm 0,1$ А
Маса перетворювача, кг, більше	4,5

### 3 РОЗРОБЛЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ВУЗЛА КЕРУВАННЯ СКЗ

#### 2.1 Аналіз і вибір режиму структури функціонування СКЗ

Станції катодного захисту (СКЗ) діляться за принципом дії: трансформаторні та інверторні.

Інверторні станції послідовно і поступово витісняють трансформаторні через свої високі технічні характеристики і значно ширшими функціональними можливостями. Тим не менш, трансформаторні пристрої досі випускають та встановлюють навіть на нових об'єктах електрохімічного захисту.

Трансформаторні станції складаються з низькочастотного (50 Гц) трансформатора та тиристорного випрямляча, рис.2.1.



Рисунок 2.1 – Трансформаторно-тиристорна СКЗ

Пристрій управління тиристорами може бути найпростішим фазоімпульсним регулятором потужності, а може використовуватися контролер з функціями стабілізації вихідного струму, напруги, захисного потенціалу.

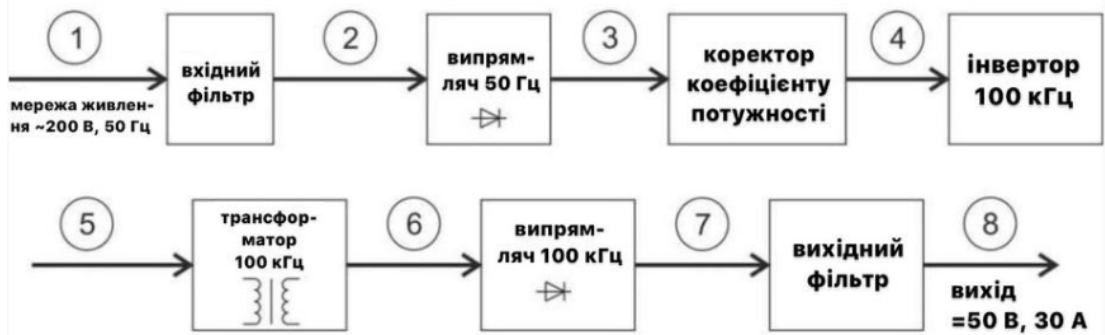
Одним з основних недоліків трансформаторних пристроїв катодного захисту є несинусоїдальна форма струму, як на виході, так і струму споживання від мережі живлення. Це призводить до великого рівня пульсацій на виході та низького коефіцієнта потужності. Для покращення цих параметрів у схему пристрою додають низькочастотний дросель. Це рішення неефективне, так як розміри та вага дроселя приблизно такі ж, як і у силового трансформатора, що значно збільшує вартість і привабливість у шукачів кольорового металу. При цьому коефіцієнти пульсацій і потужності у станцій з дроселем, що згладжує, все одно, значно гірше, ніж у інверторних.

Інверторні станції катодного захисту будуються з урахуванням високочастотних імпульсних перетворювачів.

Головний вигравш у технічних характеристиках інверторних станцій відбувається через те, що розміри силового трансформатора практично обернено пропорційно залежать від частоти перетворення. Збільшивши частоту, можна зменшити розміри трансформатора, а значить зменшити вагу пристрою, довжину проводів обмоток, теплові втрати тощо. Крім того висока частота сигналу дозволяє (знову ж таки пропорційно) зменшити індуктивності та ємності фільтрів, що згладжують, зменшити рівень пульсацій на виході пристрою. Хоча збільшення частоти призводить до ускладнення принципової електричної схеми і відповідно до погіршення її надійності і ремонтпридатності.

Ось типова структурна схема та діаграма роботи інверторної станції катодного захисту (рис. 2.2). Вхідна напруга мережі живлення випрямляється, згладжується, в результаті чого виходить постійна напруга 300 - 400 В. Далі вона перетворюється інвертором в змінну напругу високої частоти прямокутної форми і надходить на силовий трансформатор. Трансформатор здійснює гальванічну розв'язку вихідних та вхідних кіл та знижує напругу до потрібного рівня.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



**1. Мережа живлення ~200 В, 50 Гц**

**U діюча = 220 В**



**2. Мережа живлення на виході фільтра радіоперешкод**

**U діюча = 220 В**



**3. Вихід випрямляча мережі живлення**

**U середня = 220 В**



**4. Вихід коректора коефіцієнту потужності**

**U постійна = 380 В**

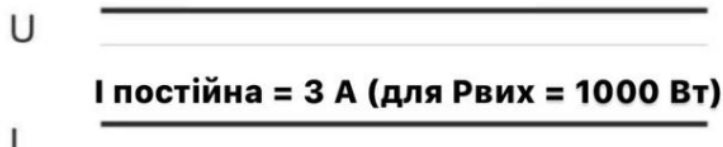


Рисунок 2.2 – Функціональна схема інверторної СКЗ

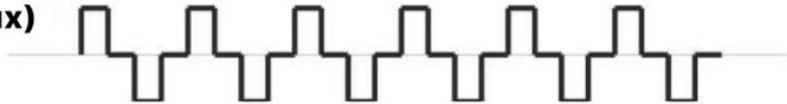
Далі йдуть високочастотний випрямляч та фільтр. В результаті на виході пристрою виробляється постійний струм (рис.2.3).

### 5. Вихід інвертора

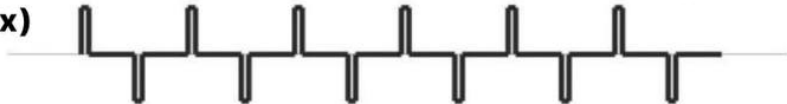
**U** амплітудна = 380 В, частота = 100 кГц  
**U вих (100% P вих)**



**U** амплітудна = 380 В, частота = 100 кГц  
**U вих (50% P вих)**



**U** амплітудна = 380 В, частота = 100 кГц  
**U вих (10% P вих)**



### 6. Вихід трансформатора

**U** амплітудна = 65 В, частота = 100 кГц  
**U вих (100% P вих)**



### 7. Вихід випрямляча 100 кГц

**U** амплітудна = 65 В, частота = 100 кГц  
**U вих (100% P вих)**



**U** амплітудна = 65 В, частота = 100 кГц  
**U вих (50% P вих)**



**U** амплітудна = 65 В, частота = 100 кГц  
**U вих (10% P вих)**



### 8. Вихід станції

**U** постійна = 50 В

**U вих** \_\_\_\_\_

**I** постійна = 20 А (для P вих = 1000 Вт)

**I вих** \_\_\_\_\_

Рисунок 2.3 – Діаграма роботи інверторної станції катодного захисту

Частота перетворення у сучасних інверторних станціях катодного захисту 20 - 50 кГц, але в деяких технологіях досягає 100 кГц. При тій же потужності розміри високочастотних трансформаторів набагато менше низькочастотних.

На рисунку 2.4 зображено фото високочастотного силового трансформатора потужністю 1500 Вт.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд імпульсного трансформатора

Він працює частоті 100 кГц, тобто. частота перетворення у 2000 разів вища, ніж у класичного трансформатора 50 Гц. Тому розміри трансформатора 50 x 50 мм, а вторинна обмотка - всього 4 витки (при вихідній напрузі 60 В). Це провід довжиною приблизно 50 см. А довжина дроту вторинної обмотки низькочастотного трансформатора - кілька метрів.

Для забезпечення синусоїдальної форми струму споживання від мережі живлення в деяких інверторних станціях застосовують активні коректори коефіцієнта потужності. При використанні цих пристроїв коефіцієнт потужності сягає 0,99. Але бувають інверторні станції і без коректора. Коефіцієнт потужності таких пристроях, зазвичай, вибирається у 0,7.

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## 2.2 Формування вимог до розроблення СКЗ

Раніше станції ділили на автоматичні та ручні. Малося на увазі, що автоматичні пристрої щось стабілізують (струм чи потенціал), а в ручних станціях вихідні параметри виставляються обхідником для конкретних умов. Зі зміною навколишніх умов (коливання напруги живильного середовища, зміна стану анодного заземлення, дощ, мороз...), вихідні параметри ручних станцій змінюються. Для сучасних станцій правильніше називати конкретні параметри, що стабілізує пристрій. Можуть бути такі варіанти:

- станція не стабілізує нічого, струм захисту регулюється у ручному режимі. Це дуже старі варіанти механізмів, але вони досі працюють і навіть виробляються;

- стабілізація вихідного струму. При зміні опору навантаження, напруги мережі живлення, вихідний струм залишається незмінним, на заданому рівні. Досить поширений режим;

- стабілізація вихідної напруги. При зміні навколишніх умов незмінною залишається напруга. Такий режим використовується рідко;

- стабілізація захисного потенціалу. Пристрій підтримує стабільний потенціал електрода порівняння;

- стабілізація одночасно всіх вище наведених параметрів. Наприклад, потенціал на рівні 0,8, якщо струм не перевищить 10 А, а напруга повинна бути не вище 30 В.

У принципі, всі ці режими можуть бути як трансформаторні, так і інверторні станції. Але в інверторних пристроїв функціональні можливості, як правило, ширші. І це вигідно їх вирізняє серед трансформаторних

Енергетичні вихідні параметри:

- номінальна вихідна потужність;
- номінальний вихідний струм;

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- номінальна вихідна напруга.

Значення струму, напруги та потужності на виході станції визначаються конкретними умовами експлуатації. Пристрій повинен забезпечити ці параметри в межах заявлених. Наприклад, станція з вихідними параметрами 1200 Вт, 24 А, 50 В повинна в номінальному режимі (тобто як завгодно довго) забезпечувати струм до 24 А, якщо напруга не перевищить 50 В. При надто високому опорі навантаження, наприклад 3 Ом, і заданому струмі 20 А пристрій може не забезпечити необхідний струм, так як для струму 20 А напруга має бути  $20 \text{ А} * 3 \text{ Ом} = 60 \text{ В}$ , а параметрах вказано тільки 50 В.

