

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ
ДЕРЖАВНОГО НЕКОМЕРЦІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»**

Циклова комісія _____ **радіотехніки та електромеханіки**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Голова циклової комісії

_____ **Сергій ЦВІРКУН**
« _____ » _____ **2025 р.**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ
«БАКАЛАВР»

Тема: _____ **Розробка стенду для перевірки пристроїв**

Виконавець: _____ **Артем РУБАН**

Керівник: _____ **Сергій РУДИЙ**

Нормоконтролер: _____ **Дмитро ВЛАСЕНКОВ**

Кривий Ріг 2025

**КРИВОРІЗЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ
ДЕРЖАВНОГО НЕКОМЕРЦІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»**

Відділення	Транспортні технології
Циклова комісія	Радіотехніки та електромеханіки
Спеціальність	172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Голова циклової комісії

_____ Сергій ЦВІРКУН
« _____ » _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти**

Рубана Артема Віталійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача вищої освіти в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Розробка стенду для перевірки пристроїв комутації високої напруги».

затверджена наказом начальника коледжу від «11» квітня 2025 р. № 68-ст

2. Термін виконання роботи: з 12.05.2025 р. по 27.06.2025 р.

3. Календарний план-графік виконання кваліфікаційної роботи:

№ з/п	Зміст завдання	Кінцевий термін виконання	Підпис керівника
1	Розділ 1 Основні характеристики пристроїв комутації та методи їх визначення	23.05.2025	
2	Розділ 2 огляд існуючих стендів контролю пристроїв комутації	30.05.2025	
3	Розділ 3 Розробка принципової схеми стенду та програми для мікроконтролерного вимірювання та керування	12.06.2025	
4	Розділ 4. Охорона праці	16.06.2025	
5	Оформлення пояснювальної записки, нормоконтроль	20.06.2025	

4. Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки

Назва розділу	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання видано	Завдання виконано
Охорона праці	Сергій ЦВІРКУН	12.05.2025	

5. Дата видачі завдання: « 1 » травня 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (підпис керівника)

Рудий С.В.

_____ (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис студента)

Рубан А.В.

_____ (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Розробка стенду для перевірки пристроїв комутації високої напруги»: 72 сторінок, 7 рисунків, 20 використаних джерел.

ВИПРОБУВАЛЬНИЙ СТЕНД, ПРИСТРОЇ КОМУТАЦІЇ, ВИСОКОВОЛЬТНІ ВИМИКАЧІ, ДІАГНОСТИКА, МІКРОКОНТРОЛЕР, STM32, ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС

У пояснювальній записці до кваліфікаційної роботи наведено розробку програмно-апаратного стенду, призначеного для комплексної діагностики пристроїв комутації високої напруги .

У роботі проаналізовано ключові експлуатаційні характеристики комутаційних апаратів та стандартизовані методи їх випробувань . Виконано огляд існуючих промислових та портативних стендів, виявлено їхні основні недоліки, такі як висока вартість, великі габарити та обмежена гнучкість, що обґрунтовує доцільність створення нового пристрою .

В рамках роботи було розроблено функціональну та принципові електричні схеми стенду . Спроековано два ключові апаратні вузли: процесорний модуль керування та вимірювання на базі мікроконтролера STM32F303RET6 , та модуль живлення і високої напруги, що включає схему помножувача напруги для високовольтних тестів . Також створено програмне забезпечення для мікроконтролера, яке реалізує логіку керування тестами, збір даних, обробку сигналів та взаємодію з персональним комп'ютером через інтерфейс USB .

Розроблений стенд дозволяє виконувати основні випробування високовольтних вимикачів, зокрема контроль часових характеристик, струмів соленоїдів, стану контактів та перевірку герметичності вакуумної камери . Він є компактним, бюджетним та гнучким рішенням для оперативної діагностики обладнання .

ЗМІСТ

Розділ 1 Основні характеристики пристроїв комутації низьких, середніх та високих напруг та методи їх визначення	12
1.1 Електричні випробування.....	12
1.1.1 Випробування електричної міцності ізоляції.....	12
1.1.2. Випробування на комутаційну здатність	13
1.1.3. Випробування на електричну зносостійкість	13
1.1.4. Випробування на термічну стійкість.....	14
1.1.5. Випробування мінімальної та максимальної керувальної напруги	14
1.1.6. Випробування електромагнітів та взводів пружин.....	15
1.2 Механічні випробування.....	15
1.2.1. Механічна зносостійкість.....	16
1.2.2. Випробування часу спрацювання	16
1.2.3. Контроль ходу контактів та підтискання	17
1.2.4. Аналіз роботи дискретних входів.....	18
1.3 Теплові випробування.....	18
1.4 Кліматичні та екологічні випробування.....	22
1.5 Спеціальні випробування	25
1.6 Висновки до першого розділу 1	28
Розділ 2 Огляд існуючих стендів контролю пристроїв комутації.....	30
2.1 Стенд SXGK HV/LV Switchgear Panel Testing Bench.....	30
2.2 Стенд ZC-330 HV/LV Switchgear Test Equipment.....	32
2.3 Стенд для тестування HZ2813 High and Low Voltage Switchgear Power-on Test Bench	34
2.4 Автоматизований стенд HTKGG-H Portable Automatic High Voltage Switchgear Circuit Breaker Test Equipment.....	37
2.5 Стенд UHV-430 HV/LV Switchgear Electrify Test-bed	39
2.6 ПКВ/М7 USB-прилад контролю вимикачів.....	41

2.7 Висновок до другого розділу	42
Розділ 3 Розробка принципової схеми стенду та програми для мікроконтролерного вимірювання та керування	46
3.1. Функціональна схема стенду контролю вакуумних вимикачів	46
3.2. Побудова принципової схеми стенду	48
3.2.1. Розробка процесорного модулю керування, вимірювання та зв'язку (CP_U).....	48
3.2.2. Розробка модулю живлення та високої напруги (PS_U).....	50
3.3 Розробка програми керування мікроконтролером	51
3.4 Висновок до третього розділу	54
Розділ 4 Охорона праці.....	57
4.1 Техніка безпеки під час монтажу електричних машин	57
4.2 Техніка безпеки при експлуатації електропривода.....	58
4.3 Аналіз умов праці.....	59
4.3.1 Організація робочого місця.....	60
4.3.2 Мікроклімат виробничих приміщень.....	60
4.3.3 Шкідливі речовини в повітрі робочої зони	61
4.3.4 Виробниче освітлення	61
4.3.5 Шуми і вібрації.....	62
4.3.6 Електробезпека.....	63
4.4 Розробка заходів з охорони праці	64
4.5 Пожежна безпека.....	64
4.6 Розрахункова частина.....	66
4.7 Висновок до четвертого розділу	67
Висновок.....	68
Перелік використаних джерел.....	71

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CAN	–	Controller Area Network
DMA	–	Direct Memory Access
I2C	–	Inter-Integrated Circuit
LAN	–	Local Area Network
RS	–	Recommended Standard
SCADA	–	Supervisory Control And Data Acquisition
SCL	–	Serial Clock Line
SDA	–	Serial Data Line
SPI	–	Serial Peripheral Interface
UART	–	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	–	Universal Serial Bus
КРУ	–	Комплектний Розподільчий Пристрій
НКУ	–	Низьковольтний Комплектний Виріб
ПЛК(PLC)	–	Програмований Логічний Контролер

ВСТУП

Сучасний світ дедалі більше залежить від безперебійного та надійного електропостачання, що є фундаментом функціонування промисловості, інфраструктури та повсякденного життя. Електричні мережі, що охоплюють величезні території та поєднують мільйони споживачів, вимагають не лише потужних джерел енергії, але й ефективних систем керування та захисту. У цьому складному організмі ключову роль відіграють комутаційні апарати – своєрідні "серця" електричних систем, що забезпечують перемикання ланцюгів, захист від перевантажень та коротких замикань, а також контроль за потоками енергії. Від їхньої бездоганної роботи залежить стабільність, безпека та економічна ефективність усього енергетичного комплексу. Будь-які збої в функціонуванні комутаційних апаратів можуть призвести до катастрофічних наслідків: від тривалих перебоїв у електропостачанні, що паралізують цілі регіони, до значних економічних збитків, пошкодження дороговартісного обладнання та навіть загрози для життя та здоров'я персоналу. Це підкреслює критичну важливість їхньої безвідмовної роботи в усіх режимах – від нормального функціонування до екстремальних умов короткого замикання. Саме тому забезпечення високого рівня надійності та безпеки комутаційної апаратури є одним із пріоритетних завдань сучасної електроенергетики, що вимагає постійного вдосконалення методів контролю та діагностики.

Необхідність постійного контролю за станом комутаційних апаратів підкреслюється їхньою важливою роллю у функціонуванні енергосистем. У цьому контексті електричні випробування виступають як фундаментальний етап життєвого циклу будь-якого комутаційного пристрою – від його розробки та виробництва до введення в експлуатацію, подальшого технічного обслуговування та, за необхідності, ремонту. Метою цих випробувань є не просто формальна перевірка відповідності технічним умовам, а глибокий і всебічний аналіз реальної здатності апарата виконувати свої функції в умовах, максимально

наближених до експлуатаційних, а нерідко й у критичних режимах, що перевищують номінальні параметри. Це дозволяє об'єктивно оцінити якість виготовлення, виявити приховані дефекти, перевірити електричну міцність ізоляції, яка є запорукою безпеки та довговічності, а також підтвердити здатність пристрою витримувати короточасні перенапруги та струми короткого замикання – найнебезпечніші режими роботи, що можуть призвести до руйнування обладнання та аварій. Відповідно до міжнародних стандартів та національних норм, електричні випробування включають перевірку діелектричної міцності, стійкості до коротких замикань, комутаційної здатності, а також механічних характеристик. Регулярні профілактичні випробування дозволяють не лише запобігти відмовам, а й оптимізувати графіки обслуговування, переходячи від планово-попереджувальних ремонтів до обслуговування за фактичним станом, що суттєво зменшує експлуатаційні витрати.

Серед усього розмаїття комутаційних апаратів особливе місце посідають високовольтні вакуумні вимикачі, які сьогодні є основою більшості сучасних розподільчих пристроїв. Історично комутаційна техніка пройшла довгий шлях розвитку: від повітряних вимикачів, що гасили дугу в атмосферному повітрі, через оливні та елегазові (SF₆) апарати. Кожен з цих типів мав свої переваги та недоліки, але з появою вакуумних вимикачів було досягнуто значного прогресу у комутаційній техніці. Їхня поява була зумовлена прагненням підвищити комутаційну здатність, зменшити габарити, збільшити ресурс роботи та покращити екологічні показники. Принцип гасіння електричної дуги у вакуумі ґрунтується на унікальних властивостях вакууму, де відсутність газового середовища перешкоджає іонізації та дозволяє дузі швидко згаснути після розходження контактів. Це забезпечує низку незаперечних переваг вакуумних вимикачів: надзвичайно висока швидкість відключення (що критично важливо для обмеження струмів короткого замикання), феноменально тривалий механічний та комутаційний ресурс (до десятків тисяч циклів увімкнення/вимкнення без обслуговування та без заміни дугогасної камери), екологічна безпека (відсутність шкідливих газів, як, наприклад, SF₆, або горючих

матеріалів), мінімальні вимоги до обслуговування та компактні габарити. Завдяки цим характеристикам вакуумні вимикачі широко використовуються в енергетиці (на підстанціях та розподільчих пунктах), промисловості (для захисту потужних електродвигунів та технологічних ліній), транспорті та інших сферах, де потрібна висока надійність та безпека електропостачання.

Незважаючи на всі переваги, вакуумні вимикачі, як і будь-яке складне технічне обладнання, не є абсолютно бездоганними і потребують регулярного та ретельного контролю стану. Особливу складність у діагностиці становить внутрішнє середовище вакуумної камери, яке є герметичним і недоступним для прямого візуального огляду. Це унеможливорює безпосередній контроль за процесами, що відбуваються всередині, такими як зношення контактів, накопичення продуктів ерозії, поява мікротріщин або, найголовніше, поступове погіршення вакууму через мікровитоки. Будь-яке зниження рівня вакууму призводить до погіршення діелектричної міцності та комутаційної здатності, що може стати причиною невідключення короткого замикання або, навпаки, самовільного спрацьовування. Крім стану вакууму, не менш важливими є механічні характеристики приводного механізму, що відповідає за переміщення контактів. Такі параметри, як струми та напруги соленоїдів привода, час відпрацювання (час включення та відключення), одночасність замикання/розмикання контактів (синхронність роботи полюсів), а також наявність або відсутність брязкоту контактів, безпосередньо впливають на термін служби вимикача, його комутаційну здатність та здатність забезпечувати селективний захист. Брязкіт контактів, наприклад, може призвести до повторних пробоїв дуги та прискореного зносу, а порушення одночасності – до нерівномірного розподілу струмів та термічних навантажень.

Існуючі методи діагностики часто є недостатньо точними, вимагають демонтажу обладнання або не дозволяють комплексно оцінити всі ключові параметри одночасно. Традиційні засоби вимірювання, як правило, розрізнені, вимагають значного часу на підключення та проведення вимірювань, а їхня інтерпретація часто залежить від досвіду персоналу. Це обмежує оперативність

діагностики та ускладнює своєчасне виявлення несправностей, що, в свою чергу, може призвести до непередбачених аварійних ситуацій та значних фінансових втрат. Сучасні вимоги до надійності та безпеки електроенергетичних систем висувають на перший план необхідність розробки інноваційних підходів до діагностики та контролю стану високовольтного обладнання, зокрема вакуумних вимикачів. Це створює нагальну потребу у розробці передових, багатофункціональних та інтегрованих рішень, здатних забезпечити всебічний моніторинг ключових електричних та механічних параметрів вакуумних вимикачів з високою точністю та безпекою. Подібні системи повинні мати можливість проводити вимірювання на місці експлуатації, мінімізуючи час простою обладнання та підвищуючи ефективність технічного обслуговування.

Таким чином, метою даної роботи є розробка програмно-апаратного стенду, здатного здійснювати комплексний та точний контроль стану вакуумних вимикачів шляхом вимірювання їхніх основних електричних та часових характеристик. Цей стенд має стати ефективним інструментом для швидкої та достовірної діагностики, дозволяючи своєчасно виявляти приховані дефекти та запобігати можливим відмовам. Для досягнення поставленої мети було визначено наступні основні завдання: дослідження та систематизація ключових електричних та механічних параметрів вакуумних вимикачів, що потребують діагностики; аналіз існуючих методів та засобів контролю з метою виявлення їхніх обмежень та пошуку шляхів удосконалення; розробка апаратної архітектури вимірювального комплексу, що забезпечує точне та безпечне вимірювання таких параметрів, як струми та напруги соленоїдів, час відпрацювання, одночасність замикання/розмикання контактів, контроль брязкоту та витoku вакууму; забезпечення гальванічної розв'язки вимірювальних кіл для гарантування безпеки оператора та запобігання пошкодженню обладнання; а також створення ефективного програмного забезпечення для автоматизації процесу збору, обробки, візуалізації та зберігання отриманих даних. Реалізація такого стенду дозволить значно підвищити оперативність та достовірність діагностики, що, в свою чергу, сприятиме покращенню надійності

функціонування електроенергетичних систем та зменшенню ризиків виникнення аварій. Подальші розділи роботи будуть присвячені детальному розгляду теоретичних аспектів функціонування комутаційних апаратів та методів їх діагностики, опису принципів побудови та функціональних можливостей розробленого програмно-апаратного комплексу, а також аналізу результатів його тестового функціонування та можливостей практичного застосування у реальних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИСТРОЇВ КОМУТАЦІЇ НИЗЬКИХ, СЕРЕДНІХ ТА ВИСОКИХ НАПРУГ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ

1.1 Електричні випробування

Електричні випробування комутаційних апаратів – це один з найважливіших етапів технічної оцінки їхньої якості, надійності та відповідності чинним стандартам і технічним умовам. Метою цих випробувань є не лише виявлення дефектів виготовлення або збірки, але й перевірка реальної здатності апарата виконувати свої функції в умовах, максимально наближених до експлуатаційних або навіть перевищуючи їх. Залежно від типу пристрою, його призначення, класу напруги та середовища використання, випробування можуть охоплювати цілу низку аспектів – від електричної міцності ізоляції до поведінки апарата при короткому замиканні або перевантаженні.

1.1.1 Випробування електричної міцності ізоляції

Цей тип випробувань передбачає перевірку здатності ізоляційних матеріалів і конструкцій витримувати дію підвищеної напруги без пробою або часткових розрядів. У нормальних умовах комутаційний апарат працює при визначеній робочій напрузі, проте в реальних умовах можливі короточасні перенапруги внаслідок атмосферних явищ, перемикачів у мережі або технологічних процесів. Тому випробування на електричну міцність проводяться з напругою, що перевищує номінальну в 2–3 рази.

