

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Кафедра _____ Електрорухомий склад залізниць _____
(повна назва)

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ Гетьман Г.К.
(підпис) (ПІБ)

2020 р. _____ « _____ »

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань _____ 14 Електрична інженерія _____
(шифр) (назва)

Спеціальність _____ 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка _____
(код) (повна назва)

Спеціалізація _____ Електричний транспорт _____
(повна назва)

Тема _____ Розробка методики і засобів діагностування
_____ напівпровідникових перетворювачів електрорухомого складу

Theme _____ Development of methodology and facilities of diagnosticating
_____ of semiconductor transformers of electromotive composition

Керівник дипломної роботи _____ ст. викладач _____ Васильєв В. Є _____
(посада) (підпис) (ПІБ)

Нормоконтролер _____ ст. викладач _____ Васильєв В. Є. _____
(посада) (підпис) (ПІБ)

Студент групи _____ ЕТ1926 (8ЕМ) _____ Радченко М.М. _____
(група) (підпис) (ПІБ)

Student _____ Radchenko Maksym _____
(Family name)

Дніпро
2020

ВСТУП

Сучасні умови роботи залізничного транспорту висувають високі вимоги до надійності електротехнічного обладнання, зокрема до силових напівпровідникових перетворювачів.

Однією з основних завдань залізничного транспорту в сучасних умовах є зниження експлуатаційних витрат в усіх напрямках, в тому числі на технічне обслуговування (ТО) і ремонт силових напівпровідникових перетворювачів (СП) і тягових підстанцій. Скорочення витрат в останньому випадку можливо за двома напрямками: зменшення кількості ТО і ремонтів і скорочення трудовитрат і часу. Крім економії прямих витрат, пов'язаних безпосередньо з проведенням ремонтних робіт, можна отримати набагато більш істотну економію при скороченні простоїв дорогого обладнання та зменшенні кількості відмов безпосередньо в експлуатації, що дозволяє знизити, потреба в резервному обладнанні і уникнути збоїв у русі поїздів.

За результатами численних досліджень можна констатувати, що при виході з ладу перетворювачів відмови силових напівпровідникових приладів (СНП) складають до 80% на ЕРС і до 30-40% на тягових підстанціях. Вирішення цієї проблеми в сукупності з проблемою збереження енергії можна встановити шляхом впровадження нових методик і пристроїв технічного діагностування і виявлення передвідмовних станів пристроїв електропостачання та електрорухомого складу, а також за допомогою переходу до системи технічного обслуговування по фактичному стану.

Слід зазначити, що в даний час і в доступній для огляду перспективи на залізничному транспорті будуть застосовуватися напівпровідникові прилади (НП) з груповим з'єднанням СНП. Групове з'єднання дозволяє підвищити граничне значення загальної потужності перетворювача. Однак навіть всередині одного типу СНП є розкид електричних і теплових характеристик приладів, який істотно знижує ефективність групового з'єднання. При цьому з'являється нерівномірність розподілу струмів і напруг між приладами в з'єднанні, і потрібні спеціальні заходи для вирішення цієї проблеми. Для цього застосовують підбір по вольт-амперної характеристики (ВАХ) СНП, а також додаткові вирівнюючі кола для групових з'єднань СНП. Розкид параметрів призводить до перевантаження по струму і напрузі одного приладу; і недовикористання іншого в групі, що призводить до підвищення імовірності відмови окремих приладів. Процеси деградації, наявність прихованих дефектів СНП, різко нерівномірні режими роботи на залізничному транспорті визначають високі вимоги до рівня надійності як самого СП, так і до окремих НП. Тому вкрай важливо визначати предвідмовний стан СНП і своєчасно замінювати потенційно ненадійні прилади.

В цьому напрямку виконані численні дослідження вітчизняними та зарубіжними вченими; розроблені різноманітні пристрої діагностування перетворювачів. Однак ряд питань в області діагностування перетворювачів не отримав остаточного рішення і вимагає додаткових досліджень, спробу яких і виконано в цій роботі.

						Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ЗАСОБІВ І МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ СНП ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

1.1 Короткий огляд силових напівпровідникових перетворювачів електричного транспорту

СП різних типів отримали широке застосування на залізничному, міському електричному транспорті, метрополітені, в різних галузях промисловості [1, 2, 3, 4, 5].

В літературі [6] представлені основні технічні дані СП електровозів змінного струму і електропоїздів. В [1, 7, 8] представлені перетворювачі, застосовувані на тягових підстанціях [17] залізниць. В [9] представлені напівпровідникові перетворювачі, що застосовані на ТП метрополітену.

В даний час в перетворювальній обладнанні за кордоном на транспорті найбільш широкого поширення набули СНП: силові модулі на базі IGBT; тиристорах GTO, що запираються і їх модернізований варіант - комутовані по затвору тиристори IGCT, що запираються [10].

Силові модулі на базі IGBT випускають на струми 10-2400 А і напруги до 6500В і вище і мають кращі характеристики (малу потужність управління і комутаційні втрати, високі швидкості комутації і стійкість до перевантажень і т.п.), в порівнянні з силовими біполярними транзисторами і тиристорами GTO, що запираються [10].

Так, наприклад, на залізницях Японії, Європи експлуатуються перетворювачі на IGBT-транзисторах з регульованою напругою і частотою, що дозволяє спростити схему і використовувати модульну конструкцію [11]. Також в Японії, Німеччині, Австрії, Швеції для високошвидкісного руху застосовується електрорухомий склад (ЕРС) з СП на GTO-тиристорах.

В Україні також є роботи по створенню перспективного ЕРС. Розроблено тяговий електропривод високошвидкісного електропоїзди "Тарпан".

Для організації високошвидкісного руху поїзда Хюндай пристосовані до умов експлуатації в Україні, а їх конструкція враховує вимоги українських стандартів. У тяговому перетворювачі як СНП застосовані IGBT- транзистори на напругу 6,5кВ [14].

Коротка характеристика СНП представлена в таблиці 1.1.

У порівнянні з тиристором, IGBT має більш високі частоти перемикавання, велику стійкість до зміни напруги і можливість виключення з керуючого електрода. У порівнянні з двохопераційними тиристорами, які вимагають для виключення протікання по керуючому електроду значного замикаючого струму, IGBT вимагає від кіл управління розсмоктування заряду вхідний ємності. Слід зазначити, що тиристор характеризується більш низьким прямим падінням напруги у включеному стані і більшою стійкістю до імпульсних, струмових перевантажень.

						Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 - Короткі порівняльні характеристики СНП

Тип приладу	Польовий транзистор MOSFET	Біполярний транзистор з ізольованим затвором IGBT	тиристор	Тиристор, що запирається GTO	Діод
структура	Польовий транзистор	Комбінація польового і біполярного транзистора	біполярна	біполярна	<i>p-n</i> -перехід
переваги	Легкий драйвер, висока швидкість, лінійна характеристика	висока питома комутаційна здатність, легкий драйвер, менша потужність управління	Висока питома комутаційна здатність, високі значення напруги і струму, висока перевантажувальна здатність по струму	Висока напруга, висока питома комутаційна здатність	Високі напруга і струм, низька вартість
недоліки	Висока вартість по відношенню до потужності	висока частота перемикавання, втрати в відкритому стані	Напівкерований прилад	Складність управління, високі динамічні втрати	Некерований прилад

Однак незважаючи на стрімкий розвиток силової електроніки в експлуатації в різних галузях промисловості, в тому числі і на вітчизняному транспорті, залишаються і будуть працювати протягом досить тривалого часу СП на діодах і одноопераційних тиристорах перш за все з економічних міркувань.

1.2 Відмови і основні несправності напівпровідникових перетворювачів

1.2.1 Характеристика відмов напівпровідникових перетворювачів

Вихід з ладу і відмови СП в умовах експлуатації впливають на надійність і режими роботи як окремих пристроїв, так і залізничного транспорту в цілому.

Надійність невідновлювальних об'єктів, якими є СНП, складається з властивостей безвідмовності, довговічності і зберігання [11]. Кількісно надійність характеризується показниками надійності, які в загальному випадку є функціями часу і зовнішніх впливів. Для опису надійності СНП при стаціонарних зовнішніх впливах досить задати будь-яку з наступних функцій:

$F(t)$ - функція розподілу напрацювання до відмови;

$R(t)$ - імовірність безвідмовної роботи;

$f(t)$ - щільність функції розподілу напрацювання до відмови;

$A(t)$ - інтенсивність відмов (ІВ).

На практиці найбільш часто зустрічається функція інтенсивності відмов. Зокрема, за характером залежності цієї функції від часу прийнято диференціювати різні етапи «життя» приладів, рисунок 1.1.



Рисунок 1.1 - Залежність ІВ СНП від часу

Криву ІВ розбивають на три ділянки: період приробітку, період нормальної експлуатації і період старіння. Відмови під час приробітки пояснені наявністю СНП з прихованими дефектами, а відмови під час старіння - зносом і старінням елементів. Причини відмов під час нормальної роботи, пояснюються по-різному: випадкові відмови; випадкові концентрації навантаження, що перевищують міцність елементів; недосконалість конструкції, виробничі дефекти, експлуатаційні перевантаження.

У період нормальної експлуатації ІВ СНП є функцією в першу чергу середньої температури (T) структури і прикладеної до приладу напруги (U) або струму (I), тобто $ІВ \lambda = \lambda(T, U)$ або $\lambda = \lambda(T, I)$. Можна зробити висновок, що напруга, яка прикладається до СНП, чим ближче до свого гранично допустимого значення, тим сильніше залежність ІВ від напруги. Під час періоду старіння момент зростання функції ІВ $\lambda = f(T)$ для СНП в правильно обраних схемах і режимах експлуатації перевищує 10^5 годин, що становить, більше 11 років безперервної експлуатації. За цей час, як правило, обладнання застаріває і СНП замінюють новими. У таблиці 1.2 коротко підсумовані дані за моделями відмов

СНП при впливі великих $\left(\frac{di}{dt}\right)_{crit}$. Причиною відмов СНП в тривалих режимах експлуатації при високих значеннях $\left(\frac{di}{dt}\right)_{crit}$ є втомні процеси в кремнії.

Найбільш характерними для СНП є два види відмов - обрив і коротке замикання.

Коротке замикання СНП - це втрата напівпровідникових властивостей. При короткому замиканні найчастіше виходять з ладу тиристори гілки того плеча ВП, де знаходяться пошкоджені СНП, рідше виникає пошкодження двох і

					Арк.
					10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

більше паралельних гілок.

Таблиця 1.2 - Моделі відмов СНП

Причина відмови	Критичний фактор	Значення критичного фактору	Режим
локальне розплавлення кремнію	температура	1000-1400°C	не повторюваний
шнурування зворотного струму	-*-	200-300°C	не повторюваний
шнурування прямого струму	-*-	300-650°C	не повторюваний
порушення замикаючої здатності	-*-	120-200°C	не повторюваний
деградація статистичних параметрів	-*-	90 -1000°C	не повторюваний
порушення динамічної теплостійкості	температура, енергія	500°C 900-1000 Дж	не повторюваний
Випаровування, ерозія кремнію	температура		Не повторюваний, повторюваний
теплова нестабільність	температура		
Розплавлення припою (для штирьової конструкції)	температура,		
Старіння припою (для штирьової конструкції)	перепад температур		повторюваний
Старіння кремнію через деформацій	механічна напруга з-за перепаду температур, енергія	$\Delta T \geq 100-250^\circ\text{C}$	повторюваний
Механічне руйнування через деформацій	енергія і швидкість зміни потужності	$< 0,2\text{Дж}$	не повторюваний

Нестабільність ВАХ призводить до того, що в певних умовах зворотний струм СНП різко збільшується, а потім зменшується до нормального значення. Це може бути наслідком порушення герметичності СНП або дефекту при виготовленні.

Обрив внутрішнього кола СНП викликається порушенням його кола по спаю в результаті старіння паяння.

Відомо, що при тривалому напрацюванню СП (20 ... 40 тис. годин) число

						Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ушкоджень СНП різко зростає. В СП СНП включені в паралельні гілки, тому обрив одного з СНП призводить до перевантаження і перегріву інших. У решти СНП прискорено розвиваються аналогічні процеси.

Для СНП велике значення має швидкість наростання струму навантаження $\left(\frac{di}{dt}\right)_{crit}$. Велика швидкість призводить до локалізації енергії, що виділяється в малому обсязі кристала. Тривала робота з крутими фронтами кидків струму, амплітуда яких не перевищує критичних, супроводжується виникненням ерозії окремих ділянок кристала, яка призводить, зокрема до втрати замикаючих властивостей СНП.

Так, надійність силових тиристорів, що використовуються в режимах включення с підвищеними швидкостями наростання струму у відкритому стані багато в чому визначається електричними і термічними процесами, що відбуваються в області первинного включення [11].

У IGBT-модулях паяної конструкції, що мають багат шарову конструкцію з різними коефіцієнтами теплового розширення [10] в процесі експлуатації окремі елементи конструкції отримують механічні напруги, які з плином часу призводять до погіршення термоконтактів між шарами, що призводить до збільшення теплового опору. Далі розвивається зв'язок: збільшення теплового опору; збільшення різниці температур між шарами; збільшення механічних зрушень і напруг; збільшення теплового опору; відмова. Основні причини відмов IGBT паяної конструкції:

- 1) руйнування і обрив зварного з'єднання між паралельними чіпами і алюмінієвими провідниками;
- 2) втома і руйнування припою між чіпами і поверхнею кераміки.