Більшість станцій у газовій промисловості має вихідну потужність 1 – 3 кВт, хоча зустрічаються пристрої до 10 кВт, хоча це з дебільшого надлишковість. Найпоширеніша вихідна напруга 50 В та 100 В.

Коефіцієнт корисної дії. Параметр, що визначає економічність станцій. Витрата електроенергії залежить саме від нього. Трансформаторні пристрої значно програють за цим інверторним параметром.

Таблиця 2.1 – Типові значення ККД

Тип станції	Типовий ККД
Трансформаторна без згладжуючого дроселя	70 %
Трансформаторна із згладжуючим дроселем	80 %
Інверторна	85 - 90 %

Проблема трансформаторних станцій полягає не лише у конкретних значеннях їхньої вихідної потужності. Основна складність у тому, що зі зменшенням навантаження ефективність (ККД) таких станцій різко падає — іноді до 20–30 %. Це зумовлено тим, що втрати на перемагнічування магнітопроводу трансформатора залишаються постійними, незалежно від рівня споживаної потужності, і тому при малих навантаженнях становлять значну частину загальних втрат.

У пристроях катодного захисту вихідна потужність визначається опором навантаження, тобто станом анодного заземлення. За нормального (низькоомного) стану заземлення потрібна менша напруга, а отже й нижча потужність для підтримання необхідного струму. Згодом, унаслідок старіння або заростання анодів, опір зростає, і система повинна подавати більшу потужність. Однак більшість часу станції катодного захисту працюють у режимі зниженої потужності — саме в ньому трансформаторні пристрої демонструють найменший ККД.

У інверторних СКЗ при зменшенні вихідної потужності, ККД знижується незначно. Встановлено, що при заміні трансформаторних станцій (1500Вт) на інверторні, економія електроенергії на один пристрій на місяць досягає 100 кВт\*год.

Коефіцієнт пульсацій. У інверторних станціях рівень пульсацій становить 2- 5 %. Досягається це досить легко. У вихідному фільтрі використовуються дросель та конденсатори невеликих розмірів через високу частоту перетворення.

У трансформаторних пристроях цей параметр можна зменшити до 10% установкою величезного дроселя, розмірами та вагою не менше силового трансформатора. Без дроселя коефіцієнт пульсацій цілком може досягати і 90% при зменшенні вихідної потужності.

Діапазон напруги і частота живлення. Велику перевагу в цьому параметрі мають інверторні пристрої з коректором коефіцієнта потужності, проте вони значно збільшують вартість системи.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						43
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

Таблиця 2.2 – Діапазон напруг живлення

Тип станції	Напруга і частота живлення СКЗ
Трансформаторна	220 В ± 10 %, 50 ± 2 Гц
Інверторна без коректора коефіцієнта потужності	220 В ± 10 %, 50 ± 5 Гц
Інверторна з коректором коефіцієнта потужності	220 В ± 20 %, 50 ± 5 Гц
Інверторна із відділеним живленням	48 В ± 10 %, постійна

Захисні функції. Станції катодного захисту працюють у важких умовах, з нештатними ситуаціями, що часто виникають. Тому обробка аварійних режимів – вкрай важлива функція.

Захист від короткого замикання. На трансформаторних станціях реалізується за допомогою плавкого запобіжника. При кожному замиканні виникають ударні струми, що знижують надійність тиристорів, і необхідно змінювати запобіжник.

В інверторних станціях застосовують різні схемотехнічні рішення для захисту. Деякі з них ведуть до появи в момент замикання ударних струмів напівпровідникових приладів, що знижує надійність пристрою. Деякі пристрої вимикаються після короткого замикання та потребують додаткового увімкнення, інші вмикаються автоматично.

Захист від обриву навантаження. Обрив навантаження не може спричинити поломки станції. Небезпека цієї ситуації лише в тому, що на виході пристрою з'являється досить висока напруга близько 60 – 120 В, що може призвести до ураження електричним струмом. У своїй розробці я пропоную виявляти цю ситуацію і вимикаю інвертор під час обриву або обмежую вихідну напругу. На трансформаторних та багатьох інверторних станціях режим обриву навантаження не обробляється.

Захист від перевантаження по вихідній потужності та захист пристрою від перегріву. Обмеження вихідної потужності станцій, як правило, розробники не передбачають. Заявляється, що вихідна потужність пристрою не менше певного значення, але може бути дещо більше. В моїй розробці є обмеження вихідної потужності. Достатньо включити одночасно режими стабілізації струму та напруги. Занадто велика вихідна потужність може призвести до перегріву пристрою. Також перегрів може статися через підвищену температуру навколишнього середовища. Інверторні станції, як правило, контролюють температуру радіатора силових елементів і обмежують потужність або вимикають пристрій при перегріві. В моїй розробці контролюється температура радіатора. У трансформаторних станціях зазвичай функції захисту від перегріву немає.

Захист від обриву ланцюга вимірювання електрода порівняння. У режимі стабілізації потенціалу зворотний зв'язок регулятор станції надходить від зовнішнього електрода порівняння. Провід до цього електрода може обірватись. Станція виміряє значення потенціалу на обірваному дроті. Швидше за все, воно дорівнюватиме нулю. Намагаючись підвищити потенціал, пристрій перейде на повну вихідну потужність. Пристрої з інтелектуальним керуванням обробляють таку ситуацію. Мною пропонується перехід у режим стабілізації струму.

Захист від перенапруги. Як правило, використовуються варистори, які замикають коло при підвищенні напруги. Іноді застосовуються додаткові блоки захисту від імпульсних перешкод. Мною пропонується застосувати варистори як штатний захист, а як додатковий захист можуть використовуватися блоки на пробивних стабілітронах (супресорах) та плавких запобіжниках. Дуже ефективний захист, хоч і потребує заміни запобіжників.

Діапазон регулювання параметрів. Майже у всіх станціях параметри (вихідний струм, напруга) задаються в діапазоні 5-100%. У трансформаторних станціях це з тим, що з малих значення кута відкривання, тиристри працюють

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

нестабільно. У інверторних пристроїв задавати параметри від нуля, швидше за все, заважає те, що тривалість імпульсів управління силовими транзисторами не може бути меншою за певну величину (зазвичай 1 мкс).

Точність стабілізації параметрів. Вимоги допускають відхилення параметрів стабілізації не більше ніж на 2 %. Зазвичай таку точність регулювання забезпечують станції. На деяких станціях похибка стабілізації параметрів трохи більше 1%. Споживачі не особливо звертають увагу на цей параметр.

Вхідний опір вимірювача потенціалу. Розробники мідно-сульфатних електродів порівняння вимагають щоб вхідний опір ланцюга вимірювача було не менше 10 МОм. Не всі пристрої забезпечують цей параметр. Важко реалізувати такий високий вхідний опір та точність виміру в широкому діапазоні температур. У моїй розробці вдалося забезпечити цей параметр за рахунок застосування АЦП із вхідним опором 30 МОм.

Ступінь захисту від зовнішніх впливів. Станції катодного захисту працюють на свіжому повітрі. Тому потрібне виконання корпусу зі ступенем захисту IP34. Більшість виробників випускає пристрої саме такого виконання. Виготовляють станції в корпусах IP54. Це пилозахищене виконання, без вентиляційних щілин. Щоправда, це пристрої невеликої потужності до 1 кВт.

Температура довкілля. Більшість станцій діапазон робочих температур -40 ... +45 °С.

Механічна конструкція. Станції катодного захисту роблять у різних корпусах, різної конструкції, різної форми, різних розмірів. Для споживача, звичайно, важливі вага та розміри пристрою. Від цих параметрів залежать витрати на транспортування, зберігання, обслуговування. Проте часто замовники вимагають інтеграції в існуючі корпуси СКЗ.

Не менш важливим є інше питання. Пристрої стають дедалі складнішими. Що робити у разі поломки. У чистому полі їх відремонтувати. Станцію невеликих розмірів легко демонтувати та відвезти до майстерні. Але до неї

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

підключена мережа живлення 220 В. А підключення та відключення мережі вимагає узгодження з енергетиками. Тому сучасні станції повинні забезпечувати швидку заміну внутрішніх модулів безпосередньо на об'єкті та без монтажних операцій із лічильником електроенергії. Споживачі станцій все частіше звертають увагу на таку функцію.

Система телемеханіки. Станції повинні мати можливість підключення до системи телемеханіки. В принципі будь-яку станцію можна підключити до контролера GSM телеметрії, чи провідної телеметрії. Є контролери, що допускають пряме підключення струмового шунта, виходу пристрою, лічильника електроенергії, датчика відчинення дверей тощо. Але для керування станцією вона повинна мати інтерфейс телемеханіки.

На трансформаторних станціях або інтерфейсу телемеханіки немає, або це архаїчні аналогові сигнали 0...5 В, 0...10 В, 0...20 мА, 4...20 мА. У деяких інверторних станціях з'явилися послідовні цифрові інтерфейси. Вони дозволяють обмінюватися контролеру телеметрії та станції практично необмеженою кількістю даних. Найпоширенішим інтерфейсом є RS485. Дуже часто їх переводять на оптоволокно.

Параметри функцій, технологічні установки. У всіх перерахованих вище функцій багато параметрів. Ці параметри містяться в незалежній пам'яті контролера станції. Інтелектуальні пристрої дозволяють користувачам змінювати ці параметри для створення оптимальної конфігурації системи.

### **2.3 Push-Pull перетворювач**

З метою реалізації теми бакалаврської роботи було розроблено функціональну схему системи, рис.2.5, яка здатна реалізувати поставлені задачі до антикорозійного електрохімічного захисту об'єктів.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Система базується на двох ключових компонентах — блоці керування та Push-pull інверторі. Блок керування забезпечує регулювання інвертора шляхом генерації широтно-імпульсного сигналу (ШІМ), який визначає рівень струму та напруги на його виході. Використання ШІМ-технології дозволяє ефективно протидіяти впливу електромагнітних завад, а також фізично та функціонально розділити керуючу частину й силовий блок системи.