Тривалість подачі випробувальної напруги зазвичай становить 60 секунд, а рівень напруги регламентується відповідними стандартами [1]. У процесі випробування контролюється відсутність пробою, тріщин, свисту, запаху гару або інших ознак несправності. Особливу увагу приділяють таким елементам як

силові клеми, ізоляційні прокладки, струмопроводи та привідні вузли, що мають електричний контакт із корпусом.

1.1.2. Випробування на комутаційну здатність

Ці випробування є одними з найжорсткіших та найбільш показових. Вони моделюють ситуацію, коли через апарат протікає струм короткого замикання – тобто в десятки або сотні разів більший за номінальний. Основна мета таких випробувань – перевірити здатність апарата безпечно розімкнути ланцюг при такому навантаженні, не допустивши зварювання контактів, руйнування дугогасильних камер або перегріву струмопровідних елементів.

Струм короткого замикання подається з випробувального стенда, обладнаного спеціальними комутаційними пристроями, що дозволяють формувати імпульси струму з необхідною амплітудою, тривалістю і швидкістю наростання. За результатами фіксується момент виникнення дуги, її тривалість, швидкість гасіння та температура в зоні контакту. Якщо контакти зварились або зруйнувались – апарат вважається непридатним до експлуатації.

Вкрай важливо також оцінювати динамічну стійкість конструкції – адже при короткому замиканні виникають величезні електродинамічні сили, які можуть пошкодити корпус, вигнути струмопроводи або розірвати кріплення. Тому, навіть якщо гасіння дуги відбулося нормально, конструкція повинна залишитися механічно неушкодженою.

1.1.3. Випробування на електричну зносостійкість

Цей тип випробувань має на меті визначити, скільки повноцінних циклів вмикання/вимкнення з номінальним навантаженням здатен витримати апарат без критичного погіршення електричних характеристик. Випробування проводяться на спеціальних стендах, де апарат постійно комутує навантаження з заданими параметрами струму і напруги. Після кожної серії циклів проводиться огляд контактів, замір опору ланцюга, перевірка роботи приводного механізму тощо.

За результатами оцінюється не лише кількість спрацювань до відмови, а й характер зносу: чи є пітінг, ерозія контактного матеріалу, втрати пружності притискних елементів. Особливо важливе це для вакуумних або елегазових вимикачів, де дугогасильна середа обмежена, а будь-яке механічне пошкодження критично впливає на роботу.

1.1.4. Випробування на термічну стійкість

При тривалій роботі з високими струмами елементи апарата нагріваються, і якщо тепло не відводиться належним чином – можливі перегріву, деформації, оплавлення ізоляції або навіть займання. Тому в умовах теплових випробувань через апарат протікає струм, рівний або трохи більший за номінальний, протягом тривалого часу (від 1 години до 8 і більше, залежно від класу апарата). Метою є виявлення слабких місць конструкції, таких як зони перегріву, недостатня вентиляція, погане з'єднання.

Вимірюється температура основних елементів – контактів, клем, приводів. При цьому порівнюють результати з гранично допустимими значеннями для матеріалів. Наприклад, мідь витримує до +105 °С, латунь – до +90 °С, полімерна ізоляція – до +70 °С. Якщо температура вища – апарат не проходить випробування.

1.1.5. Випробування мінімальної та максимальної керувальної напруги

Окремо проводяться тести на визначення мінімальної напруги, при якій ще можливе увімкнення або вимкнення апарата. Це критично важливо в аварійних ситуаціях, коли напруга живлення знижується, а потрібно здійснити комутацію. Також перевіряється максимальна напруга, при якій апарат не повинен виходити з ладу, не повинно бути перенасичення електромагнітів, механічних клинів або передчасного зношування. Такі випробування проводять як для постійного, так і для змінного струму. Для електромагнітів пуска та

вимкнення окремо визначають граничні струми, при яких ще зберігається нормальна функціональність.

1.1.6. Випробування електромагнітів та взводів пружин

Для вимикачів із пружинно-моторним приводом особливо важливими є показники струму взводу пружини, а також струми електромагнітів увімкнення та вимкнення. Якщо ці струми вищі за допустимі – можливі перевантаження ланцюгів керування, або неспрацьовування захистів. Струми вимірюють у динаміці – під час реального циклу роботи приводу, з фіксацією початкових піків і стабілізаційних значень.

1.2 Механічні випробування

Механічні випробування є невід’ємною складовою оцінки працездатності та надійності комутаційних апаратів, що застосовуються в електричних мережах різного класу напруг – низької, середньої та високої. Основна мета цих випробувань полягає в перевірці ресурсу та стабільності роботи механізмів перемикання, а також визначенні технічних параметрів, що мають критичне значення для узгодженої та швидкої дії пристрою. На відміну від електричних випробувань, які виявляють здатність апарата справлятися із навантаженням у вигляді струму чи напруги, механічні випробування зосереджуються на роботі приводного механізму, контактної групи, амортизувальних систем, пружин та інших частин, які забезпечують фізичне з’єднання або розрив струмопровідних елементів.

Ключовим завданням є оцінка тривалості служби механізму, точності спрацювання, швидкодії, симетрії по фазах, а також перевірка на наявність механічного зносу або потенційних дефектів, які можуть призвести до аварійних ситуацій або зниження функціональності апарата. Випробування проводяться як

у заводських, так і в лабораторних умовах, із застосуванням спеціалізованих стендів, які моделюють робочі режими з великою точністю.

1.2.1. Механічна зносостійкість

Перевірка механічної зносостійкості – це базовий метод випробування, що дозволяє визначити максимально можливу кількість спрацювань апарата без втрати механічних характеристик. Суть полягає у циклічному вмиканні та вимиканні пристрою без прикладення робочого електричного навантаження. Таким чином оцінюється "чиста" механіка – знос деталей, стабільність приводу, збереження геометричних і кінематичних параметрів упродовж циклів.

Нормативи встановлюють мінімальні вимоги до механічної зносостійкості залежно від типу апарата. Для високовольтних вимикачів цей показник зазвичай становить від 2 000 до 10 000 циклів, для роз'єднувачів – до 2 000, а для низьковольтних автоматичних вимикачів – до 25 000–50 000 циклів. Випробування проводиться на спеціальному приводному стенді, який імітує реальні цикли роботи апарата, з фіксацією кожного циклу. Контрольні виміри (наприклад, час спрацювання, жорсткість пружин, знос втулок) проводяться через кожні визначені інтервали (наприклад, 1 000 або 2 000 циклів).

Особливу увагу приділяють аналізу типових точок зносу – шарнірні з'єднання, осі повороту, упори, кулачки, напрямні елементи. Відхилення в роботі після значної кількості циклів, такі як нестабільність руху, заїдання, порушення синхронізації фаз – свідчать про недоліки конструкції або неякісні матеріали.

1.2.2. Випробування часу спрацювання

Цей тип випробування дозволяє визначити динамічні характеристики комутаційного апарата: скільки часу проходить від моменту подачі команди на вмикання або вимикання до фактичного завершення дії механізму. Параметри фіксуються окремо для кожної фази – А, В і С, щоб виявити асиметрії. До ключових вимірювань відносяться:

- Власний час увімкнення фаз (А, В, С) – тривалість від моменту подачі команди до повного змикання контактів.
- Власний час вимкнення – час від моменту подачі команди до повного розриву електричного кола.
- Час брязкоту контактів – період, протягом якого контакти здійснюють нестабільне змикання або відскакування перед остаточним з'єднанням/роз'єднанням.
- Різночасність фаз (АВ, ВС, АС) – максимально допустима різниця між фазами під час вмикання або вимкнення. Асиметрія понад нормативні межі призводить до нерівномірних навантажень і можливих перенапруг.

Зазвичай для таких вимірювань використовуються оптичні або індуктивні датчики переміщення, а також струмові датчики. Усі дані фіксуються за допомогою високошвидкісних реєстраторів із точністю до мілісекунд. Порівняння показників між фазами дозволяє оцінити ступінь синхронізації та узгодженості роботи приводного механізму.

1.2.3. Контроль ходу контактів та підтискання

Окрему увагу приділяють аналізу геометрії руху контактної пари. Ключові параметри:

- Хід контакту – це повна відстань, яку проходить рухомий контакт при вмиканні або вимиканні. Вона повинна відповідати проектним параметрам, оскільки замалий хід не гарантує повного контакту або розриву, а надмірний – збільшує навантаження на механіку.
- Хід підтискання – додаткове переміщення після дотику контактів, що забезпечує потрібний контактний тиск. Його стабільність є гарантією надійності контакту при вібраціях, температурних коливаннях і довготривалій роботі.
- Пружні характеристики – величина деформації контактних елементів або пружин при прикладенні навантаження. Надто жорстка або м'яка система погіршує якість контакту і прискорює знос.

Вимірювання ходу проводиться із застосуванням лінійних індуктивних датчиків, оптичних лінійок або відеоаналізу. Часто фіксується як початкове положення, так і положення після багаторазових циклів, для оцінки можливих змін в результаті зносу.

1.2.4. Аналіз роботи дискретних входів

У сучасних комутаційних апаратах використовуються дискретні входи для передачі інформації про стан апарата. Надійність і швидкодія цих входів визначають оперативність реагування систем автоматики та захисту.

Основним параметром, що підлягає вимірюванню, є час спрацювання дискретного сигналу, тобто затримка між фізичним переміщенням контактів та моментом активації логічного сигналу. Цей час повинен бути стабільним, не перевищувати нормативних значень (як правило – не більше 20–40 мс) і не залежати від кількості попередніх циклів.

Контроль здійснюється з використанням таймерів або логічних аналізаторів, які синхронізують момент події та зміну сигналу на виході. Також проводиться оцінка стійкості до брязкоту – здатності контакту не видавати помилкові сигнали через мікровібрації або неповне замикання.

1.3 Теплові випробування

Теплові випробування комутаційних апаратів є одним із найважливіших методів контролю їхньої працездатності, надійності та відповідності стандартам. Вони дозволяють виявити дефекти конструкції, визначити придатність пристрою до тривалої експлуатації під струмовим навантаженням, а також переконатись у відповідності матеріалів та елементів апарата до умов підвищеного нагріву. Результати теплових випробувань мають безпосередній вплив на визначення

граничних режимів роботи, строку служби, допустимих перевантажень та захисних характеристик комутаційного обладнання.

Основною метою теплових випробувань є визначення температурного підйому на струмопровідних частинах апарата, ізоляційних компонентах, контактах та інших елементах конструкції при протіканні через них номінального струму або струму, що перевищує номінальне значення. Це дозволяє оцінити здатність пристрою працювати без перегріву, що може викликати старіння або деградацію матеріалів, зниження електричної провідності, появу контактного опору, а в окремих випадках – пробій ізоляції чи навіть пожежу.

Під час теплових випробувань до випробовуваного пристрою підводиться електричний струм, величина якого дорівнює або перевищує номінальний робочий струм пристрою. Зазвичай випробування проводяться при номінальному струмі або в діапазоні 1.05–1.2 номінального струму, щоб врахувати реальні умови експлуатації, де можливі незначні перевантаження. Тривалість подачі струму визначається моментом досягнення теплової стабілізації, тобто моменту, коли температура елементів пристрою припиняє зростати і досягає постійного значення. Згідно з вимогами стандартів, зокрема [2] для низьковольтного обладнання та [3] для середньо- і високовольтного обладнання, теплове випробування триває до моменту стабілізації температури, що зазвичай займає від 1 до 8 годин.

Для контролю температурного підйому використовуються термопари, терморезистори, оптичні пірометри або інфрачервоні камери. Термопари типу К або J закріплюються безпосередньо на контактах, струмопровідних шинах, клемах та інших критичних точках конструкції. Закріплення виконується із використанням термостійкого клею або спеціальної термострічки. Температурні вимірювання проводяться в динаміці, з постійною фіксацією значень за допомогою системи реєстрації даних. Це дозволяє отримати повну картину розігріву в часі та визначити не лише граничні значення, а й швидкість

нагрівання, що також має важливе значення з точки зору термодинамічної стійкості пристрою.

Окрему увагу приділяють контактним з'єднанням – саме в них найчастіше виникають надмірні втрати потужності через підвищений перехідний опір. Якщо контакт нещільний або зношений, на місці дотику виникає локальний перегрів. У таких випадках, навіть за номінального струму, температура може перевищити допустимі межі. Це може призвести до оплавлення контактної пари, деформації, окислення або повного зварювання контактів, що робить подальшу експлуатацію неможливою. Саме тому під час теплових випробувань велике значення має розподіл температури по контактній групі.

Температурні межі, які допускаються для різних матеріалів, регламентовані стандартами. Наприклад, для мідних струмопровідників допустимий температурний підйом становить не більше ніж 70–90°C, для алюмінієвих – 60–80°C. Ізоляційні матеріали класифікуються за класами термостійкості: клас А (до 105°C), клас Е (до 120°C), клас В (до 130°C), клас F (до 155°C) тощо. Перевищення цих значень призводить до старіння або руйнування ізоляції, втрати механічної міцності, розтріскування та розшарування. Ізоляційні втулки, прокладки, штовхачі та оболонка апарата мають зберігати свою форму та діелектричні властивості впродовж усього випробування.

Крім статичних вимірювань, сучасні лабораторії застосовують тепловізійну діагностику, яка дозволяє отримати повну карту температурного поля пристрою. Це особливо ефективно при виявленні асиметричного нагрівання, яке виникає внаслідок неякісної обробки деталей, порушення монтажу або несиметричного навантаження по фазах. Тепловізор дозволяє швидко визначити локальні гарячі точки, які можуть не виявлятися точковими вимірюваннями.

Окремим напрямом теплових випробувань є дослідження впливу багаторазового нагріву. Випробовуваний пристрій піддається серії циклів нагріву до робочої температури та охолодження до кімнатної температури. Такий тест

імітує реальні умови роботи обладнання, яке не постійно працює на одному рівні струму, а часто вмикається та вимикається. У результаті цих циклів можуть виникати мікротріщини, порушення контактів, ослаблення механічних з'єднань, зміна геометрії елементів. Усе це призводить до погіршення теплового відведення, що в свою чергу викликає ще більший перегрів. Виявлення таких тенденцій на етапі випробувань дозволяє запобігти серйозним відмовам в майбутньому.

Також проводяться випробування на короточасний перегрів, які полягають у подачі струму, що перевищує номінальний у 1.5–2 рази, протягом обмеженого часу. Мета – оцінити запас міцності пристрою та перевірити поведінку апарата при перевантаженнях. При цьому контролюється не лише температура, а й стабільність функціонування рухомих частин, цілісність корпусу, а також відсутність спрацьовування захисних механізмів у непризначений момент.

Після завершення основної фази випробувань виконується перевірка стану контактних з'єднань та ізоляційних елементів. Здійснюється візуальний огляд на наявність деформацій, оплавлення, змін кольору, тріщин або ознак руйнування матеріалу. Додатково вимірюється опір ізоляції між струмопровідними частинами і заземленим корпусом, а також між фазами. Такі вимірювання дозволяють переконатись у збереженні електробезпеки апарата після теплового навантаження.

В окремих випадках, особливо для вакуумних вимикачів і елегазових апаратів, теплові випробування проводяться в умовах герметичного середовища. Це дозволяє оцінити, як тепло розсіюється в умовах відсутності прямого повітряного охолодження. Тут дуже важливо, щоб внутрішні компоненти мали достатній коефіцієнт теплопровідності, а корпус – ефективно відводив тепло до зовнішнього середовища через радіатори, тепловідводи чи вентиляційні елементи.

1.4 Кліматичні та екологічні випробування

Кліматичні та екологічні випробування комутаційних апаратів дозволяють визначити надійність та стабільність роботи обладнання в умовах змінного середовища. Електротехнічне обладнання часто працює не в лабораторних умовах, а в реальних середовищах з широким спектром зовнішніх впливів: від тропічної спеки до арктичного холоду, від сухого пилу пустелі до насиченої вологості болотистих регіонів. Тому надзвичайно важливо перевірити стійкість і функціональність пристроїв в усіх можливих умовах, в яких вони можуть опинитися.

Кліматичні випробування передбачають оцінку працездатності апарата при впливі різних температурних режимів, рівнів вологості, атмосферного тиску та інших параметрів довкілля. Стандарти, такі як, визначають чіткі режими та цикли, які повинні застосовуватися до обладнання. Згідно з цими стандартами, випробування проводяться у спеціальних кліматичних камерах, де відтворюється задана температура, вологість, а також можливість раптових змін параметрів [4].

Одним із найпоширеніших типів випробувань є перевірка стійкості до дії низьких температур. У більшості випадків обладнання поміщають у камеру з температурою від -5°C до -60°C (залежно від призначення). Період витримки складає від 2 до 24 годин. Метою цього випробування є виявлення впливу холоду на пластмасові деталі, ущільнення, мастила, рухомі вузли механізмів, пружини, електромагнітні компоненти. Низькі температури викликають крихкість матеріалів, загусання або повну втрату еластичності ущільнень, що може призвести до утрати герметичності чи механічних ушкоджень при спрацюванні. Окрім цього, холодна температура може спричинити зміни у характеристиках електронних компонентів, особливо якщо пристрій містить мікроконтролери або цифрові входи.