Вирішити проблему руйнування з'єднувального шару дозволяє технологія притискного контакту конструкції приладу. При притискному способі з'єднання і впливі термоциклів основа модуля «плаває» по теплопровідному шару відводу тепла, не відчуючи термомеханічних напружень.

Основною причиною відмов модулів притискного типу є відшарування кристалів від ізолюючої підкладки. Дану проблему вирішує застосування технології низькотемпературного спікання (чіпи з'єднуються з підкладкою допомогою спікання під високим тиском порошку з наночастинок срібла).

Для притискних IGBT використовують дві технології: чіпи, жорстко з'єднані за допомогою загальних притискних полюсів і індивідуальне пружинне з'єднання чіпів [11].

Тиристиори GTO і IGCT випускають в притискному виконанні. Притискні пристрої використовуються в основному для послідовного з'єднання завдяки більш простій збірці, особливо там, де потрібно резервування.

1.2.2 Причини відмов СНП в режимі експлуатації

Дане питання було досліджено на прикладі випрямних установок Дніпровського метрополітену.

						Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для випрямних установок типу УВКМ-5 і УВКМ-б при експлуатації протягом 20 років характерні такі види несправностей: несправність комутаційної апаратури - 29%; випадання блінкеру (несправність захисту автоматики) - 20%; наскрізний пробій - 17%; механічні несправності - 10%; пробій вентиля - 6%; помилкове спрацювання релейного захисту - 6%; несправність вентиляції - 5%; пошкодження або заміна трансформатора - 3%; несправність датчика температури - 2%; відмова RC-кіл - 1%; заміна перетворювача через катастрофічні пошкодження - 1%, (рисунк 1.2). Однак даний розподіл відмов характерний для роботи перетворювачів в досить комфортних умовах: відсутність механічних навантажень (вібрація, удари і ін.); перепадів температури, тиску, вологості і т.д.

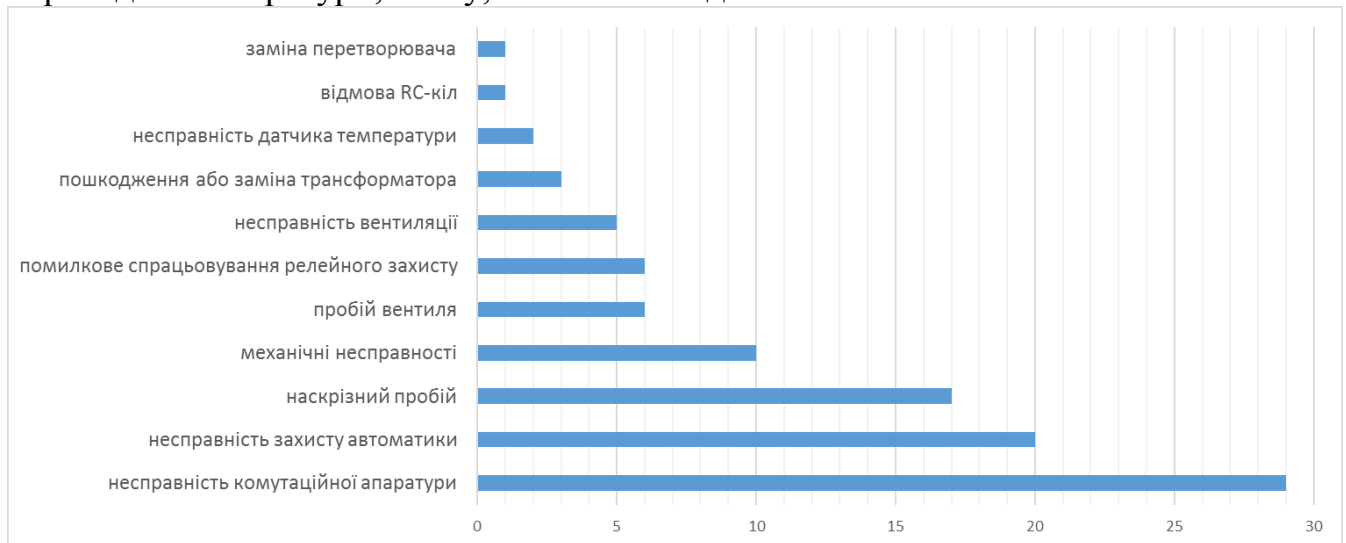


Рисунок 1.2 - Відмови випрямних установок метрополітену

У загальному випадку згідно зі статистичними даними, причиною відмов у випрямних блоках є: пробій кремнієвої структури - 70%; обрив усередині СНП - 23%; нестабільність характеристик - 4%; механічні руйнування - 1,5%; інші відмови, не пов'язані з відмовами СНП - 1,5%, (рисунк 1.3).



Рисунок 1.3 - Причини відмов у випрямних блоках

Основними параметрами критеріями придатності, що характеризують стан СНП, згідно [12] прийнято вважати повторюваний імпульсний зворотний струм I_{RRM} , імпульсне пряме падіння напруги ΔU ; для тиристорів ще й відпираючий струм керуючого електрода.

Перевірку параметрів-критеріїв придатності СНП проводять на заводі-виробника (приймально-здавальні випробування, періодичні випробування, випробування на надійність) згідно ГОСТ 30617-98 [13].

При тривалій експлуатації процеси деградації, наявність прихованих дефектів, виявлених при досить великій напрацювання на відмову, різноманітність режимів роботи і умов застосування, а також статистичні причини, пов'язані зі збільшенням кількості СНП і в послідовно-паралельному з'єднанні СНП, визначають далеко не достатній рівень надійності СНП, особливо щодо їх безвідмовності. Для визначення стану СНП необхідно мати такий критерій, за значенням якого можна стежити за поступовим розвитком відмови і таким чином виявити предвідмовний стан. Розкид параметрів призводить до перевантаження по струму і напрузі одних приладів і недовикористання інших в групі. Тому необхідно постійно контролювати параметри СНП в процесі експлуатації і проводити відбраковування потенційно ненадійних [14].

1.3 Технічне діагностування силових напівпровідникових перетворювачів залізничного транспорту

1.3.1 Загальні поняття

Проблему підвищення рівня безвідмовної роботи СП можна значною мірою вирішити за допомогою технічної діагностики [14].

Технічна діагностика використовується на всіх етапах існування технічного об'єкта - при виробництві, експлуатації та в ряді випадків при проектуванні. Завданнями технічного діагностування є: контроль технічного стану; пошук місця і визначення причин відмови.

Технічне діагностування поділяють на робоче, тестове і експрес-діагностування.

До робочого діагностування відносять діагностування, при якому на об'єкт подаються робочі впливи. Системи робочого діагностування застосовуються в процесі експлуатації об'єкта діагностування, вони дають можливість негайно реагувати на порушення в роботі захисту об'єкта діагностування. Однак обмеженість набору робочих впливів не завжди дозволяє оптимально вирішити завдання діагностики. Обмеженість набору робочих впливів характерна для СП, тому при функціональному діагностуванні СП можна тільки виявити відмовили плечі групи СНП.

Тестове діагностування - діагностування, при якому на об'єкт подаються тестові впливи. Схеми тестового діагностування відрізняються від схем робочого діагностування наявністю генератора тестових впливів. Контрольні тести поділяють на дві групи: алгоритмічні і параметричні. Алгоритмічні перевіряють

						Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

правильність функціонування об'єкта, його алгоритм. У свою чергу, діагностування параметрів використовують для виявлення поступових відмов, для прогнозування стану об'єкта, а також для виявлення раптових відмов.

Експрес-діагностування - діагностування по обмеженому числу параметрів за встановлений час. При експрес-діагностуванні для подачі впливів і отримання відповідних реакцій можна використовувати не тільки основні входи і виходи об'єкта, але також внутрішні вузли і гілки кола. Це сприяє отриманню великої глибини пошуку дефектів при малих витратах часу і обладнання. При цьому дане обладнання володіє порівняно невеликими масогабаритними показниками тобто мобільністю, що актуально при діагностуванні в процесі експлуатації;

1.3.2 Робоче діагностування та його апаратна реалізація

Відома досить велика кількість варіантів апаратної реалізації робочого діагностування СП. Розглянемо деякі з них.

Електронна установка контролю розподілу струму (ЕУКРС), має вбудовані датчики в кожній гілці СП і дозволяє визначити наявність відмов типу "пробій" і "обрив" (рисунк 1.4). Недолік установки в тому, що при кількості до 16 шт. СНП вона може зафіксувати відмову типу "пробій" тільки двох або більше приладів. Перевагою даної установки є можливість застосування в СП, як з штирьовими, так і з таблеткового СНП.

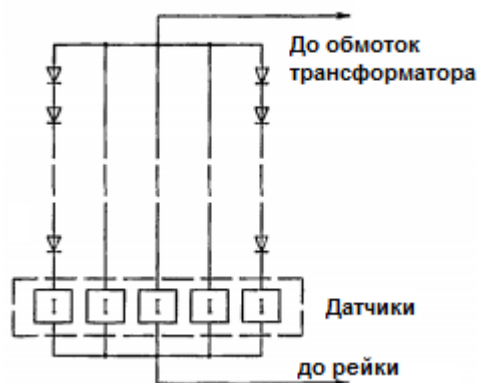


Рисунок 1.4 - Схема включення датчиків пристрою ЕУКРС

Інші засоби діагностування контролюють не тільки струм, але і напругу на СНП. Приклади таких датчиків наведені в [11].

В [14] пропонується система контролю стану тиристорів, рисунок 1.5, в загальному випадку повинна складатися з датчиків напруги TV1-TV4, підключених паралельно тиристорам VT1-VT4, виходи яких через аналого-цифровий перетворювач АЦП1 пов'язані з мікропроцесором МІ, який видає сигнали на індикатор ІІ або в блок управління і захисту БУЗ1 перетворювача. Через кожні 100 год роботи СП в оперативно-запам'ятовуючий пристрій МІ послідовно заносяться значення прямого падіння напруги тиристорів.

					Арк.
					15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

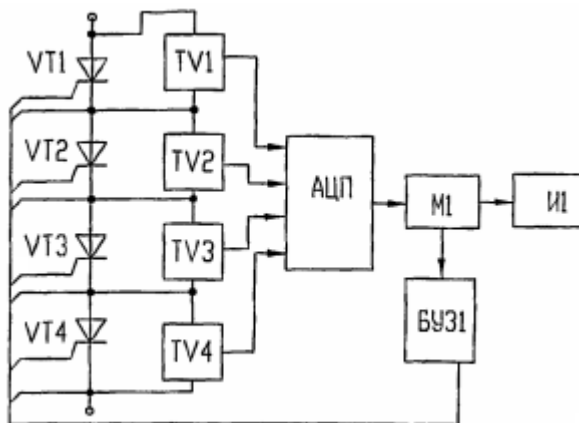


Рисунок 1.5 - Спрощена електрична схема канал контролю стану тиристорів

Прогнозування технічного стану тиристорів і визначення потенційно ненадійних проводиться за трьома значеннями параметра $n = 3$, отриманим при послідовних вимірах з інтервалом $\tau = 100$ год. При цьому вихідною інформацією служить матриця станів тиристорів порядку $[4 \times n]$, в якій записані значення падіння напруги кожного тиристора:

$$\begin{bmatrix} U_{np11} & U_{np12} & U_{np13} \\ U_{np21} & U_{np22} & U_{np23} \\ U_{np31} & U_{np32} & U_{np33} \\ U_{np41} & U_{np42} & U_{np43} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Перший стовпець може бути отриманий за результатами вхідного контролю тиристорів перед їх монтажем, при цьому номер рядка матриці дорівнює номеру тиристора. Кількість стовпців відповідає числу вимірів, що зберігаються в пам'яті М1. Відповідно до алгоритму М1 визначає «збільшення» падіння напруги на тиристорах за інтервали часу τ :

Отримується матриця збільшень $[4 \times n - 1]$:

$$\begin{bmatrix} U_{np11} & U_{np12} \\ U_{np21} & U_{np22} \\ U_{np31} & U_{np32} \\ U_{np41} & U_{np42} \end{bmatrix}$$

Далі визначається середнє прогнозоване значення падіння напруги на кожному тиристорі $m_{U_{npij}}$ до моменту часу в майбутньому $tn + i$ за формулами:

$$R_{ik} = \left[\sum_{j=1}^n 2^{-(n-1)} (U_{np,ij} - U_{np,kj})^2 \right]^{-1} + \left[\sum_{j=1}^n 1,65^{-(n-1)} (\Delta U_{np,ij} - \Delta U_{np,kj})^2 \right]^{-1}$$

В [14] запропоновано пристрій вимірювання теплового опору СНП, в якому реалізований принцип безперервного контролю струмозподілу по паралельних гілках СНП представлено на рисунку 1.6. Інформація про миттєві значення струмів надходить на блок БВСАТ, де виділяється середнє арифметичне. Середнє арифметичне зіставляється зі значенням миттєвих струмів КС1-КС5. Якщо є відхилення, то інформація про це надходить в логічний блок БЛ, а потім в блок інформації.