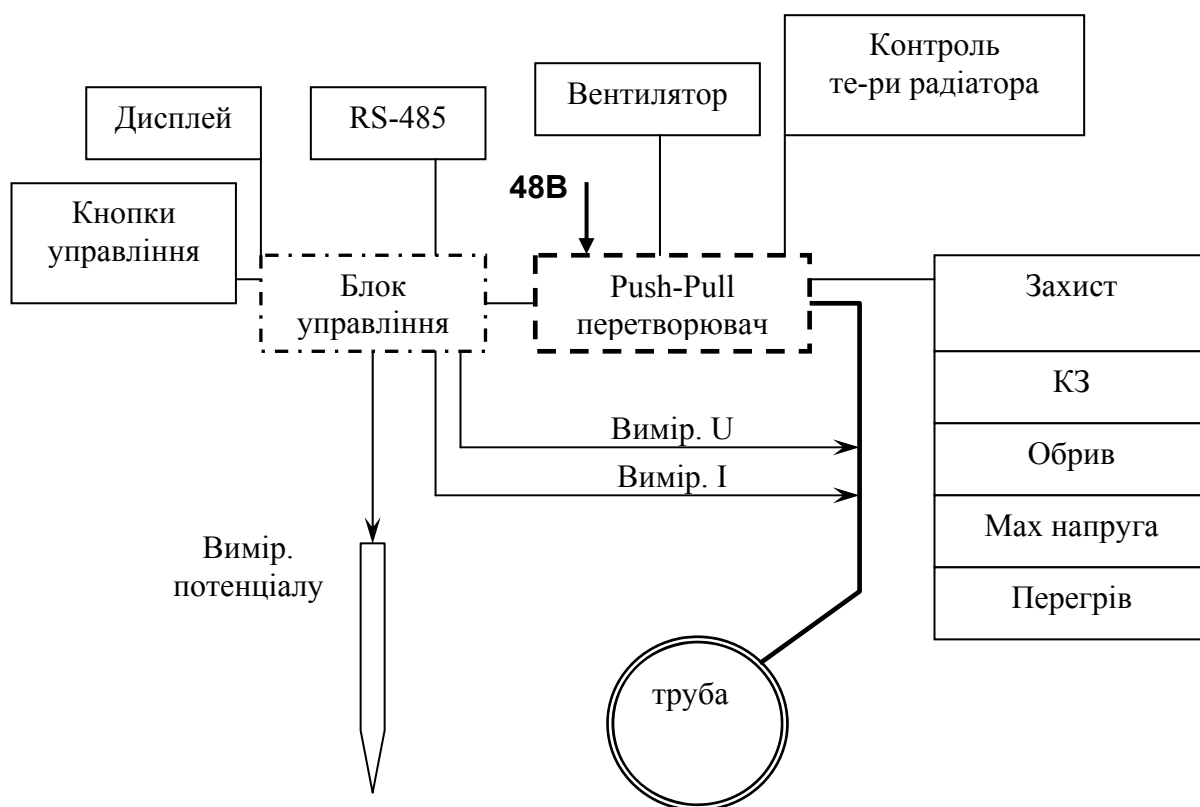


Рисунок 2.5 – Функціональна схема системи управління СКЗ

До блоку керування підключено дисплей, який забезпечує відображення актуальних параметрів роботи: напруги, струму, потенціалу та активного режиму. Керування режимами функціонування пристрою здійснюється за допомогою кнопок, розміщених на панелі керування [11]. Цей блок також виконує вимірювання вихідних параметрів напруги і струму катодного захисту, а також потенціалу на контрольному електроді. Для обміну даними з телеметричними системами, що забезпечують дистанційний моніторинг та

прийом команд керування, використовується інтерфейс RS-485 — як оптимальний варіант за критеріями швидкості передачі та завадостійкості.

Основна функція блоку інвертора типу push-pull — генерація вихідних значень напруги й струму відповідно до заданих параметрів катодного захисту при живленні від джерела 48 В. Перетворювач автоматично керує роботою вентилятора охолодження силових елементів залежно від температури радіатора. Крім того, реалізовано функції захисту від короткого замикання, розриву вихідної лінії, перевищення напруги та перегріву. Для управління силовими транзисторами застосовується спеціалізований драйвер.

Схема push-pull є класичним прикладом двотактних перетворювачів. У порівнянні з однотоктними, такі схеми мають менші габарити, зокрема в частині вихідного фільтра, та дозволяють отримати вищу потужність. Основним недоліком є складніша структура і більша кількість компонентів. Назва «push-pull» («штовхай-тягни») відображає принцип дії схеми: під час роботи одна з обмоток трансформатора тягне, а інша — штовхає.

На рисунку 2.6 наведено спрощену електричну схему перетворювача типу push-pull. Принцип роботи полягає в тому, що енергія подається на навантаження протягом обох півперіодів циклу. Такий тип перетворювача зазвичай використовується при низькій вхідній напрузі (до 30–50 В) та вихідній потужності в межах 50–2000 Вт.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

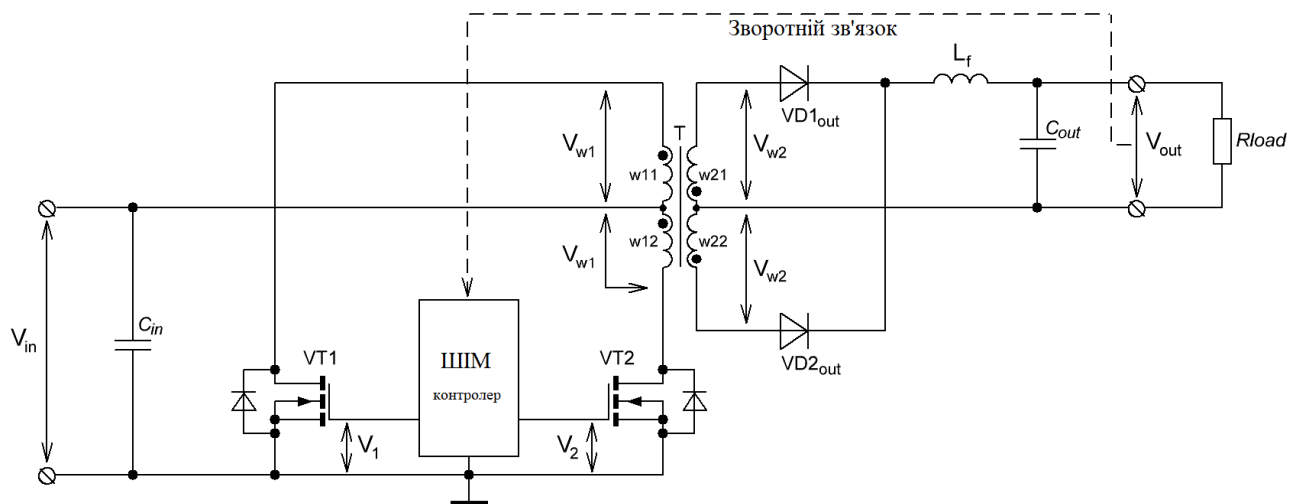


Рисунок 2.6 – Спрощена електрична схема перетворювача push-pull

Схема складається з двох транзисторних ключів, що керуються ШІМ-контролером. Первинна обмотка трансформатора має дві симетричні півобмотки зі спільною середньою точкою, яка підключається до джерела живлення. Виводи обмоток з'єднані з транзисторами, що заземлені через спільну шину. Кожна півобмотка по черзі підключається до живлення, що забезпечує симетричне перемагнічування сердечника. Для випрямлення вторинної напруги використовується двопівперіодна схема з трансформатором, який має вивід від середини обмотки. Це рішення є ефективним для вихідних напруг до 50 В. Якщо напруга більша — доцільно застосовувати мостовий випрямляч.

Керуючі сигнали від ШІМ-контролера по чергово відкривають силові ключі VT1 і VT2. Імпульси керування зміщені відносно один одного таким чином, щоб в той час коли один із транзисторів відкритий, інший був надійно закритий. Керування ключовими транзисторами в перетворювачі push-pull здійснюється відносно рівня землі, що суттєво спрощує схемотехніку перетворювача. Імпульси керування мають однакову тривалість. Це необхідно для запобігання підмагнічування. Період повторення імпульсів –  $T$ . Додатково між імпульсами вводиться так званий мертвий час необхідний для того, щоб один

ключ встиг надійно закритись перед тим як ввімкнеться інший. Тобто затримка між імпульсами запобігає ситуації, коли обидва транзистори ввімкнені і кожний є навантаженням для іншого. При цьому виникають значні імпульсні струми, що обмежуються лише індуктивністю розсіювання півобмоток та омичним опором контуру. Первинні півобмотки трансформатора містять однакову кількість витків.

В результаті комутації транзисторів VT1 і VT2 до первинних півобмоток по чергово прикладаються імпульси напруги амплітудою, яка, по суті, дорівнює напрузі живлення. Імпульси мають однакову тривалість, що забезпечує симетричне перемагнічування магнітопроводу трансформатора. У вторинних півобмотках також з'являються імпульси напруги з амплітудою визначеною коефіцієнтом трансформації. Після двопівперіодного випрямляча вже однополярні імпульси згладжуються LC-фільтром і на виході перетворювача ми одержуємо постійну напругу.

Як вже було сказано раніше, наявність затримки між керуючими імпульсами – необхідний захід, для усунення перевантажень по струму, що виникають у випадку, якщо один транзистор буде ввімкнений швидше, ніж другий встигне закритись.