Ще одним важливим тестом є випробування високими температурами. Обладнання поміщається в камеру, де створюються умови від $+40^{\circ}\text{C}$ до $+70^{\circ}\text{C}$, а

для тропічного виконання – навіть до $+85^{\circ}\text{C}$. Під час випробувань фіксується не тільки загальна працездатність, але й параметри електричного опору, спрацьовування реле, переміщення механізмів, наявність сторонніх деформацій. Високі температури впливають на контакти, оскільки можуть спричинити термічне розширення, зміну контактного натиску та підвищення опору, що веде до нагрівання і потенційного виходу з ладу.

Важливу роль відіграють також випробування на вологість. Висока вологість, особливо в умовах конденсації, є одним із головних ворогів для електротехніки. Тестування проводиться при температурі від $+25^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$ з відносною вологістю до 95%. Обладнання витримують протягом 96 годин або проводять циклічні випробування зі зміною температури, щоб досягти ефекту конденсації води на поверхнях. Основними загрозами тут є утворення конденсату на ізоляційних елементах, що призводить до зниження електричної міцності, виникнення струмів витоку, корозії металевих частин, особливо контактних груп. Ущільнення та корпус повинні забезпечувати захист від вологи, і тому часто перевіряється рівень захисту оболонки (IP-код), про що йтиметься далі.

Окремо виділяють пилові випробування, які імітують умови експлуатації у середовищах з підвищеною запиленістю – кар'єри, цементні заводи, зернові елеватори, тощо. Пристрої поміщають у пилову камеру, де протягом визначеного часу (до 8 годин) подається сухий мінеральний пил, який за розміром часток і складом відповідає польовим умовам. Після випробувань аналізується, чи пил проник у внутрішню порожнину апарата, чи викликав забруднення контактів або рухомих частин, чи не спричинив механічні заклинювання або зниження електроізоляційної здатності. Для цього обладнання перевіряють на герметичність, функціональність та стабільність параметрів. Такі тести особливо важливі для автоматичних вимикачів, які працюють у силових шафах без кондиціонування.

Іншим типом кліматичних випробувань є тести на стійкість до перепадів температур, які можуть спричинити утворення конденсату. Для цього застосовують циклічне чергування холодної та гарячої температури – наприклад,

–25°C / +55°C з часом витримки по 2 години. Протягом кількох циклів відбувається не тільки вплив на фізичну цілісність корпусу, але й створюються умови для інтенсивного випадання вологи, яка може проникати в найдрібніші щілини та контакти. Такі умови імітують, наприклад, роботу на відкритому повітрі в осінньо-весняний період, коли вдень пристрій нагрівається, а вночі охолоджується.

Усі ці тести мають не тільки лабораторну, а й серйозну практичну цінність. Якщо апарат, встановлений на підстанції в умовах відкритого монтажу, не проходить кліматичних випробувань, він не витримає першої ж зими або літньої спеки. Це призведе до короткого замикання, іскріння, втрати керованості або взагалі до пожежі.

Додатково до кліматичних проводяться так звані екологічні випробування, які передбачають вплив агресивних середовищ: соляного туману, озону, кислотного середовища. Наприклад, випробування на корозійну стійкість соляним туманом (соляна камера) виконується шляхом впорскування розчину NaCl в повітря під тиском при температурі +35°C протягом 48–96 годин. В результаті утворюється насичене сольове середовище, яке пришвидшує процеси корозії. Після завершення тесту проводиться візуальний огляд і функціональна перевірка. Якщо корозія з'явилася на контактних поверхнях, різьбових з'єднаннях або струмопровідних елементах – це вважається неприйнятним.

Також перевіряють стійкість до впливу сонячного випромінювання – ультрафіолету. Деякі пластики, ущільнювачі, ізоляційні матеріали під дією ультрафіолету змінюють колір, втрачають міцність, тріскаються або кришаться. Для цього застосовуються УФ-камери або пряме опромінення лампами з фільтрами, що імітують сонячний спектр. Випробування тривають від кількох днів до кількох тижнів.

Нарешті, важливим елементом є визначення ступеня захисту оболонки апарата. Випробування на ІР-код проводяться згідно зі стандартом ІЕС 60529 [5]. Перший код означає захист від твердих тіл (пилу), другий – від рідини (води). Наприклад, ІР54 означає частковий захист від пилу і бризок води. Перевірка

виконується в спеціальних камерах, де на апарат подається струмінь води під тиском або пил у визначеному об'ємі. Після цього проводиться розбирання та перевірка на проникнення. Для обладнання, що використовується в агресивному або зовнішньому середовищі, IP65–IP67 є мінімально необхідним рівнем.

1.5 Спеціальні випробування

Спеціальні випробування комутаційних апаратів мають на меті визначення експлуатаційної надійності у виняткових або критичних режимах роботи, які не охоплюються стандартними електричними, механічними чи кліматичними перевірками. Серед таких випробувань провідне місце займають тести на ефективність дугогасіння, перевірка стійкості до перевантажень, випробування стійкості до механічних ударів та вібрацій, а також перевірки, пов'язані з нестандартними умовами експлуатації, як-от вплив магнітного поля, електромагнітних імпульсів або навіть сейсмічної активності.

Випробування дугогасіння є одним із ключових тестів для будь-якого комутаційного апарата, особливо для автоматичних вимикачів, контакторів і роз'єднувачів. Суть цього процесу полягає в оцінці здатності пристрою ефективно гасити електричну дугу, яка виникає при розмиканні кола з навантаженням. Під час розриву струмового контуру, особливо при індуктивному навантаженні або високих струмах, між контактами утворюється електрична дуга. Якщо вона не буде загашена оперативно й ефективно, відбудеться теплове руйнування контактів, утворення карбону на поверхнях, зниження ізоляційної стійкості та навіть займання. Особливо це критично при комутації струмів короткого замикання.

Для виконання цього тесту апарат підключають до джерела струму з контрольованими параметрами (найчастіше – лабораторна установка з можливістю регулювання індуктивності та ємності). Процес комутації

записується на високошвидкісні осцилографи. Фіксуються такі параметри, як час горіння дуги, напруга на дузі, довжина дуги, енергія, що виділяється в дуговому проміжку, та температура контактних груп. Для вакуумних або газонаповнених вимикачів проводять також візуальний огляд дугогасильних камер після кількох комутацій. При цьому перевіряють ерозію матеріалу контактів, наявність слідів плавлення, утворення оксидів або відкладень.

Щоб забезпечити гасіння дуги, використовуються спеціальні дугогасильні пристрої – дугогасильні решітки, вакуумні балони, камери з SF_6 (шестифториста сірка), а також комбіновані рішення з магнітними або аеродинамічними системами відводу плазмового струменя. Результати випробувань повинні підтверджувати, що дуга повністю гаситься в межах визначеного часу (зазвичай до 10 мс) і не призводить до неприпустимого нагріву чи механічного пошкодження.

Окремо проводяться випробування на стійкість до короточасних перевантажень. Їх мета – встановити, чи здатен апарат витримати струм, що значно перевищує номінальний, протягом короткого періоду часу, без втрати функціональності. Такий режим виникає під час пуску асинхронних двигунів, роботи великих трансформаторів або під час комутації ліній з високим ємнісним навантаженням. Тест полягає в подачі на апарат струму, що у 3–10 разів перевищує номінальний, протягом 0,1–10 секунд. У цей час контролюється температура корпусу, ступінь розігріву контактів, наявність механічних деформацій, збереження ізоляційної здатності та ефективність механізмів розчеплення.

Серйозним випробуванням для апаратів є короточасна дуготривкість. Це окремий тест, що поєднує елементи дугогасіння і термічної стійкості. У даному випадку пристрій має витримати струм короткого замикання без розриву кола, утримуючи дугу у безпечному стані, наприклад, у камері або на дугогасильній решітці, поки не спрацює автомат захисту в іншій частині системи. Напруга при цьому може сягати кількох тисяч вольт, а струм – десятків кА.

Ще один важливий аспект – це механічна стійкість до динамічних навантажень. Ударні випробування проводяться згідно з нормативами типу [6]. Пристрій піддається впливу короткочасних імпульсів прискорення (ударів), які імітують падіння, транспортні пошкодження або аварійні ситуації на об'єкті. Типове значення – 50 г протягом 11 мс, повторене в трьох осях. Після серії ударів обладнання має зберегти повну працездатність, без внутрішніх зсувів, тріщин або втрати електричного контакту.

Випробування на вібраційну стійкість [7] полягають у поданні апарата синусоїдальним коливанням у діапазоні частот від 10 до 500 Гц з амплітудою прискорення до 5g. Цей тест є обов'язковим для пристроїв, що встановлюються на транспорті (залізничні, морські, авіаційні об'єкти), в зонах сейсмічної активності або поруч з масивними обертальними механізмами. Вібрації можуть викликати резонанс, послаблення кріплень, мікротріщини в паяннях, поломки пластикових елементів або навіть спонтанне спрацювання комутаційних вузлів.

Окрему категорію становлять випробування на стійкість до електромагнітного випромінювання та імпульсних завад. Такі тести виконуються відповідно до стандартів ЕМС [8]. Метою є перевірка здатності пристрою працювати в умовах сильних радіочастотних полів або імпульсів, які можуть виникати при роботі радіопередавачів, електрозварювання, грозових розрядів або високовольтних імпульсних комутацій. Перевіряється не тільки збереження функціональності, а й відсутність неконтрольованого спрацювання або пошкодження електроніки.

Іншими спеціальними випробуваннями є перевірки на стійкість до нестандартних впливів: озону, ультрафіолетового випромінювання, водяної пари високої температури (до 95°C), дії стисненого повітря або навіть вогню. Для деяких типів обладнання проводяться випробування на вогнестійкість згідно з UL 94 або аналогічними стандартами, де визначається здатність матеріалів корпусу не підтримувати горіння після контакту з полум'ям.

У спеціальні тести інколи також включають випробування на знос при забрудненні. Це особливо актуально для апаратів, що експлуатуються в

середовищах із підвищеною концентрацією сірчаних сполук, вугільного пилу, цементу або інших агресивних речовин. Обладнання занурюється в камеру з відповідним середовищем і витримується протягом заданого часу, після чого перевіряється на працездатність, втрату ізоляції, ерозію металевих частин.

Ще одним тестом, який інколи застосовується до вимикачів, особливо серйозних потужних зразків, є перевірка на сейсмостійкість. Суть випробування – відтворення умов, які можуть виникнути під час землетрусу. Для цього пристрої монтують на платформу, що створює коливання у трьох площинах з різною частотою та амплітудою. Обладнання повинне витримати як власне коливання, так і збереження працездатності після його завершення.

В окремих випадках до спеціальних випробувань можна віднести також тести на сумісність з дистанційним керуванням, цифровими протоколами або інтеграцією в системи автоматизації (SCADA (supervisory control and data acquisition – диспетчерське управління і збір даних), ПЛК (програмований логічний контролер) тощо). Тут перевіряється, як апарат реагує на команди по модулю Modbus, Profibus, CANopen, чи не втрачає зв'язок при помилках, чи підтримує резервування каналів та наскільки швидко відновлюється після аварійного обриву зв'язку.

1.6 Висновки до першого розділу 1

У процесі вивчення характеристик пристроїв комутації для низьких, середніх і високих напруг було з'ясовано, що ефективна та надійна робота цих апаратів безпосередньо залежить від точного визначення їхніх основних електричних, механічних, теплових та спеціальних параметрів. Саме ці параметри є визначальними для забезпечення надійності енергосистеми, стабільності роботи обладнання, безпеки обслуговуючого персоналу і зниження витрат на технічне обслуговування.

Ключовими характеристиками, які підлягають обов'язковому контролю та випробуванням, є: електрична міцність ізоляції, комутаційна здатність при коротких замиканнях, термічна та електрична зносостійкість, а також робота електромагнітних приводів. Оцінка цих характеристик дає змогу визначити, чи здатен апарат працювати в умовах реального навантаження без відмов та пошкоджень. Надалі важливим стає визначення механічних характеристик, таких як час спрацювання, хід рухомих частин, рівномірність роботи по фазах і зносостійкість механізмів. Всі ці фактори безпосередньо впливають на швидкодію і стабільність у керуванні мережами.

Теплові випробування, які досліджують ступінь нагріву струмопровідних частин, дають уявлення про здатність апарата працювати в умовах тривалого навантаження. Надмірний нагрів знижує ресурс пристрою і створює ризик аварій, тому контроль температур є критично важливим. Кліматичні та екологічні випробування забезпечують розуміння, чи здатен апарат функціонувати за умов високої вологості, пилу або перепадів температур. Це особливо важливо для обладнання, встановленого в агресивних або відкритих середовищах.

Окреме значення мають спеціальні випробування. Вони демонструють реальну життєздатність пристрою в умовах надзвичайних ситуацій, таких як короткі замикання, імпульсні перенапруги, ударні навантаження, вібрації, вплив електромагнітних перешкод чи дугових розрядів. Без цих перевірок неможливо гарантувати безпечну роботу обладнання у складних енергетичних об'єктах, на підприємствах підвищеної небезпеки або в умовах нестабільного електропостачання.

У підсумку, всі зазначені характеристики є базовими при оцінці придатності комутаційного апарата до експлуатації. Їх чіткий контроль дозволяє забезпечити безаварійну роботу електричних мереж, довготривалу експлуатацію обладнання та високу якість енергозабезпечення. Ці параметри і є головним предметом контролю при проєктуванні, введенні в експлуатацію та під час планових оглядів комутаційних пристроїв.

РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СТЕНДІВ КОНТРОЛЮ ПРИСТРОЇВ КОМУТАЦІЇ

2.1 Стенд SXGK HV/LV Switchgear Panel Testing Bench

Це стаціонарний вимірювально-випробувальний комплекс, призначений для діагностики комутаційного обладнання середнього та високого класу напруги [9]. Основне призначення стенду – здійснення тестування силових вимикачів, комутаційних панелей та допоміжного електрообладнання під напругою в режимах, наближених до реальних умов експлуатації. Блок стабілізованого живлення та високовольтного формувача показаний на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1. Блок стабілізованого живлення та високовольтного формувача SXGK
HV/LV

Основні функціональні можливості стенду:

- випробування електричної міцності ізоляції між полюсами, між фазами та відносно корпусу з подачею змінної напруги до 3 кВ;
- імітація роботи електромагнітів керування (включення, вимкнення, взвод приводу), з вимірюванням струмових характеристик;
- фіксація часу спрацювання контактної групи та механізмів розчеплення;
- вимірювання синхронності фаз, часу брязкоту контактів, різночасності, ходу контактів;
- оцінка ефективності дугогасіння при моделюванні аварійних навантажень;
- аналіз відповідності параметрів вимикача до технічних умов за допомогою програмного забезпечення;
- запис та зберігання результатів тестів із можливістю генерації технічного звіту.

SXGK побудований на базі сталеві шафи з модульною конструкцією та зручною панеллю підключення. Блок керування реалізований на основі вбудованого контролера, що забезпечує автоматизацію циклів випробувань. Всі ключові параметри відображаються на сенсорному дисплеї. Є підтримка дистанційного керування через Ethernet/USB(Universal Serial Bus).

Основні технічні характеристики:

- номінальна напруга живлення: 220 В $\pm$ 10%, 50 Гц;
- напруга випробування ізоляції: до 3 кВ змінного струму;
- максимальний струм електромагнітного керування: 20 А;
- роздільна здатність вимірювання часу: 0,1 мс;
- робочий температурний діапазон: від -10 °С до +45 °С;
- сумісність з вимикачами напругою до 35 кВ;
- порти підключення: RS-485(Recommended Standard), USB, LAN(local area network);

Конструкція стенду включає:

- блок стабілізованого живлення та високовольтного формувача;
- модуль вимірювання часу та синхронізації;
- канали зчитування стану контактів і дискретних входів;
- панель комутації із захисними реле та індикаторами стану;
- інтерфейсна плата для обміну з ПК.

SXGK HV/LV застосовується як у виробничих лабораторіях електротехнічного обладнання, так і у сервісних підрозділах енергокомпаній. Його функціонал забезпечує комплексну діагностику комутаційних пристроїв перед введенням в експлуатацію або після обслуговування.

2.2 Стенд ZC-330 HV/LV Switchgear Test Equipment

Це лабораторний стенд, призначений для перевірки характеристик високовольтного та низьковольтного комутаційного обладнання [10]. Він дозволяє проводити повноцінні електричні та частково механічні випробування апаратів у контрольованих умовах. Стенд реалізує типові режими навантаження та комутації, що необхідні для серійних перевірок вимикачів, контакторів, реле тощо.