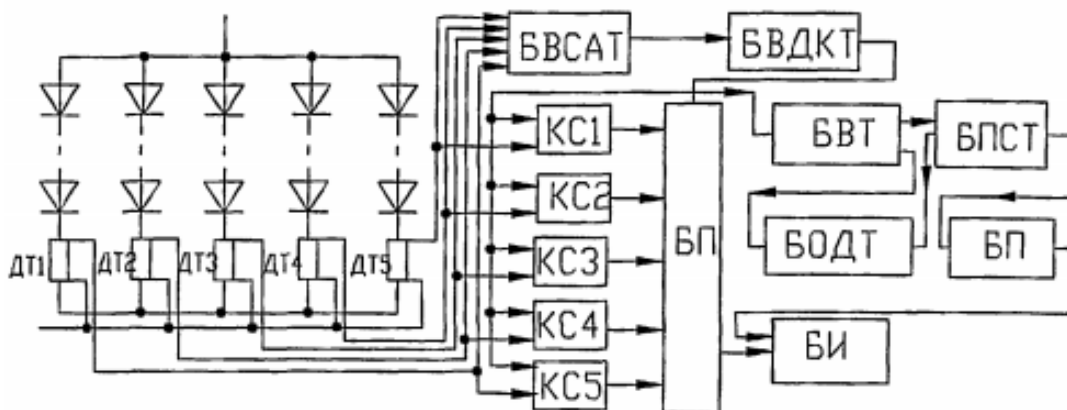


Рисунок 1.6 - Пристрій контролю струмозподілу в СП

1.3.3 Тестове діагностування напівпровідникових перетворювачів і варіанти його апаратної реалізації,

В [2, 4, 9] детально розглядаються варіанти апаратної реалізації тестового діагностування силових напівпровідникових перетворювачів метрополітену і залізничного транспорту.

В [15] представлений комплекс «АДП», що складається з чотирьох установок для вимірювання статичних параметрів СНП. «АДП-2» застосовується для вимірювань імпульсних напруг у відкритому стані $U_{TM(FM)}$ і формує випробувальні одноразові імпульси струму з амплітудою $I_{TM(FM)}$ від 300 А до 8 кА, і вимірює $U_{TM(FM)}$ від 0,5 В до 10В. «АДП-3» застосовується для вимірювань параметрів кола управління тиристорів і симісторів струму відмикання I_v межах від 1 мА до 1 А і U_{GT} від 0,5 В до 10В. «АДП-4» служить для вимірювань часу затримай і часу включення тиристорів і симісторів в межах від 0,5 мкс до 30мкс. «АДП-5» створений для вимірювання заряду зворотного відновлення СНП.

В [11] представлений прилад для вимірювання теплового опору СНП ІТСВ-1. СНП прогрівають струмом 150А протягом 4 с, потім їх відключають і порівнюють значення прямого падіння напруги до прогріву і після нього. За калібрувальним кривим визначають тепловий опір.

В [9] представлений прилад ІТС-2М, призначений для вимірювання внутрішніх теплових опорів СНП - діодів штирьової конструкції. ІТС-2М забезпечує вимір внутрішнього теплового опору в межах від 0,01 до 0,7°C/Вт. У пристрої використано метод непрямих вимірювань. Одним з недоліків приладу є необхідність перерахунку результату вимірювання за допомогою градуювальних таблиць.

В [15] запропоновано пристрій вимірювання розподілу напруги і прямого струму СНП, рисунок 1.7.

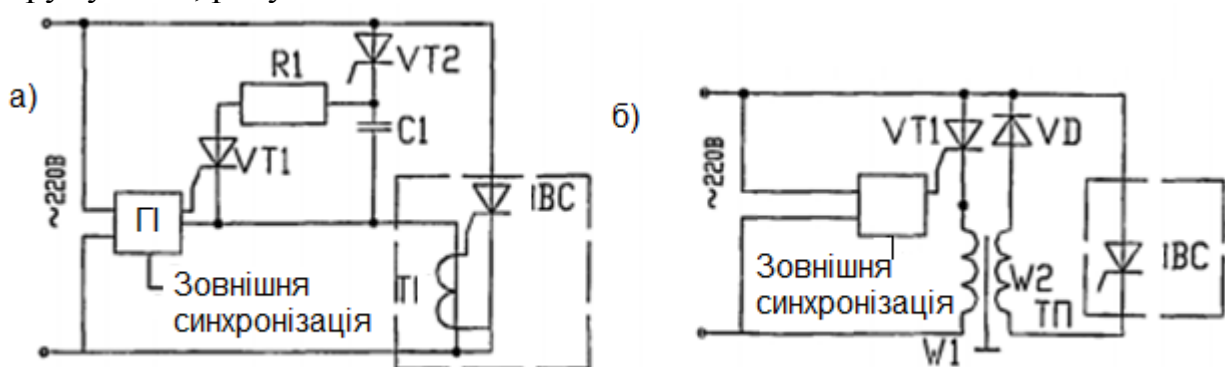


Рисунок 1.7 - Схема підключення пристрою

Випробувана випрямна секція навантажується імпульсами струму амплітудою до 100А і імпульсами напруги до 7-8 кВ, що задаються генератором ГІ. Вимірювання проводиться за допомогою вимірювальних кліщів.

В [14] запропоновано прийняти в якості тестового впливу для тиристорного перетворювача стрибок напруги. Контроль стану діодних СП

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	18

здійснюють за допомогою перевірки прямого напруги на відкритих $p-n$ переходах. Для цієї мети розроблено прилад діагностики силової схеми перетворювачів ТИП 1200/ЕП, рисунок 1.8.

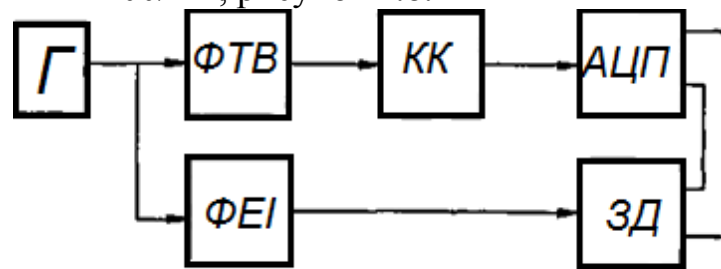


Рисунок 1.8 - Прилад діагностики силового перетворювача

Прилад запускається від імпульсів генератора Г, при цьому на контрольоване коло (КК) подається тестовий вплив і запускається формувач еталонних імпульсів ФЕІ. У пристрої зберігання даних ЗД записується дискретне значення вихідної напруги, перетвореного АЦП в цифрову величину. За відповідності параметрів КК номінальним вона - дорівнює нулю. У разі відхилення параметрів від номінальних, формувач тестового впливу ФТВ формує необхідні тестові впливи в необхідному діапазоні. Також при наявності відхилення параметрів включається індикатор, що сигналізує про несправності.

В [15] представлено пристрій для вимірювання теплових опорів, прямих падінь напруг і зворотних опорів СНП, рисунок 1.9, що складається з блоку програмного управління, блоку синхронізації, генератора вимірювального струму; і силового блоку. Однак все перемикавання варіантів роботи пристрою, а також запис даних вимірювання, виробляє оператор, що обумовлює внесення похибки.

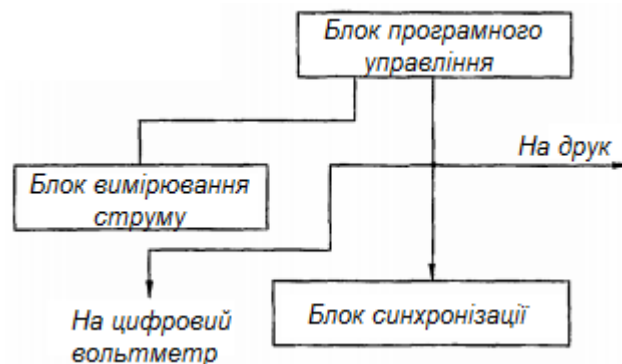


Рисунок 1.9 - Пристрій для вимірювання параметрів СНП

В [15] запропоновано прилад, який використовується при діагностуванні ВП локомотивів. На рисунку 1.10 приведена схема приладу, яким визначають окремі дефектні діоди або діоди, зібрані в блоки, при їх складанні і під час експлуатації. При діагностуванні визначають значення зворотного струму діода при звичайній температурі, а потім нагрівають його номінальним струмом і знову вимірюють зворотний струм. В якості вимірювального приладу використовується міст опорів з нуль-індикатором, як двох плечей моста -

шунтуючі опори випрямного блоку. Перетворювачем напруги служить трансформатор Тр1, на вторинній обмотці якого є номінальна і випробувальна напруга, що перемикається перемикачем П2. Напруга через ВК2 по проводах надходить на контрольований блок, а зворотний струм при цьому вимірюється міліамперметром РА1. Для розширення меж вимірювання прилад шунтується резистором R3. За допомогою приставки проводять нагрів діода при його випробуванні. Після нагріву діода відбувається включення перемикачів П4 і ВК6 і до нього підводиться випробувальну напругу, а струм, що проходить через діод у зворотному напрямку, вимірюють приладом РА2.

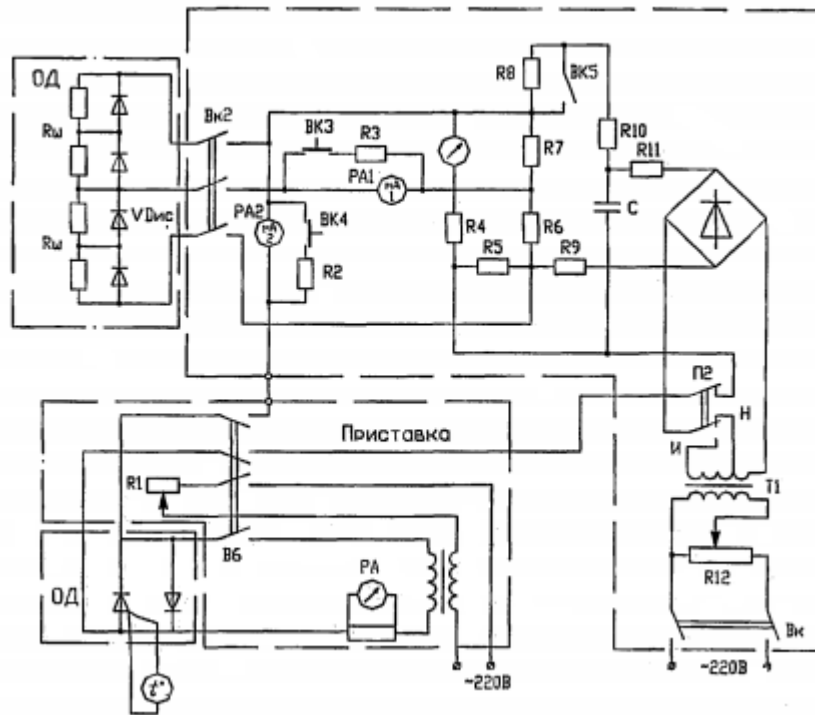


Рисунок 1.10 - Принципова схема приладу для виявлення дефектних діодів

Таким чином, за допомогою цього приладу визначають дефекти, які зустрічаються в експлуатації.

Технічний стан СНП за значенням зворотного струму можна перевіряти на окремому стенді і в випрямному блоці. СП мають групове з'єднання, і в зв'язку з цим основним фактором, що визначає процес діагностування, є час. Діагностування з частковим розбиранням блоку ВУ проводять при підключенні до паралельно включених діодів джерела постійного струму в зворотному напрямку.

1.3.4 Тепловізійний і пірометричний контроль напівпровідникових перетворювачів

Пірометричний і тепловізійний контроль технічного стану обладнання широко застосовується в багатьох галузях промисловості і дозволяє контролювати стан електрообладнання без виведення його з роботи, виявляти дефекти на ранній стадії, а також скорочувати витрати на технічне обслуговування шляхом прогнозування стану обладнання [15].

					Арк.
					20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

В Україні досвід роботи лабораторії приладів інфрачервоної техніки фірми ОРГРЕС [15] показує, що за допомогою інфрачервоної діагностики в електрообладнанні можна виявити і оцінити значні несправності.

Інфрачервоні пірометри дозволяють вимірювати температуру на відстані до декількох метрів, що виключає небезпеку ураження електричним струмом в високовольтних мережах. Якщо пірометр передбачається застосовувати в високовольтних мережах, то слід приділити увагу важливого параметру пірометра: оптичному дозволу - відношенню діаметра зони вимірювання до відстані до об'єкта (D:L).

Досвід показує, що при діагностиці з використанням приладів інфрачервоної техніки повинні враховуватися конструкція контролюваного обладнання і режим його роботи, а також необхідно враховувати і зовнішні чинники: швидкість вітру, температуру навколишнього середовища, матеріал досліджуваного об'єкта.

На тягових підстанціях Одеської філії була проведена інспекція з використанням тепловізійної діагностики. В ході контролю було перевірено відкриті і закриті розподільчі пристрої, випрямляючі агрегати та інші пристрої. Тепловізійний контроль діодних випрямлячів був здійснений в момент проходження складів при максимальному навантаженні 1500 А. Встановлено, що всі діоди мають однорідним температурним полем з розкидом в кілька градусів (найбільший розкид спостерігався на одній з підстанцій по висоті шаф внаслідок конструкції радіаторів). Перерахунок на максимальний струм (3500 А) показав, що короткочасний перегрів діодів може досягати 110-130°C, що є допустимим. У момент проходження поїздів зазначалося наростання температури діодів, також було рекомендовано через відсутність статистичних відомостей перегріті вузли періодично відстежувати, порівнюючи дані з попередніми вимірами, і тим самим визначати момент виходу температури за граничні значення.