Коефіцієнт заповнення або відносна тривалість імпульсу це відношення тривалості  $t_i$  до періоду  $T$ :

$$q = \frac{t_i}{T}, \quad (2.1)$$

У перетворювачі push-pull відносна тривалість імпульсу  $q$  теоретично може змінюватись в межах 0-0,5. При цьому максимальна потужність забезпечується при максимальному значенні  $q$ .

Кожний робочий цикл перетворювача push-pull має чотири стадії:

- стадія комутації першого ключа VT1;
- стадія першої паузи (стадія "мертвого часу");
- стадія комутації другого ключа VT2;

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- стадія другої паузи (стадія "мертвого часу");

Тимчасові діаграми напруг і струмів відповідні різним циклам роботи перетворювача наведені на рис. 2.7.

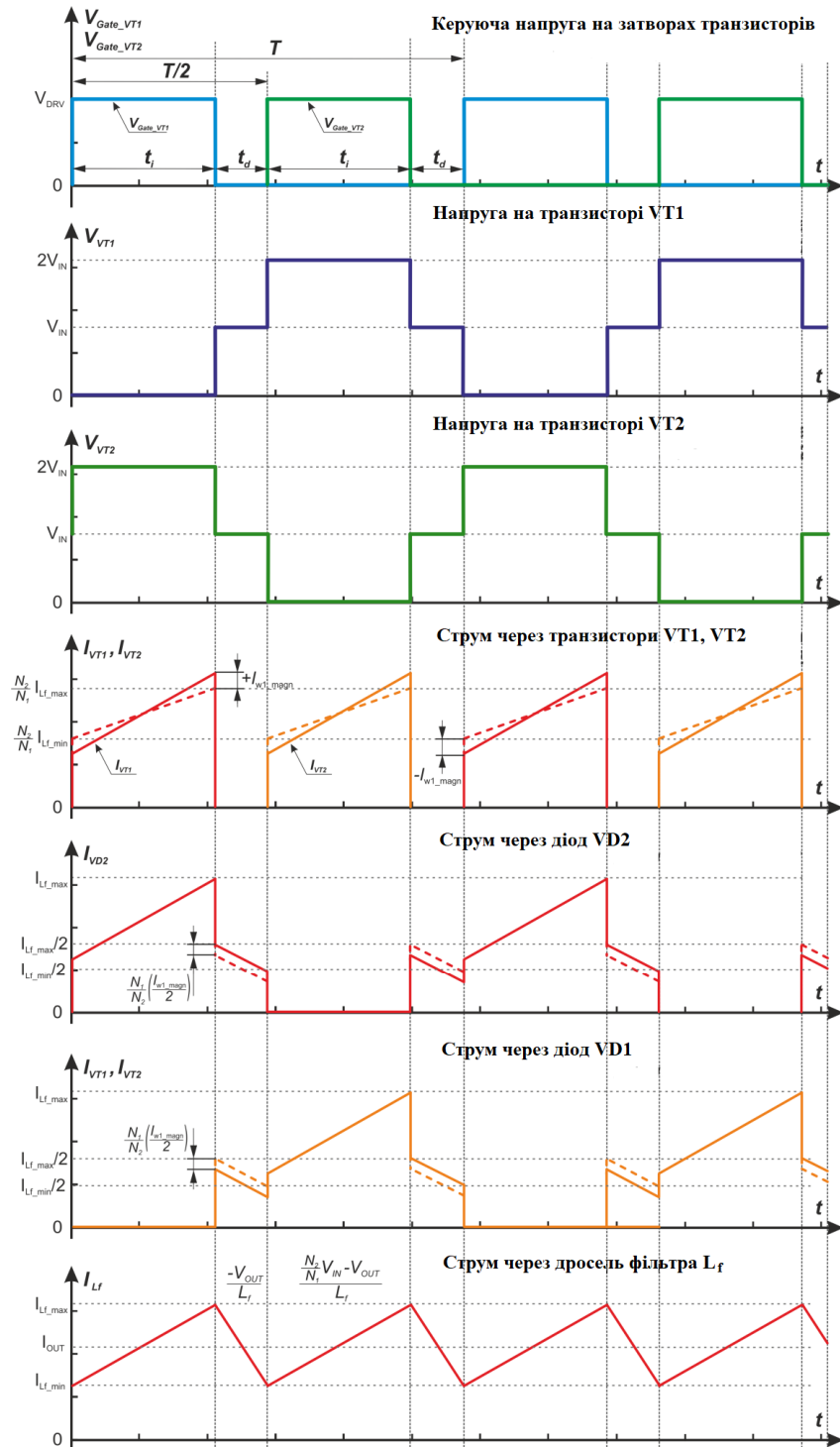


Рисунок 2.7 - Часові діаграми імпульсів напруг і струмів елементів перетворювача напруги

Для розуміння процесів та розрахунку багатообмоткових трансформаторів у різних режимах зручно використовувати підхід, що ґрунтується на складанні балансного рівняння для ампер-витків кожної з обмоток і умов неперервності ампер-витків у моменти комутації.

Двотактні перетворювачі мають складніше компонування і більшу варіативність побудови принципової схеми. У зв'язку з цим, виходячи з вихідних параметрів розрахунку, визначають варіанти побудови принципової схеми:

- на роль ключових елементів для побудови push-pull перетворювача, як правило, вибирають MOSFET транзистори. Використання біполярних або IGBT транзисторів недоцільне через значне падіння напруги на них (з урахуванням того, що напруга живлення push-pull не перевищує 30-50 В);

- тип вихідного випрямляча, тип вихідних діодів. Якщо вихідна напруга низька (менше 12-15 В), а струм досить великий (більше 5-10 А), то доцільне використання двопівперіодного випрямляча із середньою точкою трансформатора та використання діодів Шотки. Важливо розуміти, що від вибору схеми випрямлення залежить габаритна потужність і відповідно габарити трансформатора. При використанні двопівперіодного випрямляча із середньою точкою необхідна габаритна потужність і габарити трансформатора збільшуються в порівнянні з мостовою схемою випрямлення.

- визначення рівня радіо- та електромагнітних перешкод, що впливає на вимоги щодо вибору типу магнітопроводу та екранування трансформатора;

- вибір способу запуску перетворювача - пряма комутація або керований плавний пуск. При великих потужностях або підвищених вимогах до надійності краще організувати систему плавного пуску (і вибрати контролер, що забезпечує цю можливість).

Робоча частота перетворювача вибирається виходячи з вимог до ККД перетворювача, масогабаритних показників, можливостей сучасної компонентної бази.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Вибір верхнього значення робочої частоти перетворювача ґрунтується на аналізі різних складових втрат потужності (втрати в магнітопроводі, втрати на індуктивностях розсіювання, втрати, пов'язані із скін-ефектом, втрати на ключових елементах тощо. Сучасна елементна база дозволяє без особливих схемотехнічних труднощів працювати у діапазоні 75-200 кГц.

В загальному випадку справедливі правила:

- збільшення робочої частоти забезпечує зменшення габаритів пристрою та навпаки;
- збільшення робочої частоти призводить до росту втрат і відповідно до зниження ККД джерела й навпаки;
- збільшення робочої частоти підвищує вимоги до компонентів джерела, швидкодії перемикачів силових транзисторів та топології розводки друкованої плати, матеріалу магніто проводу трансформатора.

Вихідними даними для вибору двотактного контролера перетворювача push-pull є вимоги щодо регулювання вихідної напруги (струму), діапазон робочих частот, швидкодія, вартість, додаткові можливості (реалізація плавного пуску, керування тривалістю «мертвого часу», захист від короткого замикання, можливість керування синхронним випрямлячем тощо).

Вибраний тип контролера визначає значення максимального коефіцієнта заповнення. Максимальне значення коефіцієнта заповнення контролерів двотактних перетворювачів може набувати значення аж до 49%. У більшості типів контролерів реалізована можливість керування максимальною величиною коефіцієнта заповнення. Цю можливість використовують за необхідності збільшення «мертвого часу» через низьку швидкодію ключових транзисторів або ланцюгів їх управління. Крім цього, тип контролера визначає максимальну потужність управління затвором ключового транзистора.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## 2.4 Драйвер силового блоку UC3825

Мікросхема UC3825 — це високопродуктивний широтно-імпульсний контролер (ШІМ), який призначений для керування імпульсними джерелами живлення. Вона підтримує як струмовий, так і напруговий режими регулювання, що забезпечує гнучкість у застосуванні. UC3825 використовується в таких топологіях перетворювачів, як push-pull, forward, flyback, boost, half-bridge та інші. Однією з головних переваг є високошвидкісна робота — частота комутації може досягати 1 МГц.

Мікросхема має два потужні виходи totem-pole, які забезпечують піковий струм до 1,5 А, що дозволяє безпосередньо керувати потужними MOSFET-транзисторами. Передбачена функція затримки перемикачів (dead-time), яка захищає схему від перехресної провідності. У мікросхемі вбудовано операційний підсилювач помилки з широкою смугою пропускання, що сприяє високій точності регулювання.

Є також високошвидкісний компаратор струму, який дозволяє впровадити обмеження струму на кожному імпульсі. Завдяки програмованому "м'якому старту" (soft start) зменшуються пускові навантаження. UC3825 також має вбудований генератор пилкоподібної напруги, що спрощує схему. Можна налаштовувати максимальне значення duty cycle до 85%.

Вивід синхронізації дозволяє узгоджувати роботу кількох мікросхем або підлаштовуватись під зовнішній генератор. Низьке споживання енергії у режимі старту (до 1,1 мА) дозволяє застосування у високоефективних системах. Вбудований UVLO-захист (undervoltage lockout) запобігає роботі при недостатній напрузі живлення. Виробник мікросхеми — Texas Instruments, що гарантує високу надійність і якість.

Мікросхема випускається у стандартних корпусах DIP-16 і SOIC-16, що зручно для монтажу. Вона широко використовується у телекомунікаційному

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

обладнанні, промислових інверторах, зарядних пристроях і системах живлення. Рівень шуму та перешкод у схемах із UC3825 — низький, завдяки точному ШІМ-генератору та компенсації.