Основні функціональні можливості стенду:

- випробування електричної міцності ізоляції шляхом подачі підвищеної напруги постійного та змінного струму;
- визначення часу спрацювання механізмів комутації в режимі включення та відключення;
- фіксація моментів замикання та розмикання по кожній фазі окремо з точністю до мілісекунд;
- вимірювання величин струмів котушки включення, котушки вимкнення, струму взводу пружин;

- оцінка синхронності фаз та контроль різночасності між фазами (А-В-С);
 - реєстрація характеристик дугогасіння при моделюванні короткочасного навантаження;
 - перевірка працездатності дискретних входів та виходів керування.
- Стенд виконано у вигляді шафи на колесах із роз'ємною панеллю та блоком керування (рисунок 2.2).

KvTester
www.kvtester.com



Рисунок 2.2 ZC-330 HV/LV

Технічні параметри:

- вихідна напруга постійного струму: до 2,5 кВ;
- максимальний змінний струм навантаження: до 100 А;
- роздільна здатність вимірювання часу: до 0,1 мс;
- живлення: 220 В, 50 Гц;

- кількість каналів вимірювання: до 8;
- виходи для живлення допоміжних кіл: 24 В DC / 220 В AC;
- захист: автоматичне вимкнення при перевищенні порогів напруги/струму.

Конструктивно стенд складається з наступних функціональних вузлів:

- блок живлення з трансформаторною групою та регулятором напруги;
- вимірювальний блок з аналогово-цифровими перетворювачами;
- модуль синхронізації та зчитування дискретних сигналів;
- панель підключення апаратів до випробувального ланцюга;
- система автоматичного захисту з реле струмового контролю.

Стенд ZC-330 використовується переважно у виробничих лабораторіях, сервісних центрах, а також у навчальних установах для демонстрації принципів комутації та оцінки стану електрообладнання.

2.3 Стенд для тестування HZ2813 High and Low Voltage Switchgear Power-on Test Bench

HZ2813 – це спеціалізований стенд для тестування високовольтних і низьковольтних комутаційних пристроїв шляхом подачі живлення та реєстрації основних робочих характеристик (рис.2.3). Основна мета використання – забезпечення можливості відтворення умов увімкнення та роботи обладнання під напругою з подальшим аналізом динаміки процесів комутації.

Стенд призначений для діагностики силових вимикачів, роз'єднувачів, контакторів та інших апаратів, що використовуються у системах енергопостачання та промислової автоматики. Його конструкція дозволяє

інтеграцію з існуючими технологічними лініями або використання в автономному режимі як універсального випробувального комплексу.



Рисунок 2.3. HZ2813

Основні функції HZ2813:

- подача робочої напруги на об'єкт випробування з автоматичним вимірюванням вхідних та вихідних параметрів;
- зчитування часу включення/відключення фаз окремо, реєстрація миттєвих перехідних процесів;
- фіксація струмів електромагнітів включення, вимкнення та взводу;

- вимірювання механічних характеристик: хід контактів, хід підтискання, час брязкоту контактів, різночасність фаз;
- контроль дискретних сигналів керування (стан входів/виходів).

Технічні характеристики [11]:

- вхідна напруга живлення: 220 В, 50 Гц;
- вихідна напруга для подачі на об'єкт: до 2500 В DC або до 1000 В AC;

- максимальний струм навантаження: до 100 А;
- кількість незалежних фазних каналів: 3 (А, В, С);
- роздільна здатність реєстрації часу: 0,05 мс;

NZ2813 складається з таких основних блоків:

- блок живлення з програмованим регулятором напруги та струму;
- вимірювальний модуль для реєстрації електричних і часових параметрів;
- панель підключення до тестованого обладнання з індикаторами стану;
- блок керування на базі ПЛК (програмований логічний контролер) з сенсорним дисплеєм;
- вбудований модуль збереження та експорту даних.

Програмне забезпечення стенду дозволяє задавати індивідуальні алгоритми тестування, налаштовувати порогові значення для аварійного відключення та формувати графіки параметрів у реальному часі. Сфера застосування стенду охоплює заводські лабораторії, сервісні бригади електротехнічних підприємств, а також науково-дослідні організації, що займаються вивченням параметрів та ресурсів комутаційного обладнання.

2.4 Автоматизований стенд НТКGG-H Portable Automatic High Voltage Switchgear Circuit Breaker Test Equipment

НТКGG-H – це портативний автоматизований стенд для перевірки високовольтних вимикачів, розроблений з урахуванням потреб виїзного технічного обслуговування та оперативного тестування обладнання безпосередньо на місці експлуатації. Основна функція пристрою полягає у проведенні електричних та механічних випробувань силових комутаційних апаратів з фіксацією критичних параметрів та оцінкою їх стану.

Стенд підтримує тестування широкого спектра вимикачів напругою до 35 кВ, включно з тими, що мають пружинно-моторні, електромагнітні або гідравлічні приводи. Його конструкція оптимізована для мобільного застосування – корпус виконаний у вигляді герметичної валізи з ударостійкого пластику з внутрішнім протиударним захистом для електроніки (рис 2.4).

Функціональні можливості НТКGG-H включають:

- вимірювання часу включення та відключення кожної фази окремо (А, В, С);
- аналіз синхронності фаз та визначення різночасності спрацювання;
- реєстрація струмів електромагнітів включення та вимкнення;
- вимірювання механічних параметрів – ходу контакту, ходу підтискання, часу брязкоту контактів;
- зчитування дискретних сигналів – стану кінцевих вимикачів, сигналів захисту;
- підтримка тестування з пружинним взводом – з можливістю подачі напруги на відповідні елементи приводу;
- автоматичне формування звіту із зазначенням усіх ключових результатів вимірювання.



Рисунок 2.4. Мікропроцесорний блок стенду НTKGG-Н

Технічні характеристики пристрою [12]:

- живлення: 220 В $\pm 10\%$, 50 Гц або внутрішній акумулятор;
- кількість каналів вимірювання: 3 (по фазах) + 6 дискретних входів;
- діапазон вимірювання часу: від 0 до 5000 мс з роздільністю 0,1 мс;
- діапазон вимірювання струму: до 30 А.

Управління пристроєм здійснюється через вбудований мікроконтролер з кольоровим графічним дисплеєм. Всі функції доступні через простий інтерфейс із кнопковим або сенсорним введенням. Для збереження результатів передбачено внутрішню пам'ять на 10 000 записів, а також можливість підключення USB-накопичувача.

Додатково пристрій оснащено інтерфейсом зв'язку з ПК через USB або Bluetooth, що дозволяє проводити глибший аналіз результатів, формувати PDF-звіти, експортувати дані до SCADA або інших систем технічного обліку.

НТКGG-Н широко застосовується в аварійно-ремонтних бригадах, на підстанціях, у польових умовах під час введення об'єктів в експлуатацію. Завдяки портативності та функціональності, цей стенд забезпечує швидкий контроль стану вимикачів без необхідності демонтажу або тривалого налаштування.

2.5 Стенд UNV-430 HV/LV Switchgear Electrify Test-bed

Цей стенд використовується на підприємствах з виробництва, ремонту та технічного обслуговування розподільчих пристроїв. Конструкція UNV-430 дозволяє працювати з апаратами напругою до 40,5 кВ, а також з низьковольтними щитами до 1000 В, що робить його придатним для широкого спектра обладнання – від вакуумних вимикачів до автоматів захисту в комірках типу КРУ(комплектний розподільчий пристрій) або НКУ(низьковольтний комплектний виріб) [13] (рис.2.5).

Функціональні можливості UNV-430 включають:

- подачу регульованої напруги (AC/DC) на об'єкт випробування з контролем струму споживання;
- захист від перевантаження та короткого замикання з автоматичним відключенням живлення;
- визначення часу реагування на подану напругу (затримки вмикання, спрацьовування реле, перемикання контактів тощо);
- аналіз стабільності роботи елементів керування та допоміжних схем під навантаженням;
- імітація аварійних режимів (наприклад, імпульсний підйом напруги, зміна частоти живлення);

- можливість підключення до пристроїв з різними типами приводів
- електромагнітними, моторними, гідравлічними;
- контроль фазності, послідовності фаз та оцінка симетрії напруги; окрема шина заземлення з контролем опору контуру.



Рисунок 2.5. UHV-430 HV/LV

Технічні параметри:

- вхідна напруга живлення: 380 В, 50 Гц;
- вихідна напруга (AC): 0–1000 В;
- вихідна напруга (DC): 0–2500 В;
- струм навантаження: до 200 А (AC), до 50 А (DC);
- частота: 50/60 Гц (регульована);
- кількість фаз: 3 (з індикацією кожної окремо);
- система охолодження: активна, вентиляторна.

UHV-430 дозволяє проводити серії випробувань із повторюваними циклами: наприклад, періодична подача та відключення напруги для оцінки зносостійкості допоміжної логіки або релейних схем. Також присутня функція

збереження налаштувань для типових тестів, що значно пришвидшує роботу з однотипним обладнанням.

2.6 ПКВ/М7 USB-прилад контролю вимикачів

ПКВ/М7 – портативний прилад для безрозбірного контролю високовольтних комутаційних апаратів, призначений для перевірки масляних, вакуумних, елегазових та електромагнітних вимикачів. Внутрішнє компонування включає модуль живлення, датчики для лінійного та кутового ходу, силовий комутатор для подачі струму електромагніту, процесор керування, графічний LCD-дисплей 320×240 точок, портативну елементарну клавіатуру та інтерфейсні роз'єми USB (рис.2.6).



Рисунок 2.6. ПКВ/М7

Функціональні можливості:

- контроль часових характеристик;
- облік переміщень за допомогою датчиків;

- вимірювання швидкості руху контактів вимикача;
- контроль електричних параметрів приводу;
- графічний аналіз та метрологічна перевірка.

Технічні характеристики пристрою:

- Часовий діапазон реєстрації: 0,001–5,2 с;
- Лінійний хід (ДП12): 1–900 мм, дискретність 0,5 мм;
- Кутовий хід (ДП21) 0,09°–360°, роздільність 0,09°;
- Струм комутації: до ± 14 А;
- Оперативна напруга: до ± 350 В;
- Аналоговий вхід: 0–12 В, ± 6 В або 0–2500 Ω ;
- Інтерфейси: USB.

Типовим прикладом використання є оперативний контроль параметрів комутаційних апаратів під час технічного обслуговування або аварійних виїздів. Без складного монтажу або демонтажу прилад швидко підключається до вимикача відповідно до стандартної схеми [14].

2.7 Висновок до другого розділу

У цьому розділі було розглянуто п'ять сучасних стендів для контролю та випробувань високовольтних і низьковольтних комутаційних пристроїв: SXGK HV/LV, ZC-330, HZ2813, НТКGG-Н і UHV-430. Кожен із них має свої переваги й особливості реалізації, що дозволяє використовувати ці системи у різноманітних умовах – від стаціонарних лабораторій до виїзного тестування на підстанціях. Проте детальний аналіз технічних характеристик, функціональних можливостей та конструктивних рішень дозволив виявити низку суттєвих недоліків, які об'єктивно обмежують можливості використання таких стендів в умовах обмеженого бюджету, обмеженого простору чи потреби в мобільності та гнучкості.

Перш за все, слід відзначити критично високу вартість переважної більшості згаданих стендів. Такі комплекси як SXGK HV/LV, ZC-330 та UHV-430 є промисловими високотехнологічними системами, що включають у свій склад безліч спеціалізованих модулів, трансформаторів, ПЛК-контролерів, панелей керування та вбудованих мікропроцесорів. Відповідно, їх вартість може сягати десятків тисяч доларів США. Це ставить під загрозу їх придатність для малих лабораторій, навчальних закладів чи мобільних сервісних підрозділів, які працюють із обмеженим фінансуванням. Така вартість суттєво ускладнює масштабування чи повторне використання обладнання в декількох регіонах одночасно, адже навіть одна система є значним капіталовкладенням.

Другим, не менш критичним недоліком більшості наявних стендів є їх габаритність та стаціонарне виконання. Так, SXGK HV/LV, ZC-330 та UHV-430 мають шафову конструкцію, що потребує окремого приміщення або принаймні значної площі для розгортання. Це автоматично обмежує їх застосування на об'єктах, де фізично немає достатньо місця, або в умовах виїзного обслуговування, де необхідна портативність. Навіть у випадках, коли стенд встановлений на колесах (як ZC-330), його загальна маса та розміри не дозволяють оперативно транспортувати систему між об'єктами без залучення спецтранспорту. Це суперечить сучасним тенденціям у галузі діагностики електрообладнання, що передбачають гнучке й адаптивне тестування в реальному часі та безпосередньо на місці експлуатації.

Окремо слід наголосити на відсутності зручних засобів підключення до комп'ютера або цифрової обробки даних у деяких моделях, зокрема в старіших або спрощених версіях стендів. Наприклад, хоча SXGK HV/LV і НТКGG-Н мають порти USB або Ethernet, функціонал роботи з ПК не завжди інтуїтивний або достатньо гнучкий. У деяких випадках користувачі обмежені лише базовим виводом звітів без можливості глибокого аналізу або інтеграції з SCADA-системами чи базами даних підприємства. Це суттєво знижує потенціал таких стендів у контексті цифровізації обліку та діагностики. Більше того, обмежена

комп'ютерна інтеграція ускладнює створення архівів тестувань, знижує простоту уніфікації результатів та їх подальшої автоматизованої обробки.

Ще один важливий аспект, який варто згадати – це надлишковість функціоналу для окремих категорій користувачів. У багатьох випадках лабораторіям або сервісним групам не потрібен весь спектр можливостей, які реалізовані в таких системах. Наприклад, автоматичний аналіз дугогасіння чи реєстрація механічного ходу контактів із точністю до мікросекунд є актуальними лише для серйозних випробувальних лабораторій або НДІ. Для типового сценарію експлуатації у виробничій електротехнічній дільниці достатньо вимірювання часу спрацювання, величини струмів котушок та реєстрації дискретних сигналів. Таким чином, наявні стенди стають надто складними та важкими в освоєнні, не кажучи вже про їх обслуговування, калібрування чи модернізацію.

Слід також відзначити, що портативні рішення, такі як НТКGG-Н, хоч і позбавлені більшості вищезгаданих недоліків, мають свої обмеження – зокрема, обмежену кількість каналів вимірювання, залежність від ємності акумулятора, меншу точність та чутливість порівняно зі стаціонарними аналогами. Деякі функції, такі як моделювання навантажень чи автоматичне дугогасіння, в таких приладах недоступні. Крім того, НТКGG-Н хоча й підтримує підключення до ПК, проте залежить від специфічного програмного забезпечення, сумісність якого з сучасними системами іноді викликає труднощі.

На фоні вищенаведених недоліків стає очевидним, що існує потреба у створенні нового стенду, який би поєднував у собі портативність, достатній функціонал для базового та розширеного тестування, можливість інтеграції з ПК, простоту експлуатації, помірну вартість та невеликі габарити. Саме таким і є підхід до розробки нового стенду, який пропонується в рамках цієї дипломної роботи. Наш стенд має на меті стати своєрідним компромісом між громіздкими, дорогими промисловими системами та спрощеними мобільними приладами. Він буде оснащений необхідним набором вимірювальних каналів для роботи з трьома фазами, мати підтримку зчитування дискретних сигналів, здійснювати

вимірювання часу спрацювання, реєстрацію струмів котушок та зберігання результатів із можливістю передачі даних до ПК. При цьому буде забезпечено сумісність із популярними інтерфейсами обміну даними (USB, UART), а сам пристрій матиме компактну модульну конструкцію, яку можна легко інтегрувати у будь-яке середовище – як стаціонарне, так і мобільне.

Більше того, використання сучасних мікроконтролерів із розширеним функціоналом дозволяє реалізувати алгоритми обробки сигналів без потреби у додаткових обчислювальних блоках, що зменшує вартість розробки. Завдяки цьому новий стенд буде доступним для проєктів з малим бюджетом, у тому числі для використання у навчальному процесі, виїзних технічних перевірок та на малих підприємствах. Він забезпечить базові функції контролю стану апаратів без надлишкових функцій, які підвищують вартість промислових аналогів, але практично не використовуються в польових умовах.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ СТЕНДУ ТА ПРОГРАМИ ДЛЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ

3.1. Функціональна схема стенду контролю вакуумних вимикачів

Розглянемо функціональну схему стенду контролю стану вакуумних вимикачів представлену на рисунку 3.1.