Є також спроби впровадити тепловізійну діагностику для технічного обслуговування електрорухомого складу. Фахівці депо Знам'янка Одеської філії застосували тепловізор ІРТІС-2000 для діагностики електромашинного обладнання електровозів та тепловозів. Встановлено, що на електровозах можна виявляти дефекти в дахове обладнання, акумуляторних батареях, трансформаторах, реакторах, випрямних агрегатах, низьковольтному обладнанні.

Обстеження електрообладнання виконувалося, на електровозах ВЛ80Р, 2ЕЛ5, ВЛ80С, вимірювався залишковий нагрів вузлів після відчеплення від транзитних поїздів. Слід зазначити, що проведення вимірювань безпосередньо під час руху виявилось недостатньо ефективним, оскільки через вібрації і нестабільності положення оператора спотворювалася термограма, що ускладнювало розпізнавання результатів.

1.3.5 Експрес-діагностування напівпровідникових перетворювачів і його апаратна реалізація

Прилад експрес-контролю якості діодів ПЕККД призначений для

						Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прискореного контролю якості СНП типів ВЛ200, ДЛ161-200, Д161-320, ДЛ171-320, рисунок 1.11. ПЕККД дозволяє проводити вимірювання показника якості діода - напівпровідникової структури при певному струмі навантаження. За величиною температури напівпровідникової структури T_{Π} визначається максимально допустимий середній прямий струм діода по залежності $T_{\Pi} = f(I_{FM})$

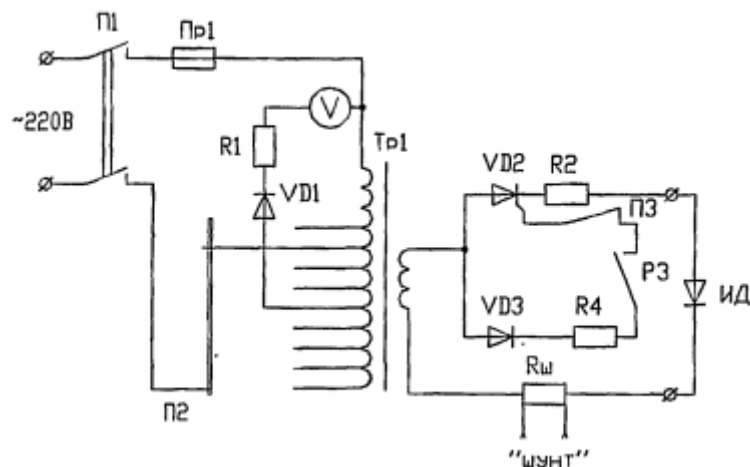


Рисунок 1.11 - Схема силового блоку ПЕККД-3

Гранично допустимої величини T_{Π} відповідає гранично допустима величина I_{FM} . Прилад застосовується при профілактичному обслуговуванні СП тягових підстанцій метрополітену з метою визначення відповідності СНП за параметрами середнього прямого струму і гранично допустимої температури напівпровідникової структури, а також для виявлення потенційно ненадійних СНП [9].

Прилад експрес-діагностики ІМПУЛЬС [16] для перевірки СНП в СП забезпечує можливість виявлення потенційно ненадійних СНП за інтегральним показником якості СНП - температурі напівпровідникової структури, яка вимірюється в режимі еквівалентному режиму граничного струмового навантаження тиристорів. Режим відтворюється формуванням в колі приладу, що діагностується, нормованого імпульсу струму, параметри якого визначаються типом СНП. Однак визначення, теплового опору СНП не дозволяє виявити несправності, пов'язані зі зворотною гілкою ВАХ.

Прилад експрес-діагностики СНП в випрямлячах для тягових підстанцій міського електротранспорту (ПЕД-СНП) проводить вимірювання інтегрального показника якості діодів (температури напівпровідникової структури) в режимі, еквівалентному граничному струмовому навантаженню діода.

Принцип роботи ПЕД-СНП заснований на тому, що температура напівпровідникової структури пов'язана з електричними і тепловими параметрами діода і характеризує його надійність.

Прилад контролю СНП (ПКСНП) застосовується для профілактичного обслуговування перетворювальних агрегатів з метою забезпечення експлуатаційної надійності. ПКСНП виробляє контроль класу по зворотній напрузі і по напрузі в закритому стані тиристорів, а також класу по зворотній

					Арк.
					22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

напрузі діодів. ПКСНП визначає ненадійні тиристори і діоди.

Серія стендів «Крона» здійснює перевірку класу СНП, імпульсного зворотного струму, імпульсного прямого напруги СНП, керуючого струму для тиристорів, але тільки окремо взятих СНП, тобто необхідний демонтаж перетворювальної установки.

Пристрій «Діод-Тестер-СД» призначений для оперативного контролю якості СНП приведено на рисунку 1.12. Приладом проводять вимірювання зворотного струму (до 2,5мА) як одного, так і двох СНП з'єднаних послідовно, при заданій напрузі (до 2000В), при цьому результати вимірювань заносяться в пам'ять. При діагностиці пари СНП вимірюється не тільки зворотний струм, а й розподіл напруги на СНП. Результати вимірювань можна переглянути на ЕОМ. Конструктивно прилад виконаний у вигляді переносного пристрою масою 0,5 кг. «Діод-Тестер-СД» розроблений для діагностики випрямляча ВТПЕД-825 і застосовувати його для діагностики перетворювачів іншого типу, наприклад, перетворювачів з резисторами зв'язку (ВІП4000; УВКМ-5 та ін.) без демонтажу схеми неможливо.

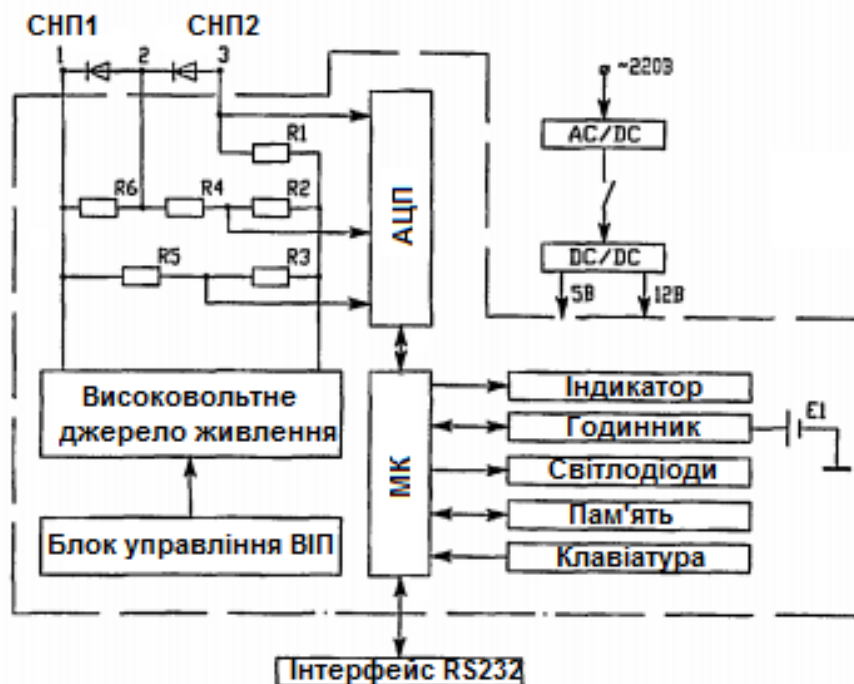


Рисунок 1.12 - Принципова схема

Як приклад використання діагностики для нового типу СНП розглядається поки ще не застосований на транспорті експрес-метод визначення теплового опору силових IGBT-модулів. Розроблений метод дозволяє оперативно визначати, тепловий опір кристал-корпус та її складові силових IGBT-модулів паяної конструкції. При цьому досягаються такі переваги: точність завдяки лінійності і чутливості термозалежних параметрів - падіння напруги на затворі; використання тільки одного датчика струму; зниження похибки вимірювання температури, і зниження ймовірності виходу з ладу досліджуваного ключа; автоматизація процесу обробки результатів вимірювань.

1.4 Мета і завдання дослідження

Незважаючи на різноманіття пристроїв діагностики СНП і перетворювачів, більшість пристроїв має ряд недоліків. Пристрої робочого діагностування застосовують безпосередньо при експлуатації, проте даний вид діагностики визначає СНП або плечі перетворювача, які вже відмовили. Дуже часто пристрої робочого діагностування мають значну кількість допоміжних кіл, які в свою чергу самі можуть бути можливими причинами відмов і тим самим вивести з ладу перетворювач.

Пристрої тестового діагностування дозволяють більш якісно визначити технічний стан перетворювача, виявити відмову. Однак при цьому досить часто необхідний демонтаж обладнання, що призводить в свою чергу до збільшення часу перебування в ремонті і простою, а також до виникнення конкомітантних відмов - відмов, внесених в процесі технічного обслуговування і ремонту, монтажу, демонтажу обладнання.

Крім того, не завжди дотримуються передбачені нормативними документами умови випробувань. У зв'язку з цим для безрозбірного діагностування СП, збільшення його ступеня використання доцільно застосовувати засоби експрес-діагностування, які повинні мати мінімально можливі габарити і масу, мобільність і відрізнятися простотою в обслуговуванні. З економічної точки зору експрес-діагностування повинно проводитися з мінімальними витратами часу і праці.

При сучасному рівні вимірювальної та обчислювальної техніки експрес-діагностування дозволяє виявляти не тільки відмовили СНП в перетворювачі, а і потенційно ненадійні СНП, і, отже, прогнозувати подальший стан СНП і перетворювачів в цілому, тим самим збільшити термін служби перетворювачів.

Метою дипломної магістерської роботи є дослідження теплових і електромагнітних процесів в груповому з'єднанні СНП тягових перетворювачів та розробка нової методики і пристроїв експрес-діагностування НП, що дозволяють виявляти потенційно ненадійні прилади для недопущення відмов в перетворювачі в процесі експлуатації.

						Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АНАЛІЗ ВІДХИЛЕНЬ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУР КОРПУСІВ СНП В ПЛЕЧІ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1 Безконтактний контроль стану СНП в випрямних установках

Інфрачервоні пірометри ThermoPoint 8 ProPlus дозволяють вимірювати температуру на відстані до декількох метрів, що виключає небезпеку ураження електричним струмом в високовольтних мережах.

Джерелом теплоти в СНП є потужність, що виділяється в напівпровідникової структурі. При цьому температура напівпровідникової структури СНП не може бути виміряна безпосередньо. Про неї можна судити непрямым чином по температурі корпусу СНП. При роботі СНП в груповому з'єднанні, перш за все інтерес представляє вид температурної сітки, вузлами якої є окремі СНП. По виду цього розподілу можна судити про справність і працездатності напівпровідникового перетворювача.

У 2015-2019 годах були проведені неодноразові експерименти з контролю температури нагріву корпусу силових діодів типу ДЛ161-200 випрямних установок УВКМ-6 (УВКМ-5), таблиця 2.1 під робочим навантаженням на тягових підстанціях Дніпровського метрополітену за допомогою пірометра Thermopoint 8Pro, а також пірометричний контроль випрямних установок типу ПВЕ-3 підстанцій Одеської залізниці

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики УВКМ-6

Параметри	УВКМ-6
Номінальна випрямлена потужність, МВт	108,9
Номінальний випрямлений струм, А	1600
Номінальна випрямлена напруга Ш, В	825
Номінальна змінна напруга, В	670
Схема випрямлення	Мостова трифазна
Тип силових напівпровідникових приладів (СНП)	ВЛ200 (ДЛ161)
Кількість СНП, шт.	96
Клас СНП	10
Прямий струм, А	200
Зворотний струм, мА	15
Система діагностики	-
Вид охолодження	природне

Слід зазначити, що, потік повітря, що охолоджує СНП, різний для кожного, приладу і залежить від місця розташування вентиляційної камери на тяговій підстанції.

						Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тягове навантаження перетворювача під час випробувань змінювалося в досить широкому діапазоні (від 0 до 1000А). Температура охолоджуючого повітря знаходилась в межах від 22°C до 24°C. Максимальні температури корпусів діодів (в зонах найбільш віддалених від потоку охолоджуючого повітря) досягали 50°C. Незважаючи на значне коливання навантаження під час випробувань, температура корпусів окремих СНП змінювалася незначно від випробування до випробування внаслідок теплової постійної часу СНП в комплекті з охолоджувачем.

Слід зазначити особливості вимірювань температури СНП - різко нерівномірний характер навантаження перетворювача, різні умови роботи СНП з точки зору нагріву - залежність від місцезнаходження СНП (відхилення по струму і напрузі, відмінність за умовами охолодження), розкид теплових опорів.

Температура корпусу СНП T_c (°C) залежить від цілого ряду чинників:

- 1 температури напівпровідникової структури T_j , °C;
- 2 теплових опорів: перехід - корпус R_{thj-a} Вт/м
- 3 корпус -охолоджувач R_{thc-h} , охолоджувач - середовище R_{thh-cf} ;
- 4 швидкості (м / с) і температури охолоджуючого повітря, °C;
- 5 температури навколишнього середовища T_f °C;
- 6 місця розташування СНП в перетворювачі.