Додатково реалізована функція блокування при перенавантаженні по струму, що підвищує надійність. Використання струмового режиму керування дозволяє ефективніше стабілізувати вихідну напругу за динамічних змін навантаження. Підтримка виводу програмованої тривалості імпульсу затримки дозволяє точно настроїти перетворювач.

Мікросхема має високу завадостійкість, тому її часто використовують у критичних системах живлення. Програмований старт захищає навантаження від перенапруги при запуску. Завдяки стабільній роботі у широкому діапазоні температур (0–70°C), мікросхема підходить для промислового застосування.

Завдяки розвиненій схемотехніці UC3825 дає змогу зменшити кількість зовнішніх компонентів. Зручність у налаштуванні робить її популярною серед розробників. Підтримка режиму синхронізації з іншими генераторами забезпечує гнучкість у складних багатоканальних системах. Ця мікросхема є наступником UC384х, з розширеним функціоналом і вищою частотою.

UC3825 — надійне рішення для побудови ефективних, компактних і продуктивних джерел живлення. Якщо потрібно побудувати точний і захищений перетворювач, ця мікросхема — один з кращих виборів серед аналогових ШІМ-контролерів. Функціональна схема зображена на рис. 2.8.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



- захист від перенапруги (Overcurrent Protection): виявляє перевищення струму та ініціює відповідні заходи захисту;
- блокування при низькій напрузі (Undervoltage Lockout, UVLO): запобігає роботі мікросхеми при недостатній напрузі живлення.

## 2.5 Розробка електричної принципової схеми

Метою даної розробки є створення інверторного блоку СКЗ з номінальною потужністю 1 кВт, з можливістю плавного регулювання вихідної напруги від 1 до 100%  $U_{ном}$ , з обмеженням вихідної напруги 48 В та обмеженням вихідного струму 21 А, а також блоку його управління.

У розроблюваному інверторному блоці передбачаються наступні функції:

- плавна зміна вихідної напруги при ручному керуванні;
- плавна зміна вихідної напруги при дистанційному керуванні;
- стабілізація вихідного струму в діапазоні 0...21 А при вихідній напрузі не більше 48 В;
- обмеження вихідної напруги значенням 48 В;
- обмеження вихідного струму значенням 21 А;
- діапазон зміни опору навантаження: 0 -  $\infty$  (інверторний блок має забезпечувати працездатність при зміні режиму роботи від холостого ходу до короткого замикання). Після відновлення опору навантаження, інверторний блок має автоматично повернутися до робочого режиму;
- захист входів напруги живлення та навантаження;
- можливість підключення до комплексів телемеханіки за допомогою інтерфейсу, що використовує струмовий сигнал 4-20 мА чи RS-485.

Результатом розглянутих параметрів стала розробка електричної схеми силового блоку інвертора по принципу push-pull, рис.2.9. Основою блоку є мікросхема-драйвер UC3825.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



витках — лише 18 мА. Це пов'язано з тим, що при меншій кількості витків індукція в осерді збільшується, викликаючи додаткові втрати навіть на холостому ході. Без трансформатора UC3825 споживає приблизно 10 мА.

Для вторинної обмотки розраховано, що 30 витків забезпечують необхідну напругу 6 В (розрахунок:  $12 \text{ В} / 60 \times 30 = 6 \text{ В}$ ). Намотування трансформатора виконано одночасно трьома провідниками: первинна обмотка — 60 витків, вторинні — по 30 витків кожна.



Рисунок 2.10 – Фото ТГР

Підключивши польові транзистори, струм споживання UC3825 зріс до 38 мА, що зовсім небагато. Однією з переваг ТГР є те, що він заряджає затвор польовиків ще й від'ємною напругою. Час включення польового транзистора відбувається в діапазоні від -6 до +6 В, а вимикання від +6 до 0 В, тобто він закривається вдвічі швидше. Іншими словами, ТГР додає свій "мертвий час" (dead time), час якого можна визначити за допомогою осцилографа. Резистор 10 Ом у першій обмотці ТГР полегшує роботу мікросхеми при жорсткому перемиканні, а вторинні резистори 20 Ом трохи сповільнюють перемикання польовиків і також розтягують навантажувальне коло. Експерименти показали, що дуже низький опір затворних резисторів призводить до занадто різкого відкриття польових транзисторів, струм в першій обмотці при такому перемиканні перевищує 20 А. Це призводить до спрацьовування захисту навіть при навантаженні близько 500 Вт.

В якості силового трансформатора я вибрав кільце R40/20/30 з матеріалу РС4А, оскільки вони набагато дешевші, ніж трансформатори з каркасами.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розрахунок кількості витків відносно діаметру проводу, який обрано літцендрат (містить 250 провідників 0.1мм) діаметром 0.1мм.

В результаті розрахунку у програмному пакеті RingFerriteExtraSoft первинна обмотка складається із двох обмоток по 5 витків. При цьому кожен виток містить 500 провідників по 0.1мм діаметром. В результаті загальна довжина провідника первинної обмотки з врахуванням габаритних параметрів трансформаторного кільця R40/20/30 становить 0.6м. Вторинна обмотка містить дві обмотки по 6 витків. Потужність втрат в трансформаторі становить 10Вт, а розрахунковий коефіцієнт корисної дії становить 95%.

Фото трансформатора представлено на рис. 2.11.

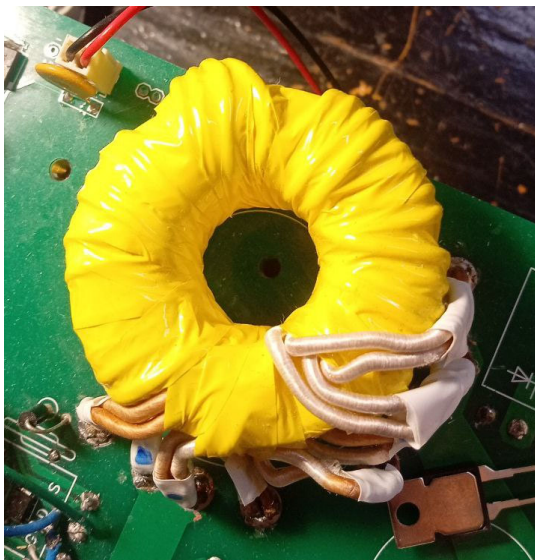


Рисунок 2.11 - Силовий трансформатор

Вихідний дросель інверторного блоку було розраховано у програмному пакеті DrosselRing.

В результаті розрахунку отримуємо кількість витків у 46 при заданих параметрах і моделі кільця R35/24/14. При цьому індуктивність дроселя складає 58мкГн, а задана густина струму 8А/мм<sup>2</sup>.

Струмний захист налаштовується дуже просто, його поріг спрацьовування залежить від опору струмоого шунта. Світлодіод оптоелемента загоряється приблизно від 1 В, тоді шунт 0,05 Ом дає відключення при 1 В/0,05 Ом = 20 А. Потужність на шунті при 1 кВт вихідної

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

потужності складе  $(1000 \text{ Вт}/150 \text{ В}/2)^2 \cdot 0,05 \text{ Ом} = 0,55 \text{ Вт}$ . Важливо, щоб струмовий шунт був безіндуктивним. Можна використовувати металоплівкові або SMD резистори.

Графік вихідного силового сигналу при навантаженні 983Вт зображено на рис. 2.12.

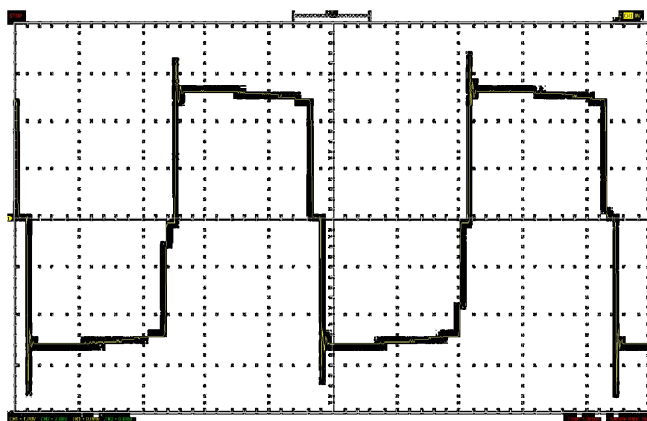


Рисунок 2.12 – Графік при навантаженні 982 Вт

## 2.6 Розробка друкованої плати

Для реалізації поставлених задач було здійснено проектування друкованих плат силового інвертора та блока управління. Для відповідного проектування було вирішено використати перевірений часом програмний пакет P-CAD 2006 від фірми Altium. Його функції і можливості повністю задовольняють вимоги а також є достатніми для формування замовлення виготовлення прототипів. Для цих потреб було використано відповідний онлайн сервіс JLCPCB.com.