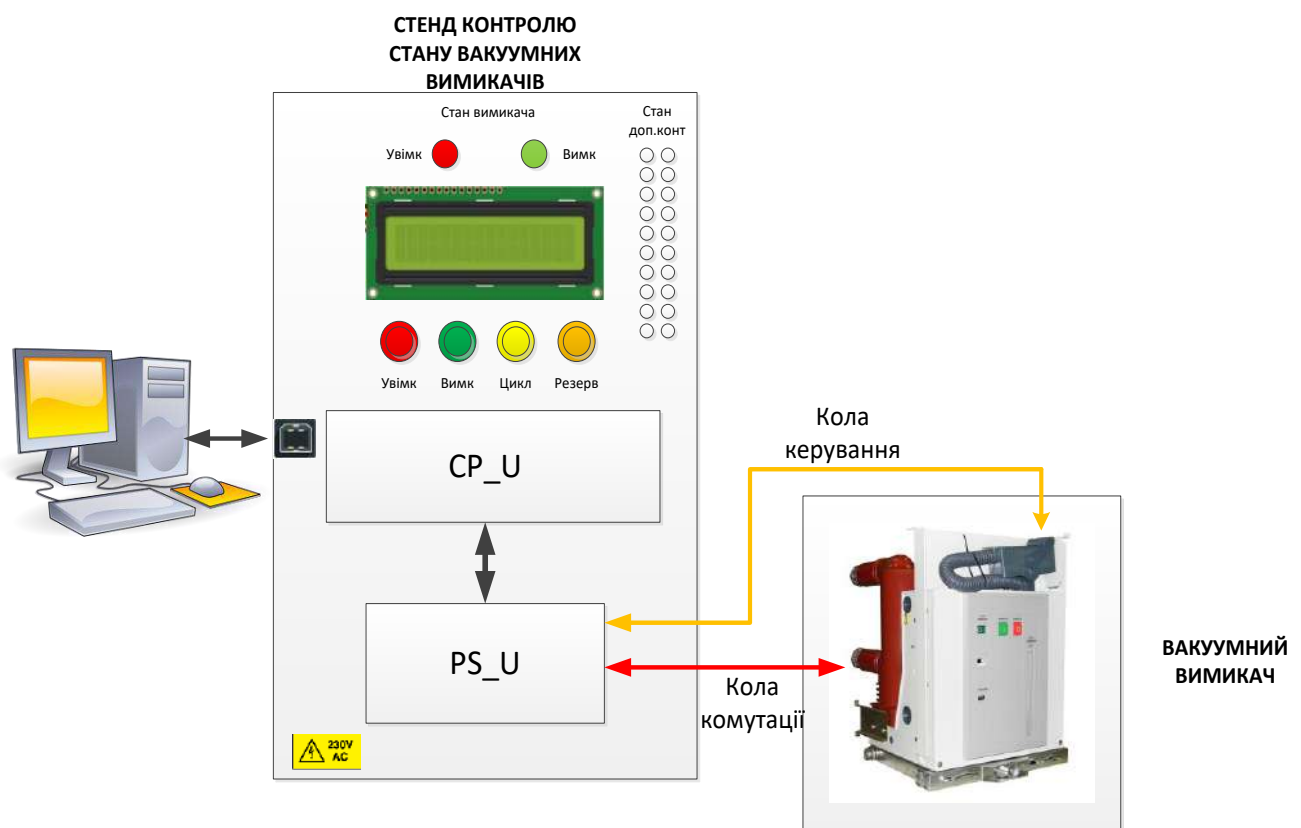


Рисунок 3.1. Функціональна схема стенду контролю вакуумних вимикачів

Основою стенду є мінімізований за розмірами модуль вимірювання та керування.

Він складається з наступних елементів:

- корпусу;
- процесорного модулю керування, вимірювання та зв'язку (CP_U);
- модулю живлення та високої напруги (PS_U);
- рідкокристалічного дисплею;

- кнопок керування;
- світлової індикації;
- джгутів керування та вимірювання вакуумним вимикачем;
- USB-кабелем (для зв'язку з ПК).

Стенд живиться від мережі 230В 50Гц, що надходить на модуль PS_U, на виході якого формується група напруг, що застосовується як для живлення модулю керування, вимірювання та зв'язку, так і для формування сигналів керування вакуумним вимикачем, а також для світлової індикації стану його додаткових блок контактів.

Модуль керування, вимірювання та зв'язку виконує основні операції керування процесом тестування відповідно до вибраного у програмі випробування, контролем та вимірюванням параметрів вакуумного вимикача, індикацією стану його контактів та результатів вимірювання. Крім того, за допомогою програми верхнього рівня, є можливість через USB кабель здійснювати усі операції керування стендом людиною-оператором, та виводити на екран персонального комп'ютера результати вимірювання, зберігати їх у файлі та формувати протоколи випробувань для звітності.

Безпосередньо команди керування вакуумних вимикачем у виді електричної напруги змінної або постійної надходять за допомогою джгута керування та вимірювання. При цьому на стенді стан вимикача відображається відповідною світловою індикацією (червоний світлодіод - увімкнений, а зелений - вимкнений вакуумний вимикач). Для контролю стану додаткових контактів вакуумного вимикача передбачена окрема кольорова індикація окремо для кожного із контактів.

Для виконання високовольтних випробувань у платі модулю живлення та високої напруги передбачений помножувач напруги.

Основними випробуваннями які забезпечуються стендом є наступні:

- Контроль струмів та напруг соленоїдів увімкнення та вимкнення
- Час відпрацювання команди увімкнення/вимкнення
- Одночасність замикання контактів по фазам

- Контроль брязкоту контактів
- Контроль витоку через негерметичність вакуумної камери

3.2. Побудова принципової схеми стенду

3.2.1. Розробка процесорного модулю керування, вимірювання та зв'язку (CP_U)

Процесорний модуль керування, вимірювання та зв'язку (CP_U) (додаток А) складається з кількох функціональних блоків, кожен з яких виконує конкретну задачу: обчислення, вимірювання електричних параметрів, передача даних, гальванічна розв'язка, індикація, формування живлення та керування виконавчими пристроями. Основним елементом плати є мікроконтролер STM32F303RET6 [15] у корпусі LQFP64, який виконує обробку даних з вимірювальних модулів, керує передачею інформації, здійснює цифрову обробку сигналів та керує іншими компонентами системи. Він працює на частоті до 72 МГц, має 4 АЦП(аналогово - цифровий перетворювач), апаратний I2C(Integrated Circuit), SPI(Serial Peripheral Interface), UART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) та DMA(Direct Memory Access)-контролер. На платі передбачено підключення до I2C-пристроїв та UART-порту для зв'язку з комп'ютером або зовнішніми модулями.

Живлення STM32 здійснюється від стабілізатора AMS1117CD-3.3 [16], який знижує напругу з 5 В до 3.3 В. Він розміщений поблизу мікроконтролера та має вхідні й вихідні шунтувальні конденсатори ємністю 10 мкФ для згладжування пульсацій.

Для зв'язку з комп'ютером використовується мікросхема FT232RL [17], яка реалізує перетворення USB ↔ UART. USB-роз'єм типу USB_B підключається до входу FT232RL, а його вихід – до UART мікроконтролера. До живлення FT232RL також підключені фільтрувальні конденсатори на 100 нФ та

1 мкФ. Для стабільної роботи USB необхідно підключення кварцового резонатора на 12 МГц, який підключений до ніжок OSC_IN і OSC_OUT. До нього приєднано два конденсатори ємністю 22 пФ, які з'єднані з землею. Якщо використовується HSE-режим, це дозволяє досягти максимальної тактової частоти для обробки великого обсягу даних з високою точністю.

Вимірювання електричних параметрів здійснюється за допомогою інтегрального модуля ACS37800KMACTR-030B3-I2C [18], що забезпечує одночасне вимірювання струму, напруги, активної потужності, енергії та температури. Комунікація з мікроконтролером відбувається через інтерфейс I2C. На платі передбачено підключення до ліній SCL(Serial Clock Line) і SDA(Serial Data Line) через резистори підтяжки 4.7 кОм. Сигнали напруги формуються через дільники.

Для забезпечення гальванічної розв'язки між мікроконтролером та високовольтними ланцюгами використано оптопари TLP292 і TLP292-4. Вони використовуються для передачі сигналів стану виконавчих пристроїв (наприклад, реле) або зчитування зовнішніх входів. Аноди і катоди світлодіодів оптопар підключено через супресори та запобіжники для запобігання перенапруг. На виході фототранзистора передбачено підтягуючий резистор 10 кОм.

На платі також передбачено реле типу FRT5, яке комутує вмикання та вимикання високовольтних вимикачів. Управління реле здійснюється через TLP292, що керується з виходу зсувного регістра. Для запобігання високовольтним імпульсам індукції використовується діод шунтування (flyback diode) 1N4007 або аналогічний.

Для зчитування частоти, періоду або інших характеристик синусоїдальних сигналів передбачено аналогові входи, підключені до внутрішніх АЦП STM32. Входи захищено через дільники напруги та обмежувальні діоди. У разі перевищення порогу вхідна напруга спрямовується до шини живлення через супресор.

Джерела живлення для аналогової частини позначені як +5VA та GNDA. Ці шини не з'єднані безпосередньо з цифровими лініями +5V і GND для

зменшення рівня шуму та перешкод. Всі лінії живлення мають локальні шунтуючі конденсатори 100 нФ, розміщені якомога ближче до ніжок мікросхем.

Також на платі присутній рідкокристалічний дисплей LCD2004A (20x4), який працює в 4-бітному режимі. Лінії RS, E, D4-D7 підключені до 74AHC595 [19]. Його входні лінії (SER, SRCLK, RCLK) підключаються до виводів SPI інтерфейсу мікроконтролера. Дисплей використовується для локального відображення інформації про вимірювання, стан системи, повідомлення про помилки.

3.2.2. Розробка модулю живлення та високої напруги (PS_U)

Модуль живлення та високої напруги (PS_U) (додаток В) забезпечує всі електронні модулі необхідними стабілізованими напругами та гарантує безпеку роботи як самої системи, так і персоналу. Виходячи з функціонального призначення стенду, до плати живлення висуваються наступні вимоги: можливість роботи від мережі змінного струму 230 В, наявність ізольованих гілок живлення для цифрових та аналогових модулів, захист від короткого замикання та перенапруги, можливість отримання декількох напруг, а також електрична ізоляція від зовнішніх навантажень.

Схема живлення передбачає три окремих вузли:

- перший вузол – основне живлення логіки та вимірювальних модулів;
- другий вузол – живлення імітаційних кіл та зовнішніх ланцюгів тестованого об'єкта;
- третій вузол – вузол формування високої напруги.

Живлення організовано з урахуванням потреб у стабільних рівнях 5 В для логічних елементів, а також лініях 36 В, 110 В і 220 В – для живлення електромагнітів (соленоїдів) увімкнення та вимкнення вакуумного вимикача. Ці високі напруги формуються за допомогою силового трансформатора, що має декілька вторинних обмоток з відповідними номіналами. Після трансформатора напруга проходить випрямлення на діодних мостах, фільтрацію за допомогою

електролітичних конденсаторів великої ємності та подається на навантаження або комутаційні елементи.

Імпульсний блок живлення (ІБЖ), інтегрований у модуль PS_U, призначений для забезпечення стабільної напруги 5 В та додаткових рівнів для живлення логічної частини та допоміжних елементів. Основу ІБЖ складає мікросхема типу TNY287 [20] або її аналог, яка реалізує топологію flyback-конвертера з гальванічною розв'язкою. Перевагою такого рішення є компактність, високий ККД, зниження нагріву та стабільна робота при широкому діапазоні вхідних напруг. Після перетворювача вихідна напруга додатково фільтрується конденсаторами. Також передбачено зворотний зв'язок через опорне джерело на TL431, що забезпечує точну стабілізацію напруги навіть при змінному навантаженні.

Третій функціональний вузол – це високовольтний каскад, реалізований у вигляді помножувача напруги на основі діодів та конденсаторів (схема Кокрофта-Вальтона). Цей вузол використовується для проведення тестів електричної міцності ізоляції, а також непрямої перевірки герметичності вакуумної камери вимикача. Помножувач дозволяє формувати напругу у діапазоні до кількох кіловольт, яка контролюється мікроконтролером через відповідні дільники та захисні ланцюги.

Для підключення до інших частин стенду на платі реалізовано декілька роз'ємів: окремо для подачі живлення на логічну плату, окремо – для живлення соленоїдів і зовнішніх навантажень.

3.3 Розробка програми керування мікроконтролером

Програмне забезпечення (додаток С), реалізоване на мікроконтролері STM32F303RET6, виконує функцію керування та моніторингу стану випробувального стенду. Основне завдання мікроконтролера – ініціація дій на

основі вхідних сигналів, обробка даних з аналогових та цифрових сенсорів, а також взаємодія з периферією та зовнішніми пристроями. У запропонованій реалізації ядро програми зосереджене у файлі `main.c`, де розміщено конфігурацію апаратних модулів, цикл обробки подій, а також реалізовані функції обробки переривань і зворотного зв'язку.

На першому етапі, після запуску мікроконтролера, викликається функція `HAL_Init()`, що ініціалізує HAL-бібліотеку, налаштовує пріоритети системних переривань та готує контролер до подальшої роботи. Одразу після цього викликається функція `SystemClock_Config()`, де задаються параметри роботи вбудованих осциляторів, а також налаштовуються тактові частоти для шин АНВ, APB1, APB2. У поточній реалізації за джерело PLL вибрано зовнішній кварцовий генератор HSE, що дозволяє досягти стабільної тактової частоти для всієї системи.

Наступним етапом виконується ініціалізація всіх периферійних модулів: GPIO, DMA, USART2, ADC2 та I2C2. У функції `MX_GPIO_Init()` виконується налаштування напрямку, режимів та рівнів підтягування для всіх використаних в системі пінів. Зокрема, налаштовано пін `COIL_Pin` як цифровий вихід – саме він використовується для подачі живлення на керуючу обмотку вимикача. Крім того, піни `ON_Pin` та `OFF_Pin` налаштовані на ініціацію переривань по спадаючому фронту, що дозволяє фіксувати натискання кнопок керування запуском або зупинкою випробування.

Модуль DMA використовується для передачі даних від ADC2 до оперативної пам'яті без участі ядра процесора. Це дозволяє зменшити навантаження на CPU та забезпечити точну та швидку обробку результатів аналого-цифрового перетворення. Ініціалізація USART2 передбачає налаштування параметрів UART для обміну з ПК – зокрема, швидкість 38400 бод, 8-бітна послідовність без парності, 1 стоп-біт. Це дозволяє здійснювати прийом та передачу даних до вищого рівня, наприклад, до ПЗ оператора на ПК.

ADC2 налаштований на роботу у безперервному режимі з 12-бітною роздільною здатністю. Відбір з одного каналу (`ADC_CHANNEL_1`) відбувається

циклічно через DMA, а результат зберігається у масив `adc`. Таким чином, програма постійно має доступ до масиву актуальних значень, отриманих із вхідного аналогового сигналу, що дозволяє зчитувати інформацію з датчиків струму, напруги або будь-яких аналогових сенсорів.

У структурі коду реалізовано кілька користувацьких функцій. Зокрема, функція `Buttons()` виконує опитування стану пінів `ON` та `OFF`, і відповідно виставляє логічні прапори `b_ON` та `b_OFF`, які використовуються у подальших логічних умовах. Це дає змогу простим способом визначати, яку дію має виконати система – включити або вимкнути випробуваний пристрій.

Обробка переривань реалізована у двох функціях: `HAL_GPIO_EXTI_Callback()` та `HAL_ADC_ConvCpltCallback()`. Перша з них реагує на зміну стану кнопок. Якщо активним є прапор `b_ON`, то мікроконтролер проводить калібрування ADC, запускає процес зчитування через DMA та активує керуючу обмотку, подаючи логічну «1» на пін `COIL_Pin`. Аналогічно, якщо активний `b_OFF`, подається логічна «0», що вимикає пристрій. У такий спосіб реалізується керування перемиканням станів високовольтного вимикача.

Функція `HAL_ADC_ConvCpltCallback()` викликається після завершення заповнення буфера `adc`, зупиняє перетворення ADC і встановлює прапор `flag`, що дозволяє у головному циклі (`main while`) реагувати на завершення циклу вимірювання. У тілі циклу `while(1)` основна частина логіки полягає у виклику `Buttons()` та обробці прапора `flag`. Якщо перетворення завершене, прапор скидається, і зупиняється DMA. Таким чином, керування перетворенням є цілком подійно-орієнтованим.

Окрему увагу варто приділити структурі ініціалізації та точності коду. Ініціалізація ADC включає калібрування, вибір частоти семплювання, режим одноканального зчитування, внутрішнє вирівнювання та конфігурацію DMA. Усі ці дії критично важливі для точного вимірювання фізичних параметрів.

Модуль `I2C2` у цьому прикладі поки не використовується явно у коді, проте він ініціалізований для подальшої роботи з енергоміром `ACS37800` або аналогічним пристроєм, що забезпечує зчитування струму, напруги та активної

потужності. Таке завчасне включення дає змогу розширити функціональність у наступних версіях ПЗ без модифікації системних викликів. Інші функції, закладені у схемах стенду, також передбачено реалізувати у подальших ітераціях програмного забезпечення, відповідно до розширення функціональності апаратної частини.