При цьому температура напівпровідникової структури:

$$T_j = T_a + (R_{thj-a} + R_{thc-h} + R_{thh-cf}) \cdot P_F,$$

де P_F -потужність теплових втрат СНП, Вт.

З урахуванням того, що вимірюється температура корпусу СНП T_c :

$$T_j = T_c + R_{thj-a} \cdot P_F$$

Таким чином, знаючи температуру корпусу СНП можливо оцінити температуру напівпровідникової структури.

При випробуваннях перетворювача температура корпусу кожного і-го приладу, що знаходиться в j-м паралельному ряду, вимірювалася 5 разів (подальше збільшення числа вимірювань не приводило до помітного підвищення точності результату) і знаходилося її середнє значення $T_{ср.ij}$. Потім обчислювалася середня температура паралельного ряду $T_{ср.i}$. Як приклад в таблиці 2.2 наведені значення середньої температури нагріву корпусу СНП установки метрополітену УВКМ-6

						Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 - Середня температура нагріву корпусу СНП, °С. Шафа КВА2 УВКМ-6, анодна група, вимірювання проведені пірометром ThermoPoint 8 ProPlus

№ ряду	T _{CP} VD1	T _{CP} VD2	T _{CP} VD3	T _{CP} VD4	T _{CP} VD5	T _{CP} VD6	T _{CP} VD7	T _{CP} VD8
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1 ряд	33,04	33,74	33,06	32,44	33,74	33,64	33,18	32,8
2 ряд	34	35,4	35,66	35,52	39,02	34,88	34,72	35
3 ряд	33,4	33,38	33; 7	31,66	33,24	32,52	33,32	33; 5
4 ряд	36,42	33,64	35,06	34,18	34,52	33,64	33,26	33,06
5 ряд	32,18	32,38	32,92	33,74	32,44	33,58	32,42	32,62
6 ряд	33,62	33,32	34,68	35,3	33,68	32,78	32,24	31,8

При перевищенні середньої температури нагріву корпусу СНП по відношенню до середньої температури паралельного ряду даний СНП вважався несправним (наприклад, діод 5 у 2 ряду, таблиця 2.2) і піддавався додатковій перевірці за величиною теплового опору за допомогою приладу ПЕККД-3.

Що стосується окремих випадків розбіжності результатів, то тут перш за все треба приділити увагу додаткового вивчення залежності T_{ij} від конкретного місця розташування СНП в перетворювачі.

Також були проведені експерименти порівняння результатів вимірювань температури нагріву випрямної установки УВКМ-5 за допомогою пірометра і тепловізора ТН5104. Для вимірювань обраний шафа КВА1, катодна група СНП, охолодження природне. СНП - діоди марки ВЛ-200. Конвекційний потік повітря знаходиться в області розташування діодів VD3, VD4, VD5 установки. Результати вимірювань зведені в таблиці 2.3-2.5.

Таблиця 2.3 - Результати вимірювань температури нагріву корпусу СНП пірометром

середнє значення температури	T _{CP} VD1	T _{CP} VD2	T _{CP} VD3	T _{CP} VD4	T _{CP} VD5	T _{CP} VD6	T _{CP} VD7	T _{CP} VD8
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1 ряд	40,76	41,44	38,86	43,32	40,82	41,76	43,42	41,7
2 ряд	38,86	40,42	39,68	39,48	37,98	39,18	41,54	40,46
3 ряд	40,46	39,94	43,5	42,32	41,28	41,26	40,92	39,24
4 ряд	38,04	40,62	40,02	38,54	37,7	36,3	38,74	38,44
5 ряд	37,08	37,54	35,66	32,4	33,92	36,6	38,26	35,7
6 ряд	35,8	36,82	32,7	32,64	28,38	34,32	35,78	35,9

Таблиця 2.4 - Результати повторних вимірів через 1 год. 30 хв. температури нагріву корпусу СНП за допомогою пірометра

середнє значення температури	T _{CPVD1}	T _{CPVD2}	T _{CPVD3}	T _{CPVD4}	T _{CPVD5}	T _{CPVD6}	T _{CPVD7}	T _{CPVD8}
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1 ряд	38,34	39,6	38,84	41,66	39,46	41,72	40,88	39,76
2 ряд	37,02	38,02	38,3	37,52	37,02	37,92	39; 38,	38,76
3 ряд	38,58	40,46	41,26	40,94	39,32	40,72	40,24	37,76
4 ряд	36,48	38,92	37,86,	37,14	36,78	34,14	37,6	36,64
5 ряд	35,76	35,84	34,72	32,42	33,04	35,32	36,52	33,66
6 ряд	34,28	34,92	32,5	31,06	28,32	32,76	34,84	35,9

Таблиця 2.5 - Результати вимірювань температури нагріву корпусу СНП за допомогою тепловізора

середнє значення температури	T _{CPVD1}	T _{CPVD2}	T _{CPVD3}	T _{CPVD4}	T _{CPVD5}	T _{CPVD6}	T _{CPVD7}	T _{CPVD8}
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1 ряд	38,6	40,2	42,3	41,8	41,1	41,4	40,9	40
2 ряд	38,4	39	39,2	38,7	38,3 '	37,7	38,6	38,3 l
3 ряд	40,5	39,8	40	39,6	41,4	38,1	41,5	41,2
4 ряд	37,7	37	36,9	37	37,6	36,8	38,4	37,6
5 ряд	34,6	35,8	35,4	34	35,1	34,2	34,8	32,4
6 ряд	34,9	34,6	21,4	25,5	33,2	32,8	33,3	32,2

За даними таблиць 2.3-2.5 побудовані розподіли температури нагріву корпусів СНП. Приклад розподілу температури корпусів СНП наведено на рисунках 2.2-2.3.

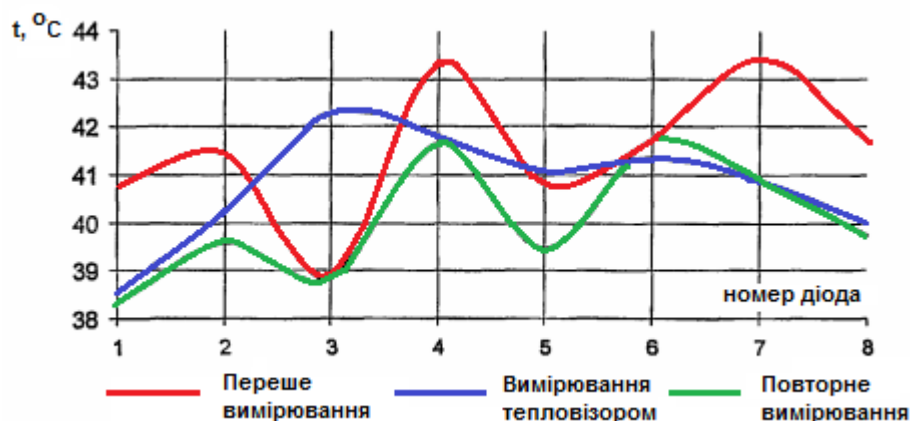


Рисунок 2.2 - Розподіл температури нагріву корпусів діодів 1-ий ряд зверху

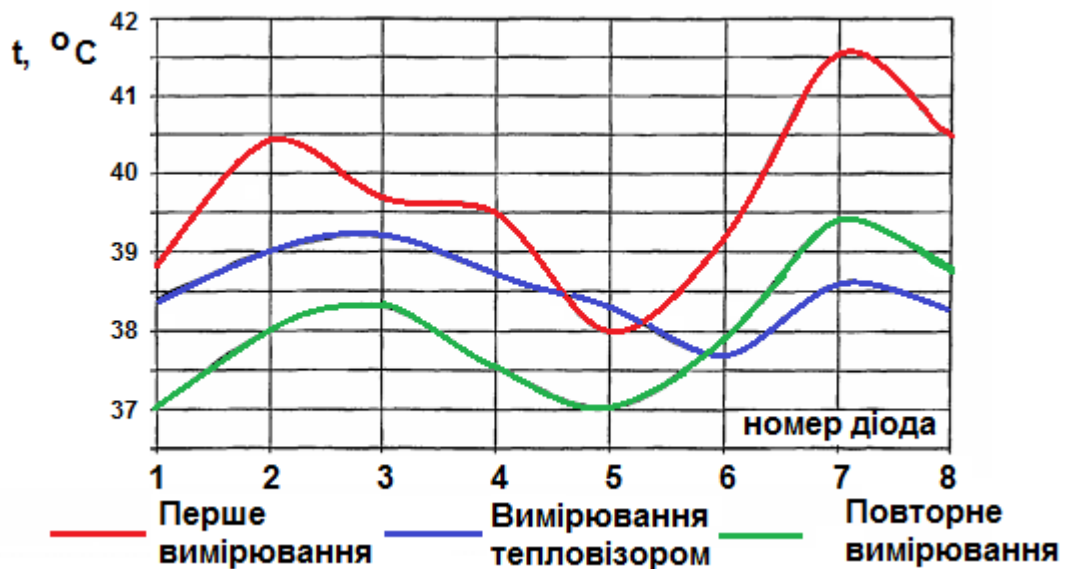


Рисунок 2.3 - Розподіл температури нагріву корпусів діодів 2-ий ряд зверху

Як було зазначено раніше, незважаючи на різко нерівномірний характер навантаження, температура корпусу СНП в процесі експериментів змінювалася незначно, так теплова постійна часу системи досить велика. При цьому простежувалися досить помітні відмінності температур між паралельними рядами (що обумовлено нагріванням охолоджуючого повітря) і між окремими СНП паралельного ряду (що викликано розходженням в теплових опорах, навантаженнях і розташування СНП).

2.2. Метод обробки результатів вимірювань

З метою більш точного виявлення потенційно ненадійних СНП в перетворювачі при пірометричній контролі пропонується спосіб обробки результатів експрес-діагностики, в основу якого покладено прийом «еталонної задачі». Він складається в аналізі відхилень розподілу температур, отриманого експериментальним шляхом, від вирішення спеціальним чином поставленого завдання для рівняння теплопровідності зі стохастичним джерелом теплоти.

Передбачається, що до початкового моменту часу $t = 0$ температура однакова у всій області. У початковий момент часу в фіксованій області $D^* \subset D$ виникає і при $t > 0$ підтримується джерело теплоти, потужність якого визначається параметрами СНП. У той же момент часу виникає, і в подальшому підтримується, постійне примусове охолодження (відповідно до положення вентилятора). Математична модель описаного процесу може бути сформульована у вигляді змішаної крайової задачі для рівняння з джерелом типу рівняння Бюргерса:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + b \frac{\partial T}{\partial y} + \omega(\bar{x}, t) \quad (2.1)$$

$$\omega(\bar{x}, t) = \begin{cases} \omega, \bar{x} \in D^* \\ 0, \bar{x} \notin D^* \end{cases} \quad (2.2)$$

$$T(\bar{x}, 0) = \begin{cases} T_s, \bar{x} \in D^* \\ T_0, \bar{x} \notin D^* \end{cases}, \quad T_n|_G = T^o(t), \quad (2.3)$$

де $T = T(\bar{x}, t)$ - значення температури в точці з декартовими координатами $\bar{x}$ в момент часу t °C; c - питома теплоємність, Дж/(кг*К); ρ - щільність, кг/м³; λ - теплопровідність, Вт/(м*К); $b = b(\bar{x}, t)$ - коефіцієнт, що враховує тепловіддачу за рахунок охолоджуючих потоків повітря Вт/(м³*К); $\omega(\bar{x}, t)$ - коефіцієнт, що враховує тепловиділення за рахунок внутрішніх джерел теплоти, Вт/м³; $T_n|_G$ - похідна температури до напрямку зовнішньої нормалі.

Співвідношення (2.3) описують початковий розподіл температури і характер зміни теплового потоку (природне і примусове охолодження) на кордоні G області D зміни просторових змінних.

$$\omega(\bar{x}, t) = \begin{cases} \omega, \bar{x} \in D^* \\ 0, \bar{x} \notin D^* \end{cases}$$

Питома тепловиділення вважається випадковою величиною, закон розподілу якої визначається навантаженням, а також теплофізичними властивостями матеріалу і параметрами СНП.

2.3 Метод сіток рішення крайової задачі для рівняння теплопровідності

Завдання (2.1) - (2.3) є завданням для рівняння математичної фізики з стохастическим джерелом. Аналітичне рішення такого завдання можливе в деяких окремих випадках [16]. Тому її рішення вимагає застосування чисельних методів. З урахуванням геометрії розрахункової області і не дуже великих градієнтів температур в даному випадку доцільно застосування методу сіток (метод кінцевих різниць) в поєднанні з методом статистичного моделювання для побудови рішення «еталонної» завдання.

Для чисельного рішення задачі (2.1) - (2.3) використаний метод сіток. Геометрія розглянутої задачі така, що область зміни просторових змінних може бути апроксимована прямокутником без внесення похибки, пов'язаної з заміною реального контуру області сітковим контуром. Зазначений прямокутник згідно з методом сіток замінюється прямокутною ґратчастою областю D^* з кордоном G^* , тобто сукупністю вузлів $\{x_i, y_i, t_k\}$ прямокутної сітки з кроками h (просторовий інтервал) і τ (часовий інтервал). Відповідні похідні замінені їх різницевиими аналогами, які отримуються на основі розкладання рішення в ряд Тейлора:

					Арк.
					30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{i,j+1,k+1} - T_{i,j,k}}{\tau}, \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial x} \approx \frac{\lambda_{i+1,j} - \lambda_{i-1,j}}{2h}, \quad \frac{\partial \lambda}{\partial y} \approx \frac{\lambda_{i,j+1} - \lambda_{i,j-1}}{2h}, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \approx \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2h} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}}{h^2}, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}}{h^2} \quad (2.6)$$

і т.д., де $T_{ij} = T(x_i, y_j)$ - наближене значення функції T в вузлі $\{x_i, y_i\}$.