На рис. 2.13 зображено зовнішній вигляд друкованої плати в виконаній в середовищі P-CAD 2006.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

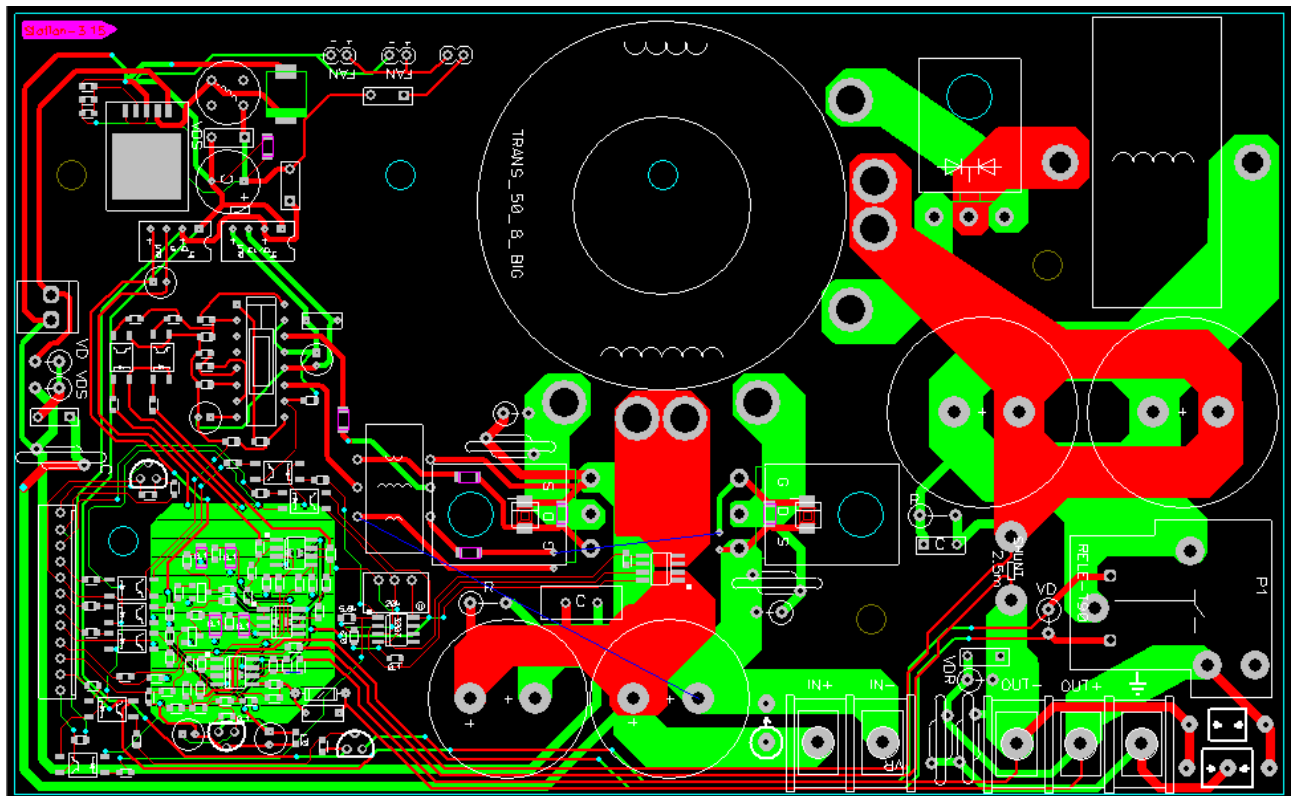


Рисунок 2.13 – Друкована плата

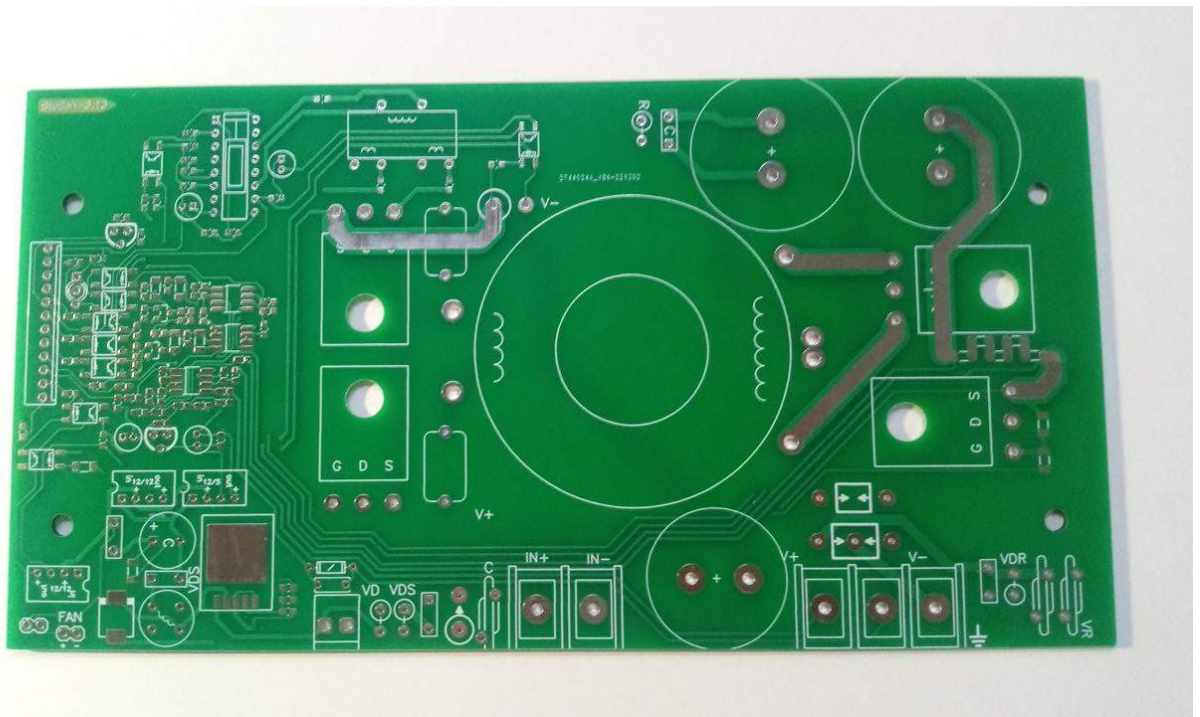


Рисунок 2.14 – Виготовлена друкована плата

										Арк.
										63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ					

## 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ СИСТЕМИ СКЗ

### 3.1 Результати роботи системи СКЗ

Було проведено комп'ютерне моделювання силової частини інверторного блока. Нижче на рисунку представлена модель силової частини інвертора, рис. 3.1.

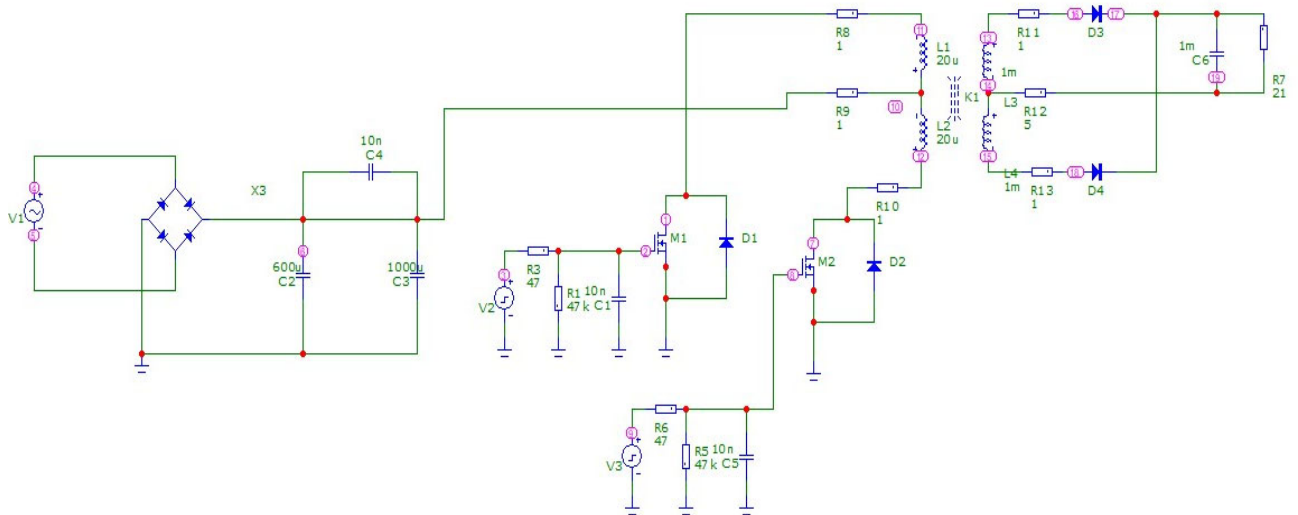


Рисунок 3.1 - Модель інверторного блока в Micro Cap 9

Отримані результати роботи моделі представлені на рис. 3.2.

Живлення інвертора змодельовано через джерело змінної напруги і мостовий випрямляч, хоча в реальних умовах живлення відбувається через зовнішній блок живлення 48В, 1200Вт.

Графік сигналів, рис. 3.2 демонструє вхідну напругу живлення, напругу після діодного моста, сигнали управління на затворах польових транзисторів і напруга на силовому трансформаторі.