Програма є чітко структурованою, з чітким розділенням ініціалізаційної частини, головного циклу, обробників переривань та користувацьких функцій. Застосування DMA та апаратних таймерів знижує навантаження на ядро, що дозволяє збільшити надійність та швидкодію у процесі вимірювання параметрів електричних сигналів. Код демонструє типову архітектуру керування для стендів, де необхідно оперативно перемикаєти режими роботи, зчитувати дані з сенсорів та передавати результати на зовнішні системи контролю. Крім того, у наступних версіях передбачається реалізація додаткових підсистем, зокрема, підтримка збереження логів, розширений протокол обміну з ПК, контроль температурних параметрів, цифрова фільтрація вимірюваних сигналів, адаптація інтерфейсу під різні типи вимикачів та можливість оновлення прошивки через інтерфейс UART або I2C. Ці розширення дозволять зробити систему гнучкішою, адаптивною та придатною для використання в широкому спектрі лабораторних та польових умов.

3.4 Висновок до третього розділу

У цьому розділі докладно описується створення комплексного випробувального стенду для контролю стану вакуумних вимикачів. Цей стенд є мінімізованим за розмірами модулем вимірювання та керування, що складається з кількох ключових елементів: корпусу, процесорного модуля керування, вимірювання та зв'язку (CP_U), модуля живлення та високої напруги (PS_U), рідкокристалічного дисплея, кнопок керування, світлової індикації, джгутів

керування та вимірювання вакуумним вимикачем, а також USB-кабелю для зв'язку з персональним комп'ютером.

Модуль живлення та високої напруги (PS_U) забезпечує стабільне живлення всіх електронних модулів, формуючи групу напруг для CP_U, сигналів керування вакуумним вимикачем та світлової індикації. Він живиться від мережі 230В 50Гц і розроблений з урахуванням вимог до стабільності, захисту від короткого замикання та перенапруги. PS_U включає три окремі вузли: основне живлення логіки, живлення імітаційних кіл та зовнішніх ланцюгів, а також вузол формування високої напруги. Для цього використовуються силовий трансформатор, діодні мости та електролітичні конденсатори. Особливе значення має інтегрований імпульсний блок живлення на мікросхемі TNY287, що забезпечує стабільну напругу 5 В з високим ККД та компактністю. Високовольтний каскад реалізований у вигляді помножувача напруги (схема Кокрофта-Вальтона), що дозволяє формувати напругу до кількох кіловольт для тестів електричної міцності ізоляції та перевірки герметичності вакуумної камери.

Процесорний модуль керування, вимірювання та зв'язку (CP_U) є основою системи, виконуючи обчислення, вимірювання електричних параметрів, передачу даних, гальванічну розв'язку, індикацію та керування виконавчими пристроями. Його основним елементом є мікроконтролер STM32F303RET6, який працює на частоті до 72 МГц і оснащений чотирма АЦП, апаратними I2C, SPI, UART та DMA-контролерами. Живлення мікроконтролера здійснюється від стабілізатора AMS1117CD-3.3. Для зв'язку з комп'ютером використовується мікросхема FT232RL, яка перетворює USB на UART. Вимірювання електричних параметрів забезпечується інтегральним модулем ACS37800KMACTR-030B3-I2C, що дозволяє одночасно вимірювати струм, напругу, активну потужність, енергію та температуру через інтерфейс I2C. Для гальванічної розв'язки між мікроконтролером та високовольтними ланцюгами використовуються оптопари TLP292 і TLP292-4. Також передбачено реле FRT5 для комутації високовольтних вимикачів, кероване через TLP292.

Рідкокристалічний дисплей LCD2004A забезпечує локальне відображення інформації.

Програмне забезпечення, реалізоване на мікроконтролері STM32F303RET6, відповідає за керування та моніторинг випробувального стенду, обробку даних із сенсорів та взаємодію з периферією. Ядро програми розміщене у файлі main.c, де налаштовані апаратні модулі, цикл обробки подій та реалізовані функції переривань. Програма включає ініціалізацію HAL-бібліотеки, налаштування системних тактових частот з використанням зовнішнього кварцового генератора HSE, а також ініціалізацію периферійних модулів: GPIO, DMA, USART2, ADC2 та I2C2. DMA використовується для передачі даних від ADC2 до оперативної пам'яті, зменшуючи навантаження на процесор. ADC2 налаштований на безперервний режим з 12-бітною роздільною здатністю, а зчитування відбувається циклічно через DMA. Реалізовано функції для опитування кнопок керування та обробки переривань, що дозволяє керувати увімкненням/вимкненням пристрою та реагувати на завершення циклу вимірювання. Хоча I2C2 поки не використовується явно, він ініціалізований для подальшої роботи з енергоміром.

Таким чином, розроблений стенд є багатофункціональним і надійним інструментом для контролю стану вакуумних вимикачів, здатним виконувати низку важливих випробувань, таких як контроль струмів та напруг соленоїдів, час відпрацювання, одночасність замикання контактів, контроль брязкоту та витоку через негерметичність вакуумної камери. Система має чітку архітектуру, як апаратну, так і програмну, з акцентом на точність вимірювань, безпеку (гальванічна розв'язка) та можливість подальшого розширення функціональності, що робить її гнучкою та адаптивною для використання в лабораторних та польових умовах. Можливість зв'язку з ПК дозволяє оператору віддалено керувати стендом, зберігати результати та формувати протоколи випробувань.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Техніка безпеки під час монтажу електричних машин

В даній дипломній роботі розроблена електронна система частотного керування. У якості навантаження використовується асинхронний 3-х фазний двигун змінного струму, який є джерелом підвищеної небезпеки.

Приміщення, в якому відбувається монтаж електричних машин, звільняють від будівельного сміття і забезпечують достатню освітленість. Усі ніші в перекриттях, канали в підлогах на час монтажу забивають тимчасовими щитами.

У машинних приміщеннях чітко визначають межі монтажних майданчиків, розрахованих на вагу машин, які тут монтуватимуться. Усі піднімальні пристрої повинні мати відповідний паспорт.

При користуванні електрифікованим інструментом, зварювальними трансформаторами і машинами необхідно забезпечити надійне заземлення їх частин, які можуть виявитися під небезпечною напругою. Місця для зварювання слід огорожувати металевими щитами.

Роботи організовують так, щоб запобігти одночасному їх виконанню на різних висотах. Крім загальних заходів, що забезпечують безпеку обслуговуючого персоналу при виконанні робіт, слід дотримуватися таких заходів безпеки: не залишати піднятими вантажі, конструкції, обладнання; не переміщувати, піднімати і встановлювати щити, блоки, магнітні станції без вживання заходів, які б запобігли їх перевертанню; не прикріпляти стропи, троси і канати за ізолятори, контактні деталі або отвори в лапах; уважно стежити за сигналами, що подаються.

При допуску до роботи в діючих електротехнічних пристроях до і вище 1000 В і роботі на висоті кожний монтажник проходить медичний огляд та перевірку знань правил техніки безпеки та технічної експлуатації

електроустановок у відповідній комісії, про що йому видається посвідчення з певною групою допуску. Він повинен не тільки знати, але й практично засвоїти методи надання першої допомоги при нещасних випадках, пов'язаних з ураженням електричним струмом.

Робоче місце має бути огорожене і достатньо освітлене, а в місцях, де є небезпека попадання під напругу, повинні висіти плакати «Стій, небезпечно для життя», «Під напругою, не торкатись», «Працювати тут» і т.д. На робоче місце категорично забороняється допускати сторонніх осіб.

При виконанні налагоджувальних робіт під напругою, керівник групи оформляє допуск до роботи і перевіряє наявність умов, що створюють безпечність проведення робіт.

4.2 Техніка безпеки при експлуатації електропривода

Перед тим, як розпочати будь-яку роботу з обслуговування електропривода, перевіряють стан захисного заземлення. У тому випадку, коли роботу дозволено виконувати лише при знятій напрузі, наявність її на електроприводі перевіряють за допомогою показника напруги.

При огляді елементів працюючого електропривода не слід наближатися до струмопровідних частин електроустановки. Потрібно пам'ятати, що небезпека, зумовлена порушенням правил техніки безпеки, при обслуговуванні електроприводів зростає в цехах, які належать до категорії з «підвищеною небезпекою» і «особливо небезпечні».

Без зняття напруги з електроустановки, але з дотриманням заходів безпеки при експлуатації, можна виконувати чищення і обтирання корпусів електрообладнання, доливання масла в підшипники електродвигунів, заміну запобіжників.

Ремонтні роботи в електродвигунах, а також заміну плавких вставок відкритого типу, дозволяється виконувати одній особі після попереднього відімкнення двигуна чи апарата від джерела живлення не менше як у двох місцях вимикачем, зі зняттям запобіжників. Щоб запобігти помилковій подачі напруги, персонал, що виконав відімкнення, повинен вивісити попереджувальний плакат «Не вмикати — працюють люди!» на ручках відімкнених апаратів, за допомогою яких може бути подано напругу. По закінченні робіт плакати знімають. В інших випадках ремонтні роботи слід виконувати двома способами.

Ручне керування пусковими пристроями, що мають відкриті струмопровідні частини, виконують у діелектричних рукавицях. У сирих приміщеннях перед пусковими пристроями кладуть ізолюючі підкладки. Проведення роботи в колі реостата під час обертання електродвигуна, можливе тільки при піднятих щітках або повністю виведеному реостаті. Цю роботу виконують у діелектричних рукавицях або інструментом з ізольованою ручкою, стоячи на гумовому килимку.

Якщо електродвигун тривалий час працює з підвищеною вібрацією, що шкідливо для здоров'я обслуговуючого персоналу, то цей недолік слід усунути. Залежно від призначення і застосування попереджувальні плакати ділять на застережливі, заборонні, дозволяючі, нагадуючі, постійні й переносні. Для установок напругою до 1000 В застосовують плакати: застережливі — «Під напругою! Небезпечно для життя!», «Стій! Небезпечно для життя!»; заборонні — «Не вмикати працюють люди!», «Не вмикати — робота на лінії!»; нагадуючі — «Заземлення!».

4.3 Аналіз умов праці

4.3.1 Організація робочого місця

Вихідним елементом будь-якого підприємства є робоче місце, в межах якого відбувається цілеспрямована діяльність (тобто праця) конкретного працівника. Продуктивність його праці залежить багато в чому від правильної організації робочого місця.

Вибір приміщення визначається виходячи з кількості співробітників і норм обсягу й площі на одну людину.

Вимоги щодо виробничих приміщень відображені в ДНАОП 0.00-1.31-99 і ДсанПіН 3.32-007-98. Виробничі приміщення для роботи із ВДТ повинні відповідати СніП 2.09. 02-85 «Виробничі будівлі», СніП 2.01.02-85 «Виробничі будівлі» та іншими нормативними документами.

В даному розділі будемо розглядати умови роботи інженера з технічного обслуговування (ТО) та ремонту радіоелектронної (РЕА) та електротехнічної (ЕТА) апаратури. Визначимо площу й об'єм приміщення, виходячи з даних:

1. Довжина приміщення $L=7,35$ м.
2. Ширина приміщення $D=4,90$ м.
3. Висота приміщення $H=3,75$ м.
4. Загальна площа приміщення $S=Lx=7,35x4,90=36,0$ м²
5. Об'єм кімнати $V=S*H=50*3,75=187,5$ м³

Так як число співробітників у приміщенні 2, то очевидно можна розрахувати площу й об'єм приміщення на одного співробітника. Відповідно, одержимо 18 м² і 67,5 м³.

Порівняємо тепер нормативні й фактичні значення параметрів приміщення й місця робітника. Вимоги по ШДР до виробничих меблів на робочих місцях визначається ДНАОП 0.00-1.31-99. Проаналізувавши отримані дані можна зробити висновок, що робоче місце відповідає нормам.

4.3.2 Мікроклімат виробничих приміщень

Мікроклімат робочих приміщень – це клімат внутрішнього середовища цих приміщень, що визначається діючої на організм людини з'єднанням вологості, температури, швидкості переміщення повітря.

На період проведення аналізу приміщення температура становила 22°C, а відносна вологість – 46%, швидкість повітря 0,1 м/с. Ці параметри задовольняють вимоги до робочого місця на холодний період року для даного приміщення (ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ «Мікроклімат промислових приміщень»).

4.3.3 Шкідливі речовини в повітрі робочої зони

У повітрі надлишкових забруднень та ШДР нема, малі забруднення людьми, папером, пилом. Всі зазначені речовини не перевищують середньодобової норми.

4.3.4 Виробниче освітлення

Вимоги до освітлення та візуального сприймання інформації працівниками при читанні документів та ремонті апаратури різні. Надто низький рівень освітленості погіршує сприймання інформації при читанні документів, а надто високий до швидкого втомлення очей.

Робоче місце інженера з обслуговування РЕА та ЕТО обладнання розташоване так, щоб в поле зору не потрапляли вікна або освітлювальні прилади.

Вид виробничого освітлення в приміщенні сумісний, оскільки в приміщенні є: бічне природне освітлення (вікно: висота 2,0 м, ширина 3,0 м,) та загальне штучне освітлення (три світильники розташовані на стелі, *EAE 23701 SU2 2 TLD36U SP CP*).

Природне освітлення сприятливо впливає на організм у цілому, на його біохімічні процеси. Воно нормується в КПО, що залежить від:

- системи природного освітлення;
- розряду виконуваних робіт із зорової напруженості;
- поясу світлового клімату.

Передбачена наявність сонцезахисних засобів, що знижують перепади яскравостей між природним світлом та свіченням індикаторів контрольних

пристроїв. Світлорозсіюючі штори повинні мати коефіцієнт відбивання 0,5- 0,7.

Робочі місця інженерів з обслуговування РЕА та ЕТО розташовані так, щоб в поле зору не потрапляли вікна або освітлювальні прилади. Штучне освітлення у приміщеннях здійснюється у вигляді комбінованої системи з використанням люмінесцентних джерел світла у світильниках загального освітлення, які розташовують над робочими поверхнями у рівномірно-прямокутному порядку. Пульсація люмінесцентних ламп не повинна перевищувати 10 %.

4.3.5 Шуми і вібрації

З фізіологічної точки зору шум – шкідливий дратівний фактор, що впливає на орган слуху і весь організм людини.

Шум погіршує умови праці здійснюючи шкідливу дію на організм людини. Працюючи в умовах тривалої шумової дії, випробовують дратівливість, головні болі, запаморочення, зниження пам'яті, підвищену стомлюваність, пониження апетиту, болі у вухах.

Рівень шуму на робочому місці інженерів з обслуговування радіонавігаційного обладнання не повинен перевищувати 50дБ.

Для зниження рівня шуму стіни і стеля приміщень, де встановлені стенди для перевірок радіонавігаційного обладнання, можуть бути фанеровані звукопоглинальними матеріалами. Діапазон чутних частот звуку лежить у діапазоні 16 – 20000 Гц.

Несприятливо на здоров'я людини впливають вібрації, причиною якої є невіднозначений силовий вплив, що виникає при роботі машин і агрегатів. Вплив вібрації не тільки погіршує самопочуття працюючого і знижує продуктивність праці, але часто приводить до важкого профзахворювання.

Отже, рівень вібрації в приміщеннях обслуговування радіонавігаційного обладнання може бути понижений шляхом встановлення устаткування на

спеціальні віброізолятори, що суттєво знизить коливальні хвилі і усуне негативний вплив вібрації.

4.3.6 Електробезпека

Електричні установки, до яких відноситься практично все обладнання перевірки та ремонту РЕА та ЕТА, представляють для людини велику потенційну небезпеку, так як в процесі експлуатації або проведенні профілактичних робіт людина може торкнутися частин, що знаходяться під напругою. Тому проблема електробезпеки при експлуатації електроприладів має особливе значення.

Живлення в кімнаті здійснюється від 3-х фазної мережі зі значенням напруги 380 В. Для підключення переносної електроапаратури застосовують гнучкі проводи в надійній ізоляції. Тимчасова електропроводка від переносних приладів до джерел живлення виконується найкоротшим шляхом без заплутування проводів у конструкціях машин, приладів і меблів.

Доточувати проводи можна тільки шляхом паяння з наступним старанним ізолюванням місць з'єднання. У приміщенні забезпечена недоступність нормально струмоведучих частин: дроти перебувають у вініл пластових трубах діаметром 50 мм із товщиною стінки 2 мм, прокладених схованою проводкою в підлозі й стінах (АПВ 2х2.5).

Умови електробезпеки в робочому приміщенні задовольняють нормативним вимогам.

Для запобігання електротравм у приміщенні використані вимикачі й розетки закритого типу, світильники заводського виготовлення (висота підвісу 3,0 м), що не мають відкритих нормально струмоведучих частин.

4.4 Розробка заходів з охорони праці

Для визначення дійсних показників освітлення в приміщенні розрахуємо нормовані показники. Місто Кривий Ріг, де розташована будівля, належить до IV світлового поясу (коефіцієнт світлового клімату $m=0,9$, коефіцієнт сонячного клімату $C=0,95$). По СНІП II-4-79, тому нормується мінімальне значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) $E_H^{IV}=1,3\%$.

Природного освітлення недостатньо для забезпечення відповідності нормам СНІП II-4-79/85. Можливими варіантом вирішення цієї проблеми є вибір іншого приміщення, з більшим числом вікон, що виходять на північ, або північний захід.