Існує багато способів заміни похідних їх різницевиими аналогами, що призводить до різницевих схем різної складності [16]. Вибір способу залежить від величини градієнта температури, від необхідної точності розрахунку, співвідношення кроків сітки, що впливає на стійкість різницевої схеми. При цьому задача зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь, що дає наближене рішення.

2.4 Метод статистичного моделювання

Рішення «еталонної» завдання передбачає використання метода сіток в поєднанні з методом статистичного моделювання, який являє собою чисельний метод, в основі якого лежить моделювання випадкових величин (ВВ), і статистична оцінка їх характеристик за допомогою теорії ймовірностей. Згідно найпростішій схемі реалізації методу статистичного моделювання для обчислення деякої детермінованій (невипадковій) величини U розглядається допоміжна випадкова величина ξ , математичне очікування якої дорівнює шуканій величині:

$$M\xi = U$$

Проводиться N незалежних випробувань; в результаті яких генерується послідовність випадкових чисел $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$, які мають однаковий розподіл. Відомо, що послідовність однаково розподілених незалежних ВВ; у яких існує математичне очікування, підкоряється закону великих чисел, тому середнє арифметичне

$$\bar{\xi} = \frac{\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_N}{N}$$

сходиться по імовірності до $E\xi$. Таким чином, при великих N можна наближено вважати:

$$U(A) \approx E\bar{\xi} = \frac{\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_N}{N} \quad (2.7)$$

Допускається при цьому похибку можна оцінити у вигляді довірчого інтервалу, що містить її із заданою імовірністю, за допомогою центральної

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	31

граничної теореми (якщо припустити додатково, що випадкова величина ξ має кінцеву дисперсію $D\xi$):

$$P\left\{\left|\bar{\xi} - U(A)\right| < z\sqrt{\frac{D\xi}{N}}\right\} \approx \Phi(z), \quad (2.8)$$

де $\Phi(z)$ - інтеграл ймовірностей;

Вираз (2.8) використовують для оцінки верхньої межі похибки R_N (з коефіцієнтом довіри 0,997) і оцінки порядку похибки r_N (з коефіцієнтом довіри 0,5):

$$R_N = 3\sqrt{\frac{D\xi}{N}}; \quad r_N = 0.6745\sqrt{\frac{D\xi}{N}}. \quad (2.9)$$

2.4.1 Використовувані імовірнісні розподіли

За сучасними уявленнями закони розподілу технічних характеристик пристроїв і виробів масового виробництва, що проходять контроль якості, описуються розподілами, зосередженими на кінцевому проміжку. Це означає, що для відповідної випадкової величини імовірність прийняти значення, які не належать інтервалу (α, β) , дорівнює 0. Щільність імовірності усіченого розподілу, відповідного вихідного розподілу з функцією щільності $f(x)$, визначається формулою:

$$f(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} 0, & x < \alpha, x > \beta \\ \frac{f(x)}{F(\beta) - F(\alpha)}, & \alpha \leq x \leq \beta \end{cases}$$

Ступінь усічення характеризується імовірністю того, що вихідна (неусічена) випадкова величина $X_{исх}$ виявиться поза інтервалу (α, β)

$$P\{X_{исх} \notin (\alpha, \beta)\} = 1 - [F(\beta) - F(\alpha)]$$

Усічений розподіл визначається параметрами вихідного розподілу і точками усічення α і β .

Функція розподілу $F(x; \alpha, \beta)$ усіченого розподілу пов'язана з функцією розподілу $F(x)$ вихідного розподілу співвідношенням:

$$F(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < \alpha \\ \frac{F(x) - F(\alpha)}{F(\beta) - F(\alpha)} & \text{при } \alpha \leq x \leq \beta \\ 1 & \text{при } x > \beta \end{cases}$$

Аналіз даних про технічні характеристики СНП показує, що їх імовірнісні розподіли можуть бути описані усіченим на кінцевий проміжок нормальним розподілом, або усіченим розподілом Вейбулла [16].

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

2.4.2 Усічений нормальний розподіл

Щільність імовірності усіченого нормального розподілу:

$$f(x) = \frac{1}{\gamma \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), \alpha \leq x \leq \beta, \quad (2.10)$$

де α, β - ліва і права точки усічення (межі області можливих значень випадкової величини); σ - параметр масштабу ($\sigma > 0$).

$$\gamma = \Phi_0\left(\frac{\beta-m}{\sigma}\right) - \Phi_0\left(\frac{\alpha-m}{\sigma}\right).$$

Число $1-\gamma$, рівне імовірності того, що вихідна (неусічена) нормальна випадкова величина виявиться поза інтервалу (α, β) , називається ступенем усічення. Функція розподілу:

$$F(x) = \frac{1}{\gamma} \left[\Phi_0\left(\frac{x-m}{\sigma}\right) - \Phi_0\left(\frac{\alpha-m}{\sigma}\right) \right], \alpha \leq x \leq \beta.$$

Математичне очікування:

$$E\xi = m + \frac{\sigma}{\gamma} [\varphi(u_1) - \varphi(u_2)], \quad (2.11)$$

де $\varphi(i)$ - щільність імовірності стандартного нормального розподілу;
 $u_1 = (\alpha - m)/\sigma$; $u_2 = (\beta - m)/\sigma$ - стандартизовані (центровані, нормовані) точки усічення

Дисперсія

$$\begin{aligned} D\xi &= \sigma^2 \left\{ 1 + \frac{1}{\gamma} [u_1 \varphi(u_1) - u_2 \varphi(u_2)] - \frac{1}{\gamma^2} [\varphi(u_1) - \varphi(u_2)]^2 \right\} = \\ &= \sigma^2 \left\{ 1 + \frac{1}{\gamma} [u_1 \varphi(u_1) - u_2 \varphi(u_2)] \right\} - (\bar{x} - m)^2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Для отримання формули моделювання, що дозволяє обчислювати квантілі x_p заданого порядку p для усіченого нормального розподілу можна використовувати формулу:

$$x_p = m + \sigma \cdot u_{(1-\alpha-\beta)p+\alpha} \quad (2.13)$$

де u_p - p -квантіль стандартного нормального розподілу; m - параметр положення; σ - параметр масштабу; α, β - ліва і права точки усічення області можливих значень випадкової величини).

2.4.3 Усічений розподіл Вейбулла

Щільність імовірності розподілу Вейбулла

					Арк.
					33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < \alpha, x > \beta \\ \frac{acx^{a-1}e^{-(cx)^a}}{e^{-(c\alpha)^a} - e^{-(c\beta)^a}} & \text{при } \alpha \leq x \leq \beta \end{cases} \quad (2.14)$$

функція розподілу

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < \alpha \\ \frac{e^{-(c\alpha)^a} - e^{-(cx)^a}}{e^{-(c\alpha)^a} - e^{-(c\beta)^a}} & \text{при } \alpha \leq x \leq \beta \\ 1 & \text{при } x > \beta \end{cases} \quad (2.15)$$

Вирази для математичного очікування і дисперсії дуже громіздкі. Тому для обчислення основних числових характеристик розподілу з функцією щільності (2.14) доцільно використовувати чисельні методи.

p-квантіль:

$$x_p = -\frac{\sqrt[a]{\ln(e^{-(c\alpha)^a} - (e^{-(c\alpha)^a} - e^{-(c\beta)^a})p)}}{c} \quad (2.15)$$

У таблиці 2.6 наведена коротка характеристика використовуваних розподілів імовірності.

Формули (2.13) і (2.15) є моделюючими формулами для розглянутих розподілів, оскільки дозволяють по заданому значенню імовірності обчислювати квантіль порядку p - таке значення x_p неперервної випадкової величини X, для якого виконується умова:

$$P\{X < x_p\} = p.$$

Отримавши N значень p, отримують стандартний нормальний розподіл і застосовуючи моделюючий прийом (2.13), отримаємо вибірку обсягу N з усіченого нормального розподілу. Отримавши N значень p, рівномірно розподілених в проміжку (0, 1) і застосовуючи моделюючу формулу (2.15), отримаємо вибірку обсягу N з усіченого розподілу Вейбулла.

Зазначені розподілу були використані в якості гіпотез для опису законів розподілу параметрів СНП. Перевірка цих гіпотез з використанням статистичних критеріїв χ^2 і Колмогорова на різних рівнях значущості показує, що параметри СНП можна вважати розподіленими по усіченому на кінцевий проміжок нормальному закону.

2.5 Чисельне рішення еталонної задачі

Рішення «еталонної» завдання включає в себе кілька етапів. Основні

						Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

етапи і порядок їх виконання представлені на наступній блок-схемі (рисунок 2.4):

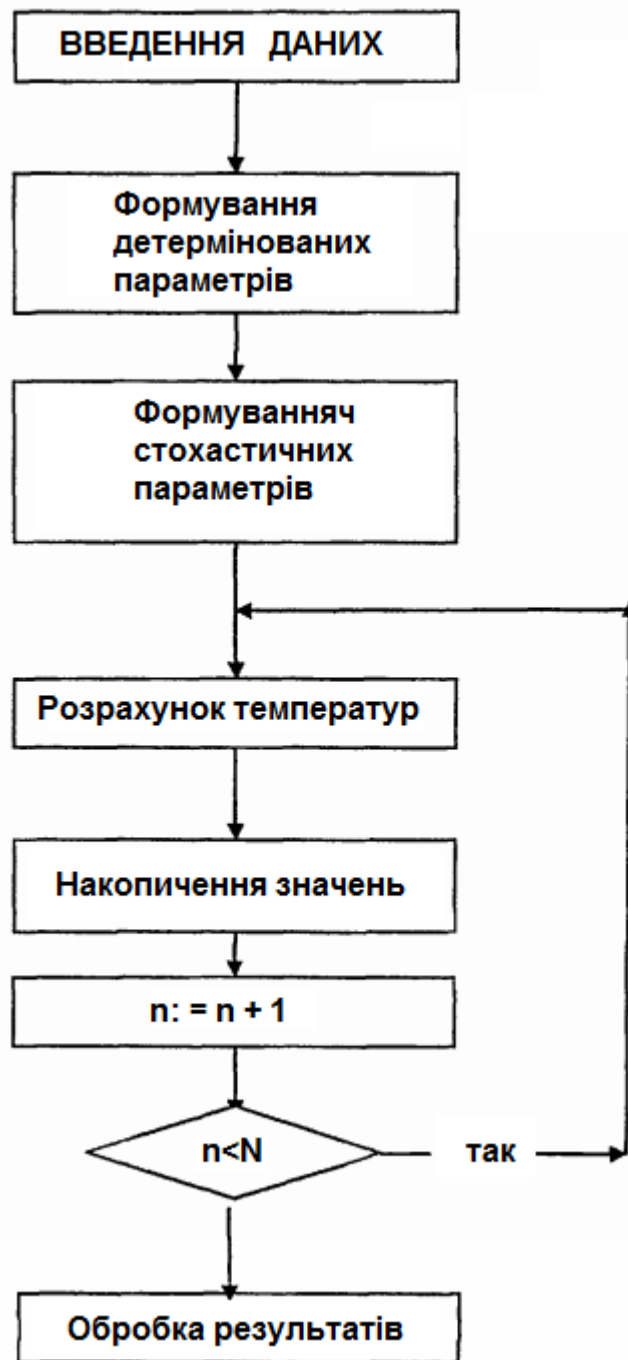


Рисунок 2.4 - Блок схема рішення «еталонної задачі»

Слід зазначити, що введення даних передуює етап, що не відбитий на блок-схемі, який пов'язаний з аналізом закону розподілу стохастичних параметрів і визначенням необхідного обсягу вибірки N .

2.5.1 Побудова різницевої схеми

Для чисельного рішення задачі (2.1) - (2.3) введена прямокутна сітка. Кроки сітки обрані таким чином, щоб крок h по просторовим змінним був оптимальним з точки зору критерію «час обчислення - точність», а крок за часом τ задовольняв умові, що гарантує стійкість різницевої схеми:

$$\tau \leq \frac{h^2}{4 \max \lambda_{i,j,k}} \cdot \min(c_{i,j,k} \rho_{i,j,k})$$

Використано різнищеві похідні виду:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}}{\tau}, \quad \frac{\partial \lambda}{\partial x} \approx \frac{\lambda_{i+1,j,k} - \lambda_{i-1,j,k}}{2h};$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial y} \approx \frac{\lambda_{i,j+1,k} - \lambda_{i,j-1,k}}{2h};$$

$$\frac{\partial b}{\partial y} \approx \frac{b_{i,j+1,k} - b_{i,j-1,k}}{2h};$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}}{2h}; \quad \frac{\partial T}{\partial y} \approx \frac{T_{i,j+1,k} - T_{i,j-1,k}}{2h};$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i+1,j,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i-1,j,k}}{h^2}; \quad \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_{i,j+1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j-1,k}}{h^2}.$$

где $T_{i,j,k} = T(x_i, y_j, t_k)$, $\lambda_{i,j,k} = \lambda(x_i, y_j, t_k)$, $\rho_{i,j,k} = \rho(x_i, y_j, t_k)$;
 $b_{i,j,k} = b(x_i, y_j, t_k)$.