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

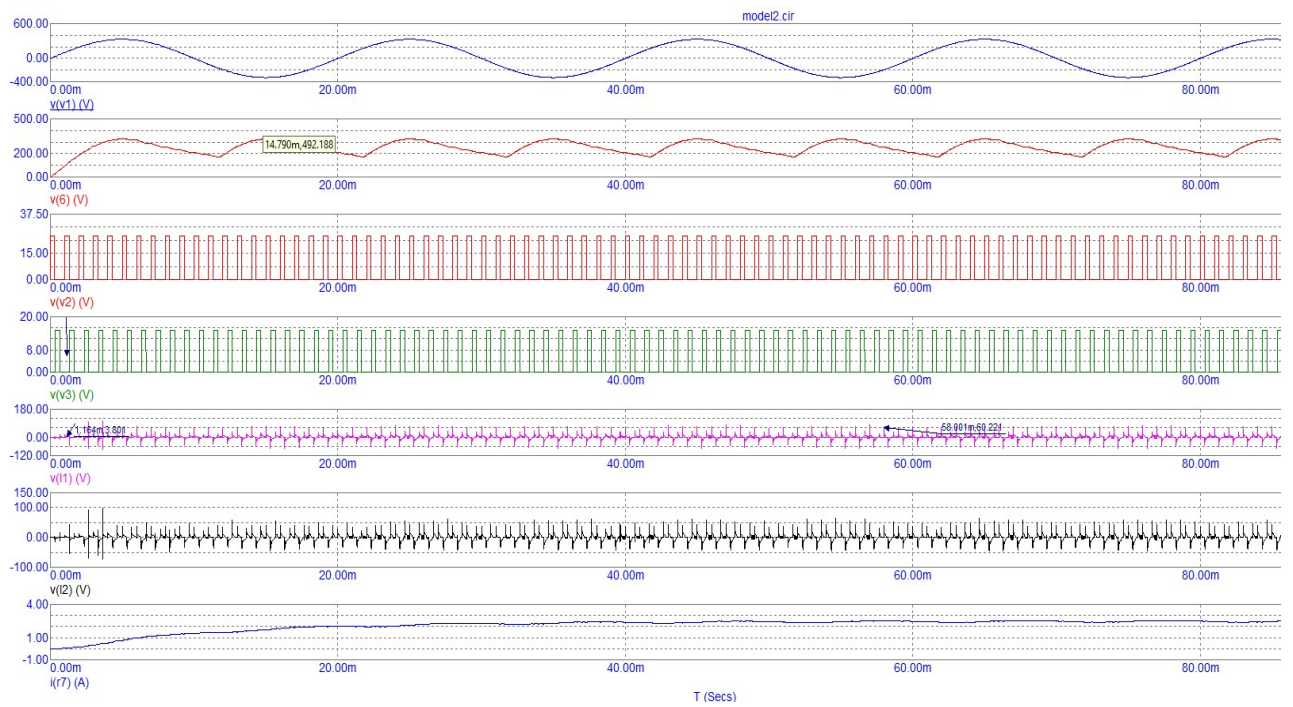


Рисунок 3.2 - Результат моделювання інвертора

В результаті було сконструйовано силовий інвертор на основі попередньо розробленої принципової схеми, рис. 3.3.

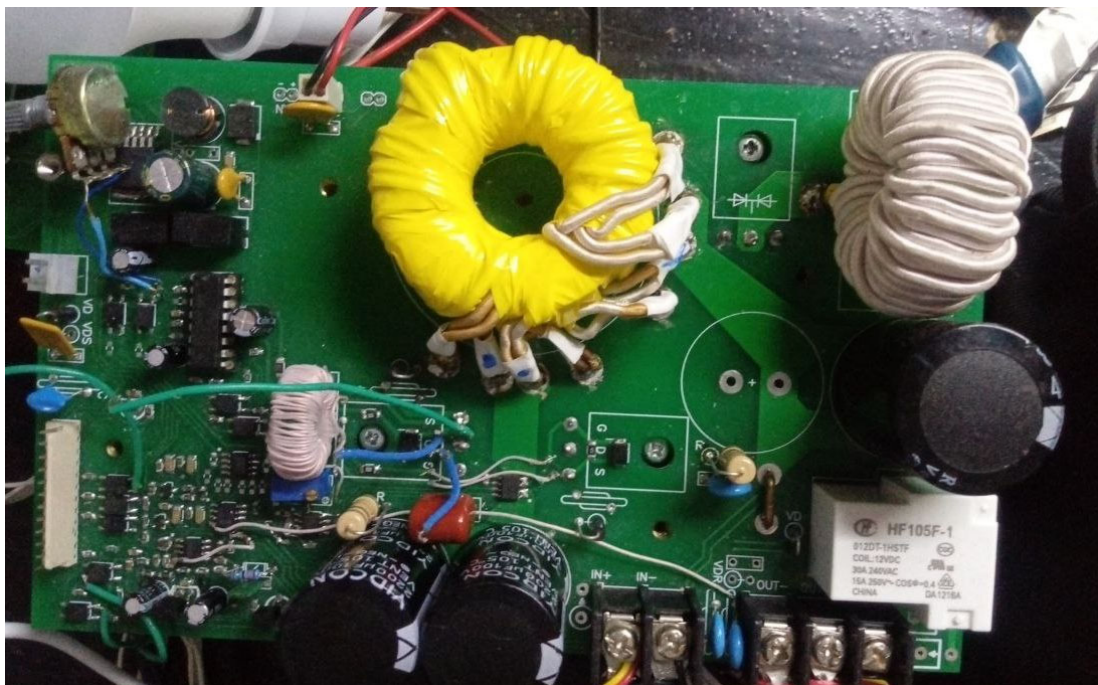


Рисунок 3.3 – Силовий інвертор СКЗ на базі драйвера SG3525

						КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			65

На рис. 3.4 зображено осцилограму на виході імпульсного трансформатора.



Рисунок 3.4 - Напряга в колекторі,  $U_{вх}=20В$ ,  $R_{ном}=2.3Ом$

Із підвищенням скважності силового імпульсу спостерігається зростання рівня імпульсних перенапруг у системі. У випадку використання діодів Шотткі на граничних значеннях скважності відбувався їх електричний пробій, що, у свою чергу, спричиняло різке зростання зворотної електрорушійної сили (ЕРС) на первинних обмотках трансформатора. Це призводило до виходу з ладу силових MOSFET-транзисторів.

Слід зазначити, що амплітуда імпульсних перенапруг, а також форма імпульсу на стоках MOSFET значною мірою залежать від ефективності застосованої снаберної (захисної) ланки. Наявність правильно розрахованої снаберної схеми дозволяє обмежити перенапруги, зменшити навантаження на силові елементи та покращити загальну надійність роботи перетворювача.

На рисунку 3.5 представлені осцилограми напруги на стоках MOSFET-транзистора при використанні снаберної ланки з великою ємністю (понад 10 нФ). Видно, що рівень імпульсних перенапруг під час вимкнення транзистора залишається невисоким, що свідчить про ефективність обмеження перенапруги.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Проте на осцилограмах також фіксується затримка фронту імпульсу, а під час увімкнення протилежного IGBT-транзистора спостерігаються паразитні коливання. Ці коливання є небажаними, оскільки можуть спричинити додаткові втрати, погіршити електромагнітну сумісність та зменшити надійність роботи силового каскаду.



Рисунок 3.5 - Напряга в колекторі,  $U_{вх}=20В$ ,  $R_{ном}=2.3Ом$ ,  $C_{снаб}=20нФ$

Розроблено плату керування силовими ключами на основі мікросхеми SG3525. Дана мікросхема забезпечує керування силовими транзисторами за схемою PUSH-PULL. На рис.3.7 показаний результат тестування на потужності 901Вт.

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 3.6 – Вимірювання вихідної потужності силового інверторного блоку

Отримані осцилограми напруг на колекторі силових транзисторів вказують, що макетний зразок працює якісно відповідно до теоретичного розрахунку, однак при закритті транзистора на колекторі виникає перенапруга, яка у окремих випадках досягала 45 В.

Як висновок, було розроблено перетворювач, який працює за схемою Push-Pull. Ця схема складається з двох ключових силових транзисторів, трансформатора з первинною обмоткою, розділеною на дві півобмотки з середньою точкою. Для випрямлення вихідної імпульсної напруги використовуються діоди Шотки. Були проведені дослідження цієї схеми, які підтвердили, що при потужності 1 кВт схема є оптимальною для побудови перетворювача напруги. Нижче на графіку наведені результати лабораторних випробувань інверторного перетворювача. Випробування проводилися при температурі навколишнього повітря +25 °С, рис. 3.8.

З графіка видно, що через дві години роботи настає термостабілізація силових елементів перетворювача. ККД в номінальному режимі роботи становить близько 90%, що є цілком прийнятним для такого типу інвертора з типовими параметрами.

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

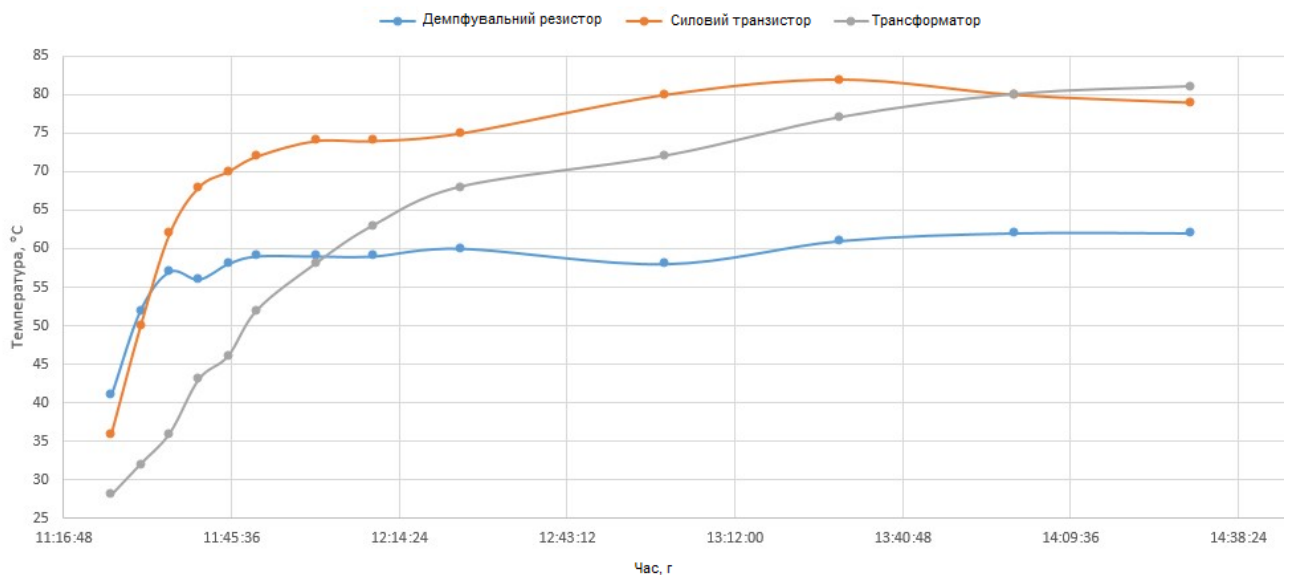


Рисунок 3.8 - Графік нагрівання

З розігрівом опір навантаження незначно зростає (приблизно на 10%). Вихідний струм 24-25 А. Максимальна температура силових елементів не перевищувала 75 градусів.