Або застосування системи штучного освітлення. Штучне освітлення по нормах СНІП II-4-79/85 «Природне й штучне освітлення. Норми проектування» нормується для освітленості E в люксах. E – поверхнева щільність світлового потоку, що залежить від: розряду виконуваних робіт із зорової напруженості (I-VIII), під розряду робіт (а, б, в, г), системи освітлення, типу джерел світла. Система освітлення, як зазначено вище – загальна. Тип джерела світла – люмінесцентні лампи. Так як мінімальній об'єкт розпізнавання піксель, графічні символи (РКІ, інформаційних дисплеїв та моніторів ПК або КПК) має 2 розряд (знаходиться в межах 0,15 – 0,3 мм), то норма освітленості згідно СНІП II-4-79/85 становить $E_{\text{нор}}= 300$ лк.

В результаті розрахунків отримали середнє значення освітленості робочої поверхні $E_{\text{ср}}= 363$ лк, що відповідає нормі ($E_{\text{ср}} > E_{\text{нор}}$).

4.5 Пожежна безпека

Вимоги пожежної і вибухової безпеки визначені ДСТ 12.1.010-76. Пожежна і вибухова безпека – це стан об’єкта при який із встановленою імовірністю виключається можливість виникнення і розвитку пожежі і вибуху і впливу на працюючих небезпечних факторів пожежі і вибуху, а також забезпечується захист матеріальних цінностей. Пожежі в приміщеннях становлять особливу небезпеку, бо поєднані з великими матеріальними збитками. Пожежа може виникнути при взаємодії горючих речовин і джерел запалювання. Горючими речовинами є будівельні та опоряджувальні матеріали, пластмасові корпуси техніки, шнури. Джерелами запалювання можуть бути електронні схеми комп’ютерів, принтерів, пристроїв електроживлення, де внаслідок різних порушень виникає перегрівання елементів, утворюються електричні іскри та дуги, здатні спричинити займання горючих матеріалів.

До засобів гасіння пожежі, призначених для локалізації невеликих займань, належать вогнегасники, сухий пісок, азбестові ковдри.

Приміщення, в яких встановлено обладнання для перевірки радіонавігаційного обладнання і де немає необхідності влаштування систем автоматичного пожежогасіння, оснащені переносними вуглекислотними вогнегасниками з розрахунку 2 шт. на кожні 20 м² в приміщеннях. Звуковбирне облицювання стін, стель приміщень треба виконувати з негорючих та важкогорючих матеріалів.

З метою виявлення початкової стадії займання використовуються пристрої систем автоматичного пожежогасіння там, де цього вимагають Правила пожежної безпеки.

4.6 Розрахункова частина

Оскільки розташування робочих місць в приміщенні невідоме, то розрахункову точку вибираємо на підставі нормативних документів. Умовна робоча поверхня розташована на висоті 0,8 м від підлоги, висота підвіконня – 1 м., а висота вікон – 1,5 м, тому висота від рівня робочої поверхні до верхнього краю вікна буде дорівнювати:

$$h = 1 + 1,5 - 0,8 = 1,7 \text{ м.}$$

Приймаємо, що розрахункова точка М умовної робочої поверхні знаходиться на відстані 1 м від стіни, яка найбільш віддалена від вікон, тобто відстань від точки М до зовнішньої стіни приміщення буде дорівнювати:

$$b = B - 1 = 5 - 1 = 4 \text{ м.}$$

$$\text{Тоді } \frac{L}{B} = \frac{7,35}{5} = 1,471,5,$$

знаходимо також

$$\frac{B}{H} = \frac{5}{1,5} = 3,33$$

Для цих значень світлова характеристика вікон $\eta_B = 10,5$.

Розраховуємо значення коефіцієнта r_l .

Для цього визначаємо спочатку відношення: $\frac{b}{B} = \frac{4}{5} = 0,8$.

Потім визначаємо площу стін $S_{\text{стін}}$, стелі $S_{\text{стелі}}$, підлоги $S_{\text{підлоги}}$ та відповідні коефіцієнти відбиття $\rho_{\text{стелі}}$, $\rho_{\text{стін}}$, $\rho_{\text{підлоги}}$. Бокові стіни мають площу $7,35 \times 3,75 \times 2 = 55 \text{ м}^2$, протилежна від вікон стіна $13,75 \times 3,75 = 52 \text{ м}^2$, тоді загальна площа стін $S_{\text{стін}} = 55 + 52 = 107 \text{ м}^2$.

$S_{\text{стелі}} = S_{\text{підлоги}} = 72 \text{ м}^2$. Для свіжепобіленої стелі приймаємо $r_{\text{стелі}} = 0,7$; для стін, що обклеєні світлими шпалерами $r_{\text{стін}} = 0,3$; а для підлоги приймаємо $r_{\text{підлоги}} = 0,25$. Середнє значення коефіцієнта відбиття $\rho_{\text{сер}}$ стелі, стін, підлоги розраховуємо за формулою:

$$\frac{p_{\text{стелі}}S_{\text{стелі}}+p_{\text{стіни}}S_{\text{стіни}}+p_{\text{підлог}}S_{\text{підлоги}}}{S_{\text{стелі}}+S_{\text{стіни}}+S_{\text{підлоги}}} = \frac{0,7*36+0,3*107+0,25*36}{36+107+36} = 0,37 \approx 0,4.$$

Тепер визначаємо, що значення коефіцієнта r_I знаходиться в межах $(1,7...2,45)$, вибираємо по правилу інтерполяції $r_I=2,1$.

4.7 Висновок до четвертого розділу

Під час роботи, на людину може впливати один, або декілька шкідливих виробничих факторів, тому дуже важливо зменшити цей вплив, або навіть виключити їх появу.

Питання охорони праці є одними з найважливіших на сучасному етапі життя нашого суспільства, в період, коли роботодавці ставлять для себе основну задачу якнайшвидше та з мінімальними матеріальними затратами, отримати як найбільший прибуток, і користуючись виниклими, останнім часом, в нашій країні дефіцитом робочих місць, мало хто з роботодавців приділяє достатньо уваги по ОП, а інколи і взагалі ігнорують вимоги безпеки праці.

Збільшення кількості професійних захворювань, нещасних випадків на виробництві, що призводять до травматизму, а інколи й до загибелі людей, усе це змушує замислитись про досконалість нашого законодавства та його дотримання в області охорони праці.

В даному розділі були проаналізовані умови праці спеціаліста з обслуговування та ремонту РЕА та ЕТА та визначені безпечні умови робочого приміщення.

ВИСНОВОК

У даній кваліфікаційній роботі було успішно вирішено актуальне науково-технічне завдання, що полягає у розробці програмно-апаратного стенду для комплексної перевірки та діагностики пристроїв комутації високої напруги, зокрема вакуумних вимикачів. Метою роботи було створення ефективного, компактного, бюджетного та гнучкого інструменту, здатного стати альтернативою дорогим, громіздким та функціонально надлишковим промисловим аналогам для потреб оперативної діагностики.

Для досягнення поставленої мети першим кроком став глибокий теоретичний аналіз, в ході якого було систематизовано ключові експлуатаційні характеристики та параметри комутаційних апаратів, що підлягають контролю. Детально розглянуто основні види випробувань, регламентовані чинними стандартами. Зокрема, проаналізовано методи перевірки електричної міцності ізоляції, комутаційної здатності, електричної зносостійкості та термічної стійкості, що дозволило сформулювати повний перелік вимог до функціонала майбутнього стенду. Також було досліджено важливість контролю механічних параметрів, таких як час спрацювання, різночасність фаз, хід контактів та наявність брязкоту, оскільки саме вони безпосередньо впливають на довговічність та надійність вимикача. Вивчення теплових, кліматичних та спеціальних випробувань підкреслило важливість створення пристрою, здатного працювати в реальних, а не лише лабораторних умовах.

Наступним етапом стало обґрунтування доцільності розробки шляхом комплексного огляду ринку існуючих рішень. У роботі було проаналізовано промислові та портативні стенди контролю, такі як SXGK HV/LV, ZC-330, HZ2813, НТКGG-Н та ПКВ/М7. Цей аналіз дозволив виявити їхні ключові недоліки. Було встановлено, що більшість стаціонарних промислових комплексів є надто дорогими та громіздкими, що унеможливорює їх використання у невеликих лабораторіях або для виїзних робіт. Крім того, вони часто мають

надлишковий функціонал, який не потрібен для переважної більшості завдань оперативної діагностики. Водночас існуючі портативні прилади хоч і є мобільними, але часто мають обмеження щодо кількості каналів, точності або залежать від пропрієтарного програмного забезпечення.

На основі виявлених потреб було спроектовано апаратну частину стенду. Основою комплексу є два ключові модулі. Перший – процесорний модуль (CP_U), спроектований на базі сучасного мікроконтролера STM32F303RET6, що забезпечує високу продуктивність та гнучкість. Для вимірювання електричних параметрів використано інтегральний модуль ACS37800, а для зв'язку з ПК — перетворювач USB-UART на базі FT232RL. Другий – модуль живлення та високої напруги (PS_U), що забезпечує всі вузли стенду необхідними напругами та містить високовольтний каскад на основі помножувача напруги Кокрофта-Вальтона для проведення специфічних тестів. Важливу увагу було приділено гальванічній розв'язці вимірювальних та силових кіл за допомогою оптопар, що гарантує безпеку роботи.

Невід'ємною частиною розробки стало створення програмного забезпечення для мікроконтролера на базі бібліотеки HAL. Воно реалізує всю логіку роботи стенду: виконує ініціалізацію периферії, керує циклом випробувань, збирає дані з АЦП за допомогою DMA для зменшення навантаження на процесор, обробляє сигнали та забезпечує обмін даними з ПК через UART. Це дозволяє автоматизувати процес тестування та готувати дані для подальшого аналізу та зберігання.

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було створено повністю функціональний програмно-апаратний стенд, який успішно вирішує поставлені завдання. Розроблений пристрій дозволяє виконувати комплексний контроль основних параметрів високовольтних комутаційних апаратів, а саме: контроль струмів та напруг соленоїдів, вимірювання часу відпрацювання команд, перевірку одночасності замикання контактів, аналіз наявності брязкоту та непрямий контроль витoku вакууму. Головними перевагами розробленого стенду є його компактність, низька собівартість та гнучкість, що робить його доступним

рішенням для навчальних лабораторій, малих підприємств та виїзних сервісних бригад.

Таким чином, усі завдання, поставлені у кваліфікаційній роботі, були повністю виконані, а мета роботи – досягнута. Розроблений стенд є завершеним проєктом, готовим до практичного застосування для підвищення надійності та безпеки експлуатації електроенергетичних систем.

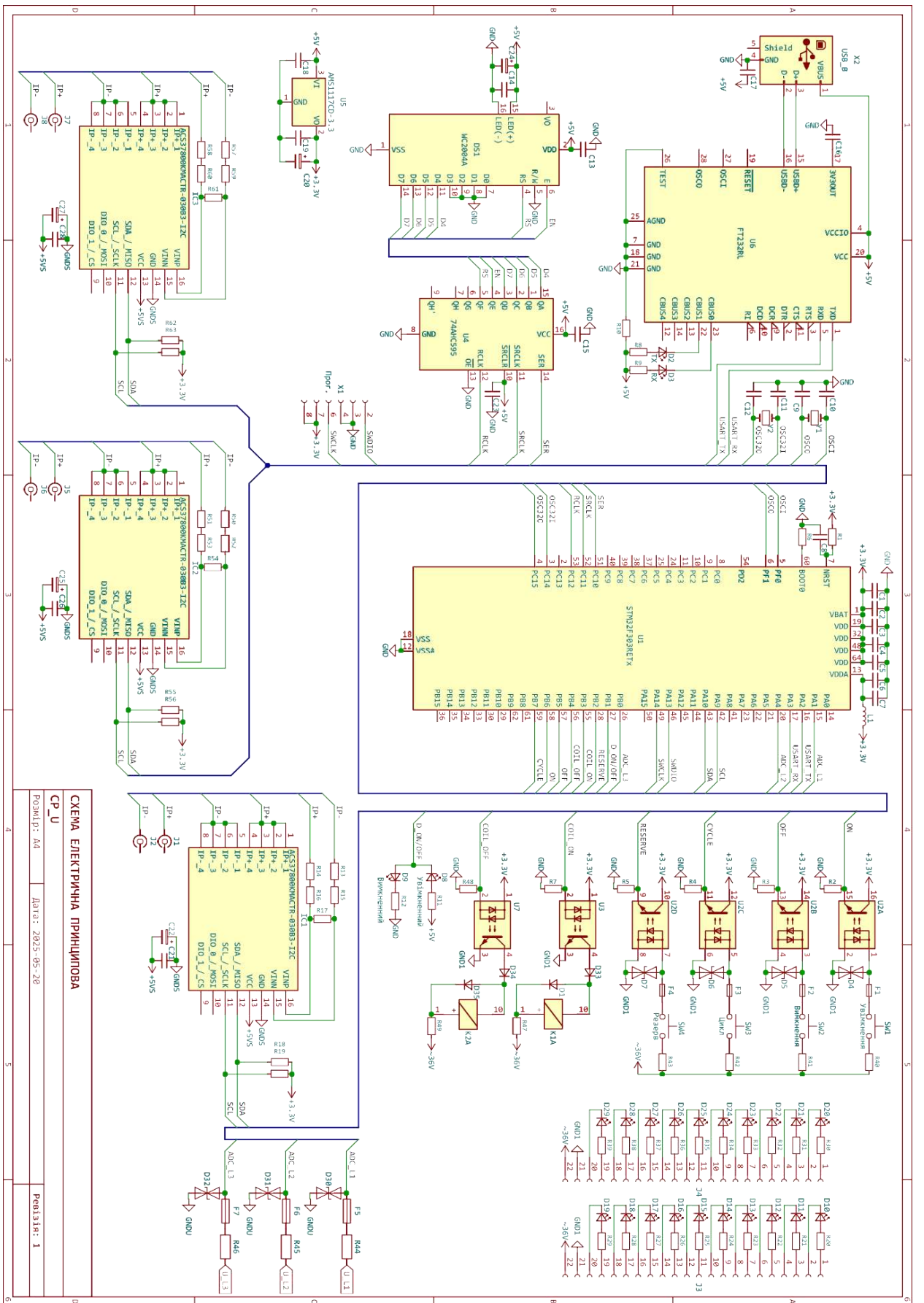
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