В результаті отримана різнищева схема виду:

$$\begin{aligned} c_{i,j,k} \rho_{i,j,k} \frac{T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}}{\tau} = & \frac{\lambda_{i,j,k}}{h^4} (T_{i-1,j,k} + T_{i+1,j,k} + T_{i,j-1,k} + T_{i,j+1,k} - 4T_{i,j,k}) + \\ & + \frac{(\lambda_{i+1,j,k} + \lambda_{i-1,j,k})(T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k})}{4h^4} + \frac{(\lambda_{i,j+1,k} + \lambda_{i,j-1,k})(T_{i,j+1,k} - T_{i,j-1,k})}{4h^4} + \\ & + b_{i,j,k} \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}}{2h} + \omega_{i,j,k+1} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Для розв'язання задачі використано алгоритм біжить рахунку, ідея якого полягає в тому, що, знаючи розподіл температур на попередньому часовому кроці, можна визначити значення температур на наступному з рівняння (2.16) в кожному вузлу сітки. Значення на кордоні розглянутій області задані граничними умовами. Початкові умови дають інформацію про розподіл температур на нульовому часовому шарі, дозволяючи обчислити значення температури на першому часовому шарі, за отриманими значеннями - на другому і т.д.

Похибка рішення «еталонної задачі визначається похибкою вихідних даних, величиною кроків сітки і кількістю прогонів моделі. Для прийняття рішення про стан СНП результати статистичної обробки отриманої вибірки

					Арк.
					36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

зіставляють з результатами експерименту.

2.5.2 Обробка розрахункових значень температури нагріву корпусу СНП

Обробка розрахункових значень температури нагріву корпусу, СНП, отриманих в результаті рішення еталонної задачі, проводилася по наступною схемою: первинна обробка (побудова гістограми, обчислення основних числових характеристик); формулювання гіпотез про закон розподілу досліджуваної величини; перевірка гіпотез з метою вибору робочої гіпотези і побудови довірчого інтервалу для рішення еталонної задачі.

Формулювання простих гіпотез в даному випадку вимагає отримання оцінок параметрів розподілу.

Для визначення за вибірковими даними $X_N = (X_1, X_2, \dots, X_N)$ параметрів розподілу з відомою функцією щільності в роботі може бути використаний метод максимальної правдоподібності, згідно з яким в якості оцінки параметрів розподілу вибирається така сукупність їх значень, яка доставляє максимум функції правдоподібності (або логарифмічної функції правдоподібності).

Якщо розподіл описується функцією розподілу

$$F(x, \theta) = P(x_k < x) \quad k=1..n$$

і має щільність $p(x, \theta)$, то функція правдоподібності вибірки X цього розподілу має вигляд

$$L = L(x_1, \dots, x_n, \theta) = p_{x1}(\theta) \cdot p_{x2}(\theta) \cdot \dots \cdot p_{xn}(\theta).$$

Логарифмічна функція правдоподібності вибірки X_n усіченого нормального розподілу з функцією щільності (2.10) має вигляд

$$\ln L(X_N, m, \sigma, x_\alpha, x_\beta) = -N \left(\ln(\beta - \alpha) + \ln \sigma + \frac{\ln(2\pi)}{2} \right) - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - m)^2}{2\sigma^2} \quad (2.17)$$

Логарифмічна функція правдоподібності вибірки X_m усіченого розподілу Вейбулла з функцією щільності (2.14) має вигляд

$$\ln L(X_N, a, c, \alpha, \beta) = N(\ln a + \ln c - \ln(e^{-(c\alpha)^a} - e^{-(c\beta)^a})) + \sum_{i=1}^N (\ln x_i^{a-1} - (cx_i)^a) \quad (2.18)$$

Таким чином, завдання знаходження параметрів зазначених розподілів пов'язана з вирішенням завдання пошуку максимуму функції багатьох змінних.

2.5.3 Опис обчислювального експерименту

Для чисельного рішення «еталонної» завдання і зіставлення отриманого поля температур з результатами експериментів використаний спеціально розроблений комплекс програмних модулів на базі системи MATLAB.

Програмний модуль містить функції для: підготовки даних для моделювання; виконання статистичного моделювання поля температур; рішення

					Арк.
					37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

методом сіток завдання про поширення теплоти; проведення статистичної обробки результатів моделювання; зіставлення результатів моделювання з експериментальними даними.

Вибір системи в якості програмного середовища обумовлений властивостями системи MATLAB:

1 Матрична орієнтованість системи, що має принципове значення для реалізації методу сіток.

2 Наявність вбудованих функцій, що реалізують сучасні чисельні алгоритми рішення для даного дослідження задач.

3 Відкритість коду, що дає можливість аналізувати запрограмовані алгоритми і, при необхідності, змінювати їх.

4 Досить проста вбудована мова програмування;

5 Наявність датчика випадкових чисел. У сучасних версіях системи MATLAB використовуються датчики, засновані на фібоначчійових алгоритмах. Перевага фібоначчійових датчиків полягає в тому, що отримані випадкові числа мають гарні статистичними властивостями, причому всі біти випадкового числа рівнозначні за статистичними властивостями.

6 MATLAB володіє добре розвиненими можливостями візуалізації даних.

Висновки по 2 розділу

1 Встановлено, що при проведенні повторних вимірів температури корпусу СНП результати, а саме середні значення температури нагрівання корпусів СНП мають максимальне розбіжність на 0,5%. При порівнянні даних пірометричного і тепловізійного контролю результати вимірювань відрізняються на 2%.

2 Розроблено методику розрахунку температурного стану СНП ПП з груповим з'єднанням, заснована на чисельному рішенні задачі для рівняння теплопровідності зі стохастичним джерелом.

3 Запропоновано методику виявлення потенційно ненадійних СНП в СП безпосередньо в експлуатації, в основу якої покладено прийом «еталонної» завдання, для вирішення якої застосований метод сіток в поєднанні з методом статистичного моделювання;

4 В результаті аналізу даних технічних характеристик СПИ встановлено; що їх імовірнісні розподілу можуть бути описані усіченими на кінцевий проміжок нормальним розподілом і розподілом Вейбулла;

5 Дана методика виявлення потенційно ненадійних СНП реалізована в системі MATLAB у вигляді програмного модуля і може бути використана як програмний супровід пірометричного контролю.

6 При періодичному пірометричній контролі СП і застосуванні даної методики виявлення потенційно ненадійних СНП можна проводити прогнозування технічного стану СП в режимі експлуатації.

						Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ЗВОРОТНИХ СТРУМІВ СНП В ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З РЕЗИСТОРАМИ ЗВ'ЯЗКУ

3.1 Вибір схеми заміщення СНП

За ступенем універсальності схеми заміщення СНП поділяють на статичні та динамічні, малого і великого сигналів, низькочастотні і високочастотні. Найбільш точною і універсальною буде динамічна високочастотна модель великого сигналу. Моделі великого сигналу відносяться до нелінійних моделей, що описуються нелінійними рівняннями, моделі малого сигналу відносять до лінійних моделям [16]. Так наприклад, для побудови статичної схеми заміщення повну ВАХ діода, зображену на рисунку 3.1, представляють відрізками прямих так, що вони найкращим чином апроксимували реальну характеристику в заданому режимі експлуатації.

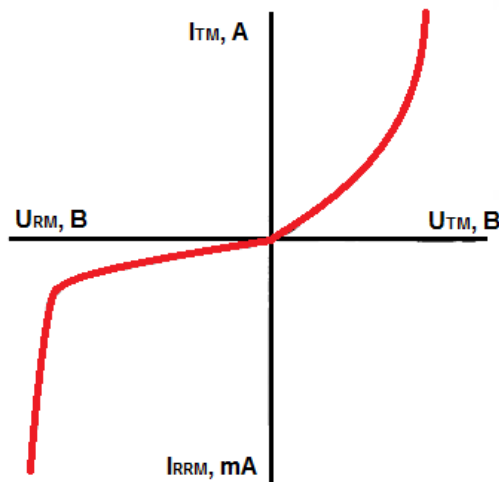


Рисунок 3.1 - ВАХ діода

Реальну ВАХ поділяють за допомогою січних прямих на три області:
Область провідності $U_d > U_{до}$;

$$U_d = U_{до} + I_d r_{дин}.$$

Область відсічки $-U_{проб} < U_d < U_{до}$;

$$U_d = -I_d r_{ут} + I_{до} r_{ут}.$$

Область пробую $U_d < -U_{проб}$;

$$U_d = -U_{проб} - I_d r_{проб}.$$

Дані вирази відповідають схемам заміщення, рисунок 3.2.

						Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

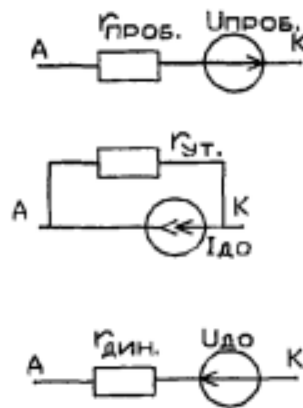


Рисунок 3.2 - Статична схема заміщення діода для малого сигналу

Динамічну модель діода отримують додаванням до «ідеального» діоду елементів, що враховують реальні параметри, рисунок 3.3.

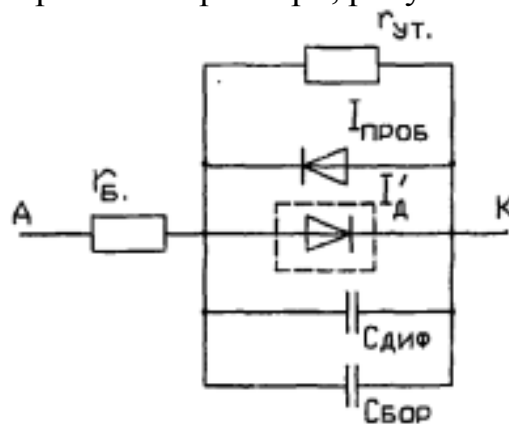


Рисунок 3.3 - Динамічна модель діода

В [1] представлені способи побудови моделей діодів в залежності від пропонованої точності і методу аналізу, перевага віддається нелінійним моделям СНП, рисунок 3.4.

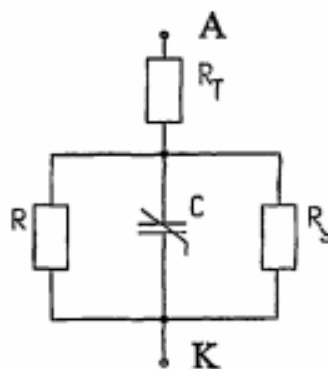


Рисунок 3.4 - Еквівалентна схема $p-n$ - переходу діода

На рисунку 3.4 схема описується: R -нелінійним опором, які мають ВАХ ідеального $p-n$ - переходу діода $i = I_0(e^{u/KT} - 1)$, де I_0 в залежності від площі структури має значення від 10^{-6} до 10^{-2} мА і залежить від температури;

нелінійної ємністю C , представленій як сума бар'єрної C_b і дифузійної C_d ємностей переходу: $C = C_b + C_d$; R_y - опором p - n - переходу при зворотному зміщенні, МОм; R_T - тепловим опором. На рисунку 3.5 представлена модель, що враховує апроксимацію прямий ВАХ діода, зворотна гілка ВАХ ідеалізована.

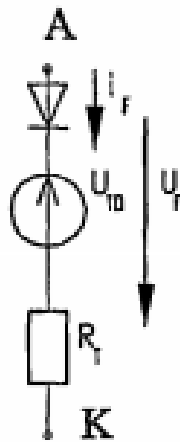


Рисунок 3.5 - Схема заміщення прямої ВАХ діода

Для рисунка 3.5

$$u_F = U_{(TO)} + i_F R_T \text{ и } i_R = 0;$$

$$I_F = 0, \text{ при } u_F < U_{(TO)};$$

$$I_F = (u_F - U_{(TO)}) / R_T, \text{ при } u_F > U_{(TO)}.$$

В моделі на рисунку 3.6 враховується пряма і зворотна ВАХ діода. Зворотна гілка апроксимована двома відрізками, що характеризуються напругою пробією U_{BR} і диференціальним опором R_R .