Інверторне джерело живлення передбачає використання зовнішнього контролера керування. Для забезпечення уніфікації передбачається керування через два сигнали широтно-імпульсної модуляції 0...5 В. Цей стандарт 0-5 В є одним з перших і найпростіших протоколів керування. Основні переваги аналогового інтерфейсу - простота і легкість реалізації, низька вартість і можливість використання будь-якого типу керуючого проводу, але використання екрану значно знижує рівень перешкод від силових ланцюгів, пристроїв [8].

Нижче наведена блок-схема алгоритму керування джерелом інверторного джерела живлення, рис.3.9. Цей алгоритм забезпечує повне усунення можливості виникнення аварійного режиму роботи джерела живлення інвертора шляхом зміни опору навантаження в усьому діапазоні, від відключення навантаження до короткого замикання.

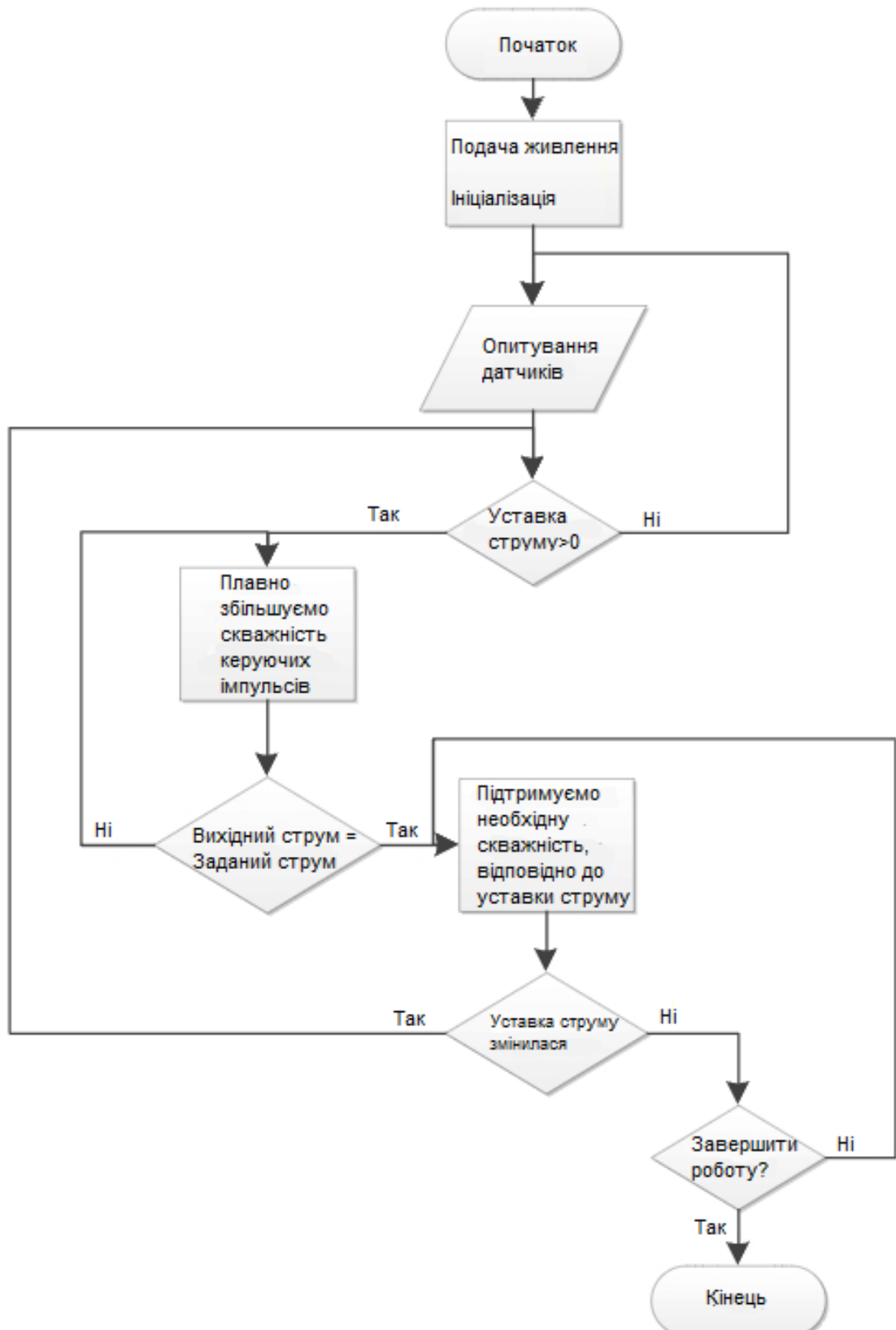


Рисунок 3.9 - Блок-схема алгоритму роботи

На блок-схемі показано алгоритм керування джерелом інверторного джерела живлення катодної захисту станції. Запуск інвертора здійснюється при

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

нульовому заповненні імпульсів, що відповідає нульовому значенню струмів транзисторних ключів, що також забезпечує стабільний режим роботи при відключеному навантаженні (коли вихідний струм інвертора протікає через захисний резистор на виході). Це запобігає появі перенапруги на виході для всього діапазону опору навантаження. Потім поступово збільшується скважність (протягом 3-5 секунд) з постійним контролем струму та напруги навантаження. Тут передбачається, що заданий струм навантаження забезпечує стабільний режим роботи інвертора.

При досягненні заданого значення струму навантаження без перевищення значення напруги навантаження 48 В цей струм підтримується шляхом керування скважністю. У випадку досягнення напруги навантаження значення 48 В (або іншого встановленого у меню) без досягнення заданого значення струму навантаження ця напруга підтримується шляхом керування скважністю.

Таким чином досягається режим управління по струму, по напрузі чи по потенціалу катодного електроду.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		71

## ВИСНОВКИ

Розробка надійних і економних систем антикорозійного захисту трубопроводів є актуальною задачею сучасного трубопровідного транспорту. Протягом року внаслідок незадовільного електрохімічного захисту, втрати металу можуть становити кілька тон.

Елементи станції катодного захисту, їхня надійність і економічність є важливими факторами при електрохімічному захисті.

У цій бакалаврській роботі було спроектовано систему керування перетворювачем катодного захисту, зокрема розроблено силовий блок інверторного типу. Порівняно з традиційними трансформаторними рішеннями, запропонований інвертор має вищий коефіцієнт корисної дії, забезпечує точніше регулювання параметрів, має розширену функціональність та підтримує керування за кількома зовнішніми параметрами. До його переваг також належать компактність, економічність та широкі можливості інтеграції з системами телеметрії.

Особливістю роботи є використання мікросхеми драйвера UC3825 замість широко відомої SG3525. Це перш за все пов'язано із негативними особливостями функціонування даної мікросхеми, що були підтверджені у першій версії даної системи. Застосування мікросхеми UC3825 дозволило організувати більш стабільний режим роботи і стабільний захист. При розробці було використано сучасну елементну базу, яка дозволила добитись високих показників ККД і малих теплових втрат.

Система катодного захисту, що була розроблена повністю відповідає поставленим задачам і закладеному функціоналу, володіє достатнім запасом надійності і демонструє високу економічність в порівнянні з аналогами.

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Державні будівельні норми ДБН.В.2.5-20-2001 Газопостачання. – К.: Держбуд України, 2001. - 286 с.
2. Ратушняк Г. С., Ободянська О. І. Управління змістом проектів із забезпечення надійності зовнішніх газорозподільних мереж. Вінниця, 2014. 128 с.
3. Ратушняк Г. С., Ободянська О. І. «Корозійно-діагностичний моніторинг підземної сталевий газотранспортної мережі», Вісник машинобудування та транспорту, 2017, № 1 (5), с. 90–98.
4. Retractable Linear Polarization Resistance [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.caproco.com/catalog/pdf/Probes-Instruments/Retractable-Element.pdf>.
5. Cormon Data Transmitters and Receivers [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://www.teledyneoilandgas.com/\\_document/TD\\_317\\_DataTransmitter\\_IFS344988\\_RevB\\_1.pdf](http://www.teledyneoilandgas.com/_document/TD_317_DataTransmitter_IFS344988_RevB_1.pdf).
6. Антропов Л. І. Теоретична електрохімія: підруч. для студ. вищ. навч.закл. / Антропов Л. І. – К.: Либідь, 1993.–544 с.
7. Чвірук В. П. Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ / Чвірук В. П., Поляков С. Г., Герасименко Ю. С. – К. : Академперіодика, 2007. - 324 с.
8. 8-bit Microcontroller with 64K Bytes Flash. ATmega64 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу <http://www.atmel.com>.
9. IRFP4227 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу <http://www.iar.com>
10. CodeVisionAVR [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу <http://hpinfotech.com>
11. HD44780 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.solomon-systech.com/en/product/display-ic/smart-tft-lcd-driver-controller/ssd1289/>.

					КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

**Тема:** Розроблення блоку управління станції катодного захисту трубопроводу  
на базі контролера UC3825

Обсяг ПЗ складає 74 аркушів

Перелік креслень графічної частини:

- КРБ.СІ-15.00.00.000Е2 – Схема функціональна (аркушів 1);
- КРБ.СІ-15.00.00.000Е3 – Схема електрична принципова (аркушів 1);
- КРБ.СІ-15.00.00.001 – Плата друкована (аркушів 1);
- КРБ.СІ-15.00.00.002 – Зовнішній вигляд приладу (аркушів 1);

Дата закінчення виконання бакалаврської роботи: \_\_\_\_\_

Студент-дипломник \_\_\_\_\_ Пастернак Ю. Ю.

					<i>КРБ.СІ-15.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		74