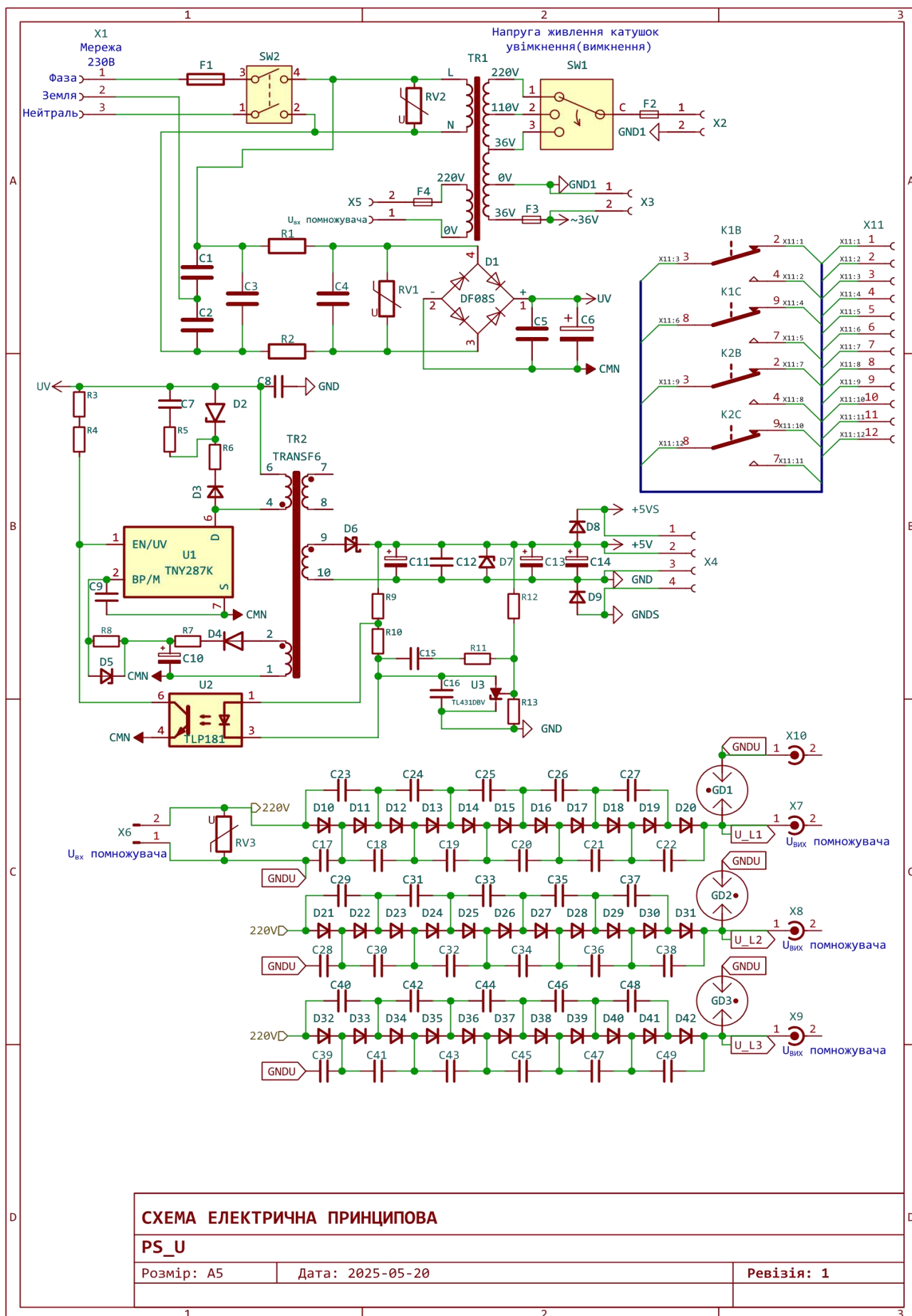
1. ДСТУ EN IEC 62271-202:2024 Пристрої контрольні розподільчі високовольтні. Частина 202. Збірні підстанції змінного струму на номінальну напругу вище 1 кВ та до 52 кВ включно (EN IEC 62271-202:2022, IDT; IEC 62271-202:2022, IDT)
2. ДСТУ EN 60947-2:2019 Пристрої комплектні розподільчі низьковольтні. Частина 2. Автоматичні вимикачі (EN 60947-2:2017, IDT; IEC 60947-2:2016, IDT)
3. [IEC 62271:2025 SER | IEC](#)
4. ДСТУ IEC 60068-2-27:2015 Випробування на вплив зовнішніх чинників. Частина 2-27. Випробування. Випробування Еа та настанови: Удар (IEC 60068-2-27:2008, IDT)
5. ДСТУ IEC 60529:2019 Ступені захисту, забезпечувані корпусами (IP-код) (IEC 60529:2013, IDT)
6. [IEC-60068-2-27-2008.pdf](#)
7. ДСТУ IEC 60068-2-6:2015 Випробування на вплив зовнішніх чинників. Частина 2-6. Випробування. Випробування Fc: Вібрація (синусоїдна) (IEC 60068-2-6:2007, IDT)
8. ДСТУ EN 61000-4-8:2017 Електромагнітна сумісність. Частина 4-8. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливість до магнітного поля частоти мережі (EN 61000-4-8:2010, IDT; IEC 61000-4-8:2009, IDT)
9. [SXGK HV/LV Switchgear Panel Testing Bench - Sansion Power Electric](#)
10. [Power Test Bench Low Medium High Voltage Electrical Test Equipment Switchgear Power Test Set](#)

11. [HZ-2813 Circuit Breaker Power-on Test Bench For High and Low Voltage Switchgear - Hot Product Promotion - Nyheter - Huazheng Electric Manufacturing \(Baoding\) Co., Ltd](#)
12. [Htkgg-H Portable Automatic High Voltage Switchgear Circuit Breaker Test Equipment - Switch Cabinet Energized Test Bench and Test Bench](#)
13. [Switchgear Test Equipment- Wuhan UHV](#)
14. [ПКВ/М7, ПКВ/М7 з USB - прилад контролю високовольтних вимикачів ТОВ "ЗАВОД УКРМАШПРОМ"](#)
15. [STM32F303RE - Mainstream Mixed signals MCUs Arm Cortex-M4 core with DSP and FPU, 512 Kbytes of Flash memory, 72 MHz CPU, MPU, CCM, 12-bit ADC 5 MSPS, PGA, comparators - STMicroelectronics](#)
16. <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>
17. [FT232R](#)
18. https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs37800-datasheet.pdf?sc_lang=en
19. [8-bit serial-in/serial-out or parallel-out shift register with output latches](#)
20. https://www.power.com/sites/default/files/documents/tinyswitch-4_family_datasheet.pdf

ДОДАТКИ

Додаток А





```

/* USER CODE BEGIN Header */
/**
 * *****
 * @file           : main.c
 * @brief          : Main program body
 * *****
 * @attention
 *
 * Copyright (c) 2025 STMicroelectronics.
 * All rights reserved.
 *
 * This software is licensed under terms that can be found in the LICENSE file
 * in the root directory of this software component.
 * If no LICENSE file comes with this software, it is provided AS-IS.
 *
 * *****
 */
/* USER CODE END Header */
/* Includes ----- */
#include "main.h"

/* Private includes ----- */
/* USER CODE BEGIN Includes */

/* USER CODE END Includes */

/* Private typedef ----- */
/* USER CODE BEGIN PTD */

/* USER CODE END PTD */

/* Private define ----- */
/* USER CODE BEGIN PD */

/* USER CODE END PD */

/* Private macro ----- */
/* USER CODE BEGIN PM */

/* USER CODE END PM */

/* Private variables ----- */
ADC_HandleTypeDef hadc2;
DMA_HandleTypeDef hdma_adc2;

I2C_HandleTypeDef hi2c2;

UART_HandleTypeDef huart2;

/* USER CODE BEGIN PV */
volatile uint16_t adc[20] = {0,};
volatile uint8_t flag = 0;
uint8_t b_ON = 0;
uint8_t b_OFF = 0;
/* USER CODE END PV */

/* Private function prototypes ----- */
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);

```

```

static void MX_DMA_Init(void);
static void MX_USART2_UART_Init(void);
static void MX_ADC2_Init(void);
static void MX_I2C2_Init(void);
/* USER CODE BEGIN PFP */
void Buttons(void);
/* USER CODE END PFP */

/* Private user code ----- */
/* USER CODE BEGIN 0 */
void Buttons()
{
    if(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, ON_Pin))
    {
        b_ON = 1;
        b_OFF = 0;
    }
    if(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, OFF_Pin))
    {
        b_ON = 0;
        b_OFF = 1;
    }
}
void HAL_ADC_ConvCpltCallback(ADC_HandleTypeDef* hadc)
{
    if(hadc->Instance == ADC2)
    {
        HAL_ADC_Stop(&hadc2);
        flag = 1;
    }
}
void HAL_GPIO_EXTI_Callback(uint16_t GPIO_Pin)
{
    if(b_ON == 1)
    {
        HAL_ADCEx_Calibration_Start(&hadc2, adc);
        HAL_ADC_Start_DMA(&hadc2, (uint32_t*)&adc, 20); // стартуем АЦП
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, COIL_Pin, 1);
    }
    if(b_OFF == 1)
    {
        HAL_ADCEx_Calibration_Start(&hadc2, adc);
        HAL_ADC_Start_DMA(&hadc2, (uint32_t*)&adc, 20); // стартуем АЦП
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, COIL_Pin, 0);
    }
}
/* USER CODE END 0 */

/**
 * @brief The application entry point.
 * @retval int
 */
int main(void)
{
    /* USER CODE BEGIN 1 */

    /* USER CODE END 1 */

    /* MCU Configuration----- */

```

```

/* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
HAL_Init();

/* USER CODE BEGIN Init */

/* USER CODE END Init */

/* Configure the system clock */
SystemClock_Config();

/* USER CODE BEGIN SysInit */

/* USER CODE END SysInit */

/* Initialize all configured peripherals */
MX_GPIO_Init();
MX_DMA_Init();
MX_USART2_UART_Init();
MX_ADC2_Init();
MX_I2C2_Init();
/* USER CODE BEGIN 2 */

/* USER CODE END 2 */

/* Infinite loop */
/* USER CODE BEGIN WHILE */
while (1)
{
    /* USER CODE END WHILE */

    /* USER CODE BEGIN 3 */
        void Buttons();
        if(flag)
        {
            flag = 0;
            HAL_ADC_Stop_DMA(&hadc2); // это необязательно
        }
    }
/* USER CODE END 3 */
}

/**
 * @brief System Clock Configuration
 * @retval None
 */
void SystemClock_Config(void)
{
    RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
    RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};
    RCC_PeriphCLKInitTypeDef PeriphClkInit = {0};

    /** Initializes the RCC Oscillators according to the specified parameters
     * in the RCC_OscInitTypeDef structure.
     */
    RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSI|RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
    RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_ON;
    RCC_OscInitStruct.HSIState = RCC_HSI_ON;
    RCC_OscInitStruct.HSICalibrationValue = RCC_HSICALIBRATION_DEFAULT;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLMUL = RCC_PLL_MUL6;

```

```

RCC_OscInitStruct.PLL.PREDIV = RCC_PREDIV_DIV1;
if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}

/** Initializes the CPU, AHB and APB buses clocks
 */
RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYCLK
                             |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;
RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;

if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
PeriphClkInit.PeriphClockSelection = RCC_PERIPHCLK_USART2|RCC_PERIPHCLK_I2C2
                             |RCC_PERIPHCLK_ADC12;
PeriphClkInit.Usart2ClockSelection = RCC_USART2CLKSOURCE_PCLK1;
PeriphClkInit.Adc12ClockSelection = RCC_ADC12PLLCLK_DIV1;
PeriphClkInit.I2c2ClockSelection = RCC_I2C2CLKSOURCE_HSI;
if (HAL_RCCEx_PeriphCLKConfig(&PeriphClkInit) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
}

/**
 * @brief ADC2 Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_ADC2_Init(void)
{
    /* USER CODE BEGIN ADC2_Init 0 */

    /* USER CODE END ADC2_Init 0 */

    ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};

    /* USER CODE BEGIN ADC2_Init 1 */

    /* USER CODE END ADC2_Init 1 */

    /** Common config
    */
    hadc2.Instance = ADC2;
    hadc2.Init.ClockPrescaler = ADC_CLOCK_ASYNC_DIV1;
    hadc2.Init.Resolution = ADC_RESOLUTION_12B;
    hadc2.Init.ScanConvMode = ADC_SCAN_DISABLE;
    hadc2.Init.ContinuousConvMode = ENABLE;
    hadc2.Init.DiscontinuousConvMode = DISABLE;
    hadc2.Init.ExternalTrigConvEdge = ADC_EXTERNALTRIGCONVEDGE_NONE;
    hadc2.Init.ExternalTrigConv = ADC_SOFTWARE_START;
    hadc2.Init.DataAlign = ADC_DATAALIGN_RIGHT;
    hadc2.Init.NbrOfConversion = 1;
    hadc2.Init.DMAContinuousRequests = DISABLE;

```

```

hadc2.Init.EOCSelection = ADC_EOC_SINGLE_CONV;
hadc2.Init.LowPowerAutoWait = DISABLE;
hadc2.Init.Overrun = ADC_OVR_DATA_OVERWRITTEN;
if (HAL_ADC_Init(&hadc2) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}

/** Configure Regular Channel
 */
sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_1;
sConfig.Rank = ADC_REGULAR_RANK_1;
sConfig.SingleDiff = ADC_SINGLE_ENDED;
sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_1CYCLE_5;
sConfig.OffsetNumber = ADC_OFFSET_NONE;
sConfig.Offset = 0;
if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc2, &sConfig) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
/* USER CODE BEGIN ADC2_Init 2 */

/* USER CODE END ADC2_Init 2 */

}

/**
 * @brief I2C2 Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_I2C2_Init(void)
{
    /* USER CODE BEGIN I2C2_Init 0 */

    /* USER CODE END I2C2_Init 0 */

    /* USER CODE BEGIN I2C2_Init 1 */

    /* USER CODE END I2C2_Init 1 */
    hi2c2.Instance = I2C2;
    hi2c2.Init.Timing = 0x00201D2B;
    hi2c2.Init.OwnAddress1 = 0;
    hi2c2.Init.AddressingMode = I2C_ADDRESSINGMODE_7BIT;
    hi2c2.Init.DualAddressMode = I2C_DUALADDRESS_DISABLE;
    hi2c2.Init.OwnAddress2 = 0;
    hi2c2.Init.OwnAddress2Masks = I2C_OA2_NOMASK;
    hi2c2.Init.GeneralCallMode = I2C_GENERALCALL_DISABLE;
    hi2c2.Init.NoStretchMode = I2C_NOSTRETCH_DISABLE;
    if (HAL_I2C_Init(&hi2c2) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }

    /** Configure Analogue filter
     */
    if (HAL_I2CEx_ConfigAnalogFilter(&hi2c2, I2C_ANALOGFILTER_ENABLE) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
}

```

```

    /** Configure Digital filter
    */
    if (HAL_I2CEx_ConfigDigitalFilter(&hi2c2, 0) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    /* USER CODE BEGIN I2C2_Init 2 */

    /* USER CODE END I2C2_Init 2 */

}

/**
 * @brief USART2 Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_USART2_UART_Init(void)
{
    /* USER CODE BEGIN USART2_Init 0 */

    /* USER CODE END USART2_Init 0 */

    /* USER CODE BEGIN USART2_Init 1 */

    /* USER CODE END USART2_Init 1 */
    huart2.Instance = USART2;
    huart2.Init.BaudRate = 38400;
    huart2.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B;
    huart2.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1;
    huart2.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
    huart2.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX;
    huart2.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
    huart2.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16;
    huart2.Init.OneBitSampling = UART_ONE_BIT_SAMPLE_DISABLE;
    huart2.AdvancedInit.AdvFeatureInit = UART_ADVFEATURE_NO_INIT;
    if (HAL_UART_Init(&huart2) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    /* USER CODE BEGIN USART2_Init 2 */

    /* USER CODE END USART2_Init 2 */

}

/**
 * Enable DMA controller clock
 */
static void MX_DMA_Init(void)
{
    /* DMA controller clock enable */
    __HAL_RCC_DMA2_CLK_ENABLE();

    /* DMA interrupt init */
    /* DMA2_Channel1_IRQn interrupt configuration */
    HAL_NVIC_SetPriority(DMA2_Channel1_IRQn, 0, 0);
    HAL_NVIC_EnableIRQ(DMA2_Channel1_IRQn);
}

```

```

}

/**
 * @brief GPIO Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_GPIO_Init(void)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure = {0};
    /* USER CODE BEGIN MX_GPIO_Init_1 */

    /* USER CODE END MX_GPIO_Init_1 */

    /* GPIO Ports Clock Enable */
    __HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOF_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();

    /*Configure GPIO pin Output Level */
    HAL_GPIO_WritePin(LD2_GPIO_Port, LD2_Pin, GPIO_PIN_RESET);

    /*Configure GPIO pin Output Level */
    HAL_GPIO_WritePin(COIL_GPIO_Port, COIL_Pin, GPIO_PIN_RESET);

    /*Configure GPIO pin : B1_Pin */
    GPIO_InitStructure.Pin = B1_Pin;
    GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_IT_FALLING;
    GPIO_InitStructure.Pull = GPIO_NOPULL;
    HAL_GPIO_Init(B1_GPIO_Port, &GPIO_InitStructure);

    /*Configure GPIO pin : LD2_Pin */
    GPIO_InitStructure.Pin = LD2_Pin;
    GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStructure.Pull = GPIO_NOPULL;
    GPIO_InitStructure.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    HAL_GPIO_Init(LD2_GPIO_Port, &GPIO_InitStructure);

    /*Configure GPIO pin : COIL_Pin */
    GPIO_InitStructure.Pin = COIL_Pin;
    GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStructure.Pull = GPIO_NOPULL;
    GPIO_InitStructure.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    HAL_GPIO_Init(COIL_GPIO_Port, &GPIO_InitStructure);

    /*Configure GPIO pins : OFF_Pin ON_Pin */
    GPIO_InitStructure.Pin = OFF_Pin|ON_Pin;
    GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_IT_FALLING;
    GPIO_InitStructure.Pull = GPIO_PULLUP;
    HAL_GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStructure);

    /* EXTI interrupt init*/
    HAL_NVIC_SetPriority(EXTI9_5_IRQn, 0, 0);
    HAL_NVIC_EnableIRQ(EXTI9_5_IRQn);

    /* USER CODE BEGIN MX_GPIO_Init_2 */

    /* USER CODE END MX_GPIO_Init_2 */
}

```

```

/* USER CODE BEGIN 4 */

/* USER CODE END 4 */

/**
 * @brief This function is executed in case of error occurrence.
 * @retval None
 */
void Error_Handler(void)
{
    /* USER CODE BEGIN Error_Handler_Debug */
    /* User can add his own implementation to report the HAL error return state */
    __disable_irq();
    while (1)
    {
    }
    /* USER CODE END Error_Handler_Debug */
}

#ifdef USE_FULL_ASSERT
/**
 * @brief Reports the name of the source file and the source line number
 * where the assert_param error has occurred.
 * @param file: pointer to the source file name
 * @param line: assert_param error line source number
 * @retval None
 */
void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
{
    /* USER CODE BEGIN 6 */
    /* User can add his own implementation to report the file name and line number,
    ex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file, line) */
    /* USER CODE END 6 */
}
#endif /* USE_FULL_ASSERT */

```