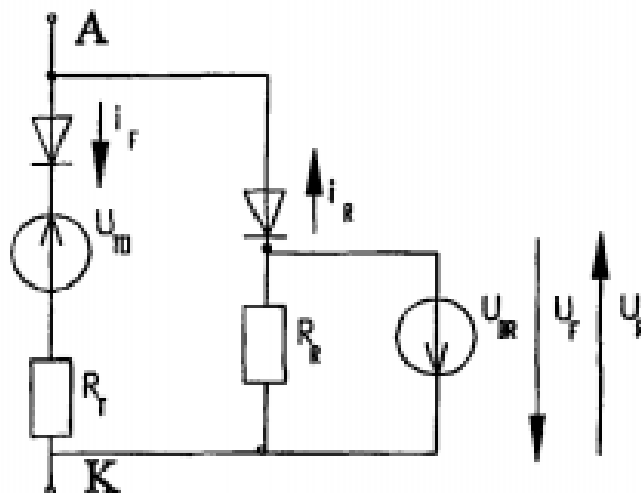


Рисунок 3.6 Схема заміщення зворотної ВАХ діода

Для даної моделі

$$u_F = U_{(TO)} + i_F R_T, \quad u_R = i_R R_R.$$

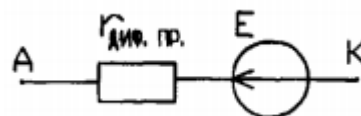
$$i_R = u_R / R_R, \text{ при } u_R < U_{BR};$$

$$i_R = \infty, \text{ при } u_R \geq U_{BR};$$

$$i_F = 0, \text{ при } u_F \leq U_{(TO)};$$

$$i_F = (u_F - U_{(TO)}) / R_T, \text{ при } u_F > U_{(TO)}.$$

В [16] представлені схеми заміщення прямої ВАХ, рисунок 3.7 і зворотної ВАХ, рисунок 3.8.



$$E = i(R + r_{\text{дифпр}}) + U_0$$

Рисунок 3.7 - Схема заміщення прямої ВАХ

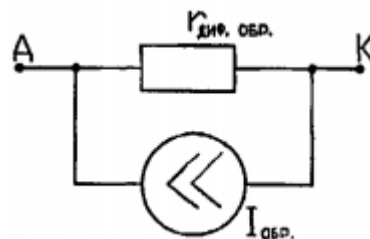


Рисунок 3.8 - Схема заміщення зворотної ВАХ

Диференціальний опір для обох схем заміщення діодів обчислюються за допомогою апроксимації прямої і зворотної ВАХ відповідно.

В [16] діод моделюється резистором R , котушкою індуктивності L і джерелом постійного струму, сполученим послідовно з ключем, рисунок 3.9. Ключ контролюється напругою «анод-катод» U_{AK} і струмом «анод-катод» i_{AK} . Блок-модель діода також включає в себе послідовний RC - контур, який зазвичай включають паралельно діоду.

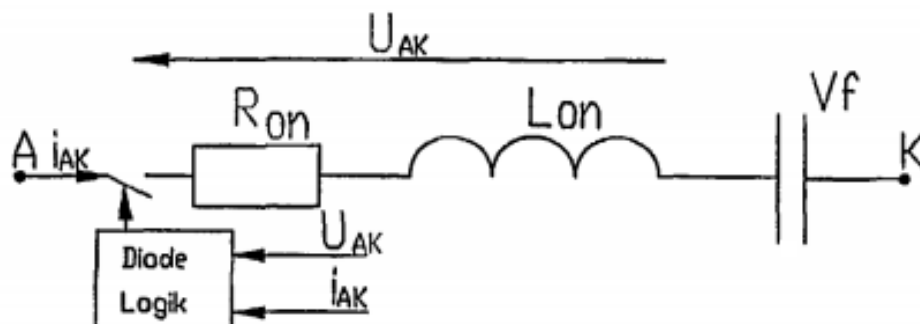


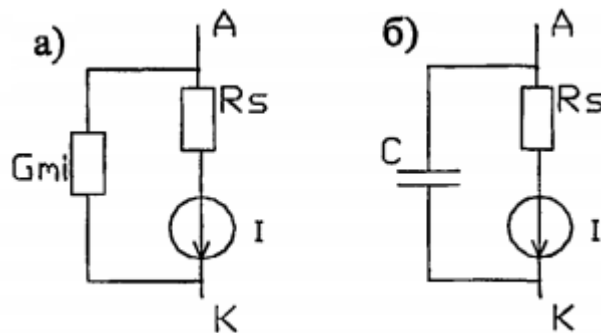
Рисунок 3.9 - Модель діода в MATLAB

У провідному стані діод має внутрішнє R і L (L вводиться в програму, не може мати нульове значення). У закритому стані повний опір діода нескінченний: перший вхід - елементне з'єднання з анодом; перший вихід - елементне з'єднання з катодом; другий вихід - вимірювальний (струм, напруга). Згідно з умовами індуктивність не може бути встановлена рівною нулю.

Початковий струм I_s зазвичай встановлюють рівним нулю, так щоб моделювання починалося з виключення діода.

Допущення і обмеження. Не враховуються струми витoku і зворотний струм. Щоб запобігти утворенню замкнутого контуру індуктивність діода повинна бути встановлена такою, що не дорівнює нулю.

Статична характеристика реального діода в пакеті EWB розділена на прямі і зворотні ВАХ [17].



а) пряма ВАХ; б) зворотна ВАХ: R_g - об'ємний опір, Ом; C - ємність переходу, Ф; G_{mi} - провідність, обумовлена витоками, См; I - джерело струму, А.

Рисунок 3.10 - Еквівалентні схеми діода в EWB

У пакеті MULTISIM запропонована схема заміщення діода, рисунок 3.11 [18].

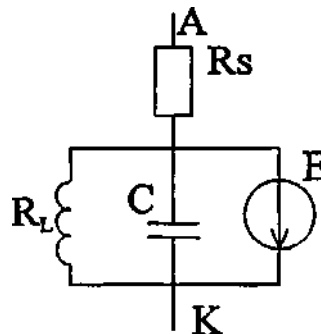


Рисунок 3.11 - Схема заміщення діода в MULTISIM

СНП, математичні моделі яких вбудовані в програму Pspice, описуються великою кількістю параметрів, що задаються за допомогою програми. Схема заміщення діода, рисунок 3.12, складається з ідеального діода, зображеного у вигляді нелінійного залежного джерела струму $I(U)$, ємності $p-n$ - переходу C і об'ємного опору R_s .

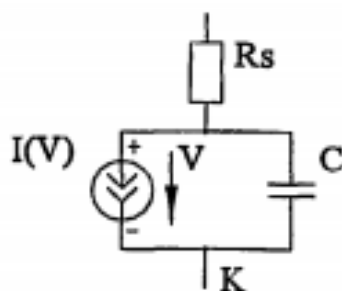


Рисунок 3.12 - Схема заміщення діода в Pspice

Параметри математичної моделі діода в Pspice аналогічні параметрам в MULTISIM.

3.2 Аналіз струмозподілу перетворювача на прикладі випрямної установки УВКМ-5

Як об'єкт дослідження в прийнята установка метрополітену з діодами типу ДЛ161-200 і резисторами зв'язку 10 Ом.

Розподіл зворотних струмів діодів здійснюється на лінійній ділянці ВАХ. В цьому режимі з урахуванням характеру зміни робочої ділянки зворотної гілки ВАХ діод може бути замінений лінійним резистором.

Схема заміщення плеча перетворювача в режимі діагностування приведена на рисунку 3.13.

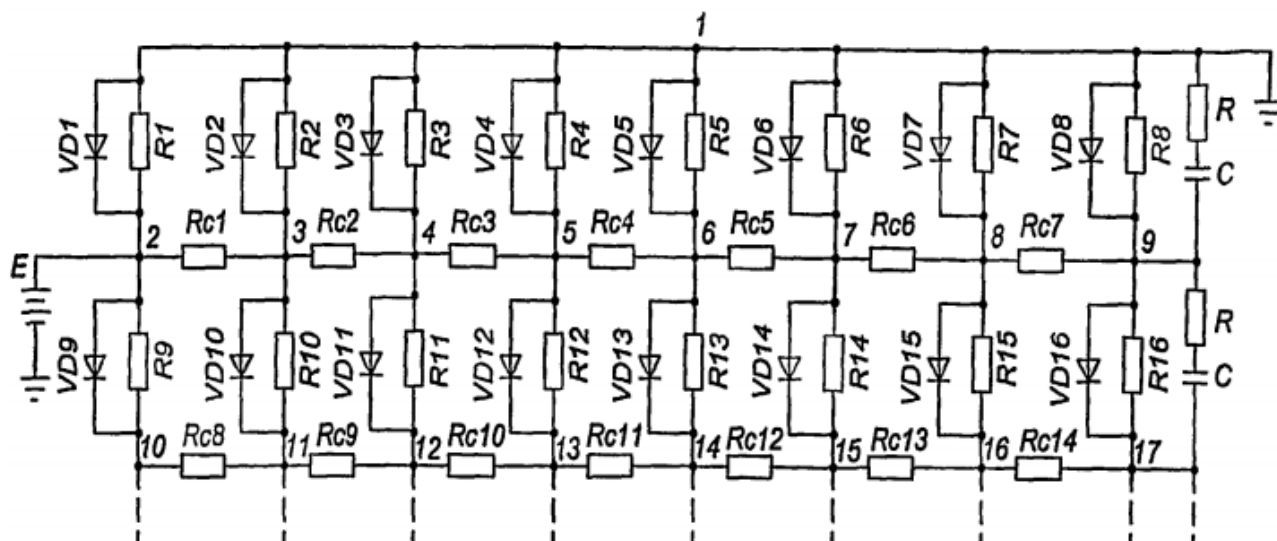


Рисунок 3.13 - Схема заміщення для верхнього ряду СНП випрямного плеча УВКМ в режимі діагностування

Для розрахунку схеми використаний метод вузлових напруг.

Метою дослідження є оцінка розподілу зворотних струмів і провідності гілок випрямної установки при експрес-діагностування без демонтажу перетворювача.

Для вирішення даного завдання спочатку визначаються значення опорів резисторів зв'язку, а потім після подачі випробувального сигналу - падіння

					Арк.
					44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

напруги на них. Для оцінки параметрів СНП верхнього ряду установки послідовно подається на вузли 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 випробувальний сигнал, а вузол 1 постійно заземлений. Для оцінки параметрів СНП нижнього ряду установки послідовно заземлюються вузли 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9; а на вузол 1 постійно подається випробувальний сигнал. Після вимірювання падіння напруги на резисторах зв'язку складаються системи вузлових рівнянь, в яких невідомими не є потенціали, а провідності гілок G . При цьому $G = 1/R$, C_m , φ - електричний потенціал V .

Приклад системи рівнянь для вузла 2:

$$\varphi_1=0; \quad \varphi_2=E;$$

$$\begin{aligned} &\varphi_3 \cdot (G_2 + G_{c1} + G_{c2} + G_{10}) - \varphi_4 \cdot G_{c2} - \varphi_{11} \cdot G_{10} = E \cdot G_{c1}; \\ &-\varphi_3 \cdot G_{c2} + \varphi_4 \cdot (G_3 + G_{c2} + G_{c3} + G_{11}) - \varphi_5 \cdot G_{c3} - \varphi_{12} \cdot G_{11} = 0; \\ &-\varphi_4 \cdot G_{c3} + \varphi_5 \cdot (G_4 + G_{c3} + G_{c4} + G_{12}) - \varphi_6 \cdot G_{c4} - \varphi_{13} \cdot G_{12} = 0; \\ &-\varphi_5 \cdot G_{c4} + \varphi_6 \cdot (G_5 + G_{c4} + G_{c5} + G_{13}) - \varphi_7 \cdot G_{c5} - \varphi_{14} \cdot G_{13} = 0; \\ &-\varphi_6 \cdot G_{c5} + \varphi_7 \cdot (G_6 + G_{c5} + G_{c6} + G_{14}) - \varphi_8 \cdot G_{c6} - \varphi_{15} \cdot G_{14} = 0; \\ &-\varphi_7 \cdot G_{c6} + \varphi_8 \cdot (G_7 + G_{c6} + G_{c7} + G_{15}) - \varphi_9 \cdot G_{c7} - \varphi_{16} \cdot G_{15} = 0; \\ &-\varphi_8 \cdot G_{c7} + \varphi_9 \cdot (G_8 + G_{c7} + G_{16}) - \varphi_{17} \cdot G_{16} = 0, \end{aligned}$$

Припустимо, що паралельний ряд з несправним СНП відомий (це можливо визначити за допомогою високовольтного тестера). Нехай це буде нижній ряд. При аналізі струмозрозподілу нижнього ряду СП можна знехтувати впливом верхнього ряду тому зворотні опору діодів набагато більше опорів резисторів зв'язку. З огляду на це розглянемо систему рівнянь при підключенні випробувального сигналу в вузол 2, вузол 1 заземлений. У наступних записах вузлових рівнянь:

Вузол 2:

$$\varphi_1=0; \quad \varphi_2=E;$$

$$\begin{aligned} &\varphi_3 \cdot (1/R_2 + 1/R_{C1} + 1/R_{C2}) - \varphi_4 \cdot (1/R_{C2}) = E/R_{C1}; \\ &-\varphi_3/R_{C2} + \varphi_4 \cdot (1/R_3 + 1/R_{C3} + 1/R_{C2}) - \varphi_5/R_{C3} = 0; \\ &-\varphi_4/R_{C3} + \varphi_5 \cdot (1/R_4 + 1/R_{C3} + 1/R_{C4}) - \varphi_6/R_{C4} = 0; \\ &-\varphi_5/R_{C4} + \varphi_6 \cdot (1/R_5 + 1/R_{C5} + 1/R_{C4}) - \varphi_7/R_{C5} = 0; \\ &-\varphi_6/R_{C5} + \varphi_7 \cdot (1/R_6 + 1/R_{C6} + 1/R_{C5}) - \varphi_8/R_{C6} = 0; \\ &-\varphi_7/R_{C6} + \varphi_8 \cdot (1/R_7 + 1/R_{C6} + 1/R_{C7}) - \varphi_9/R_{C7} = 0; \\ &-\varphi_8/R_{C7} + \varphi_9 \cdot (1/R_8 + 1/R_{C7}) = 0; \end{aligned}$$

при цьому відомі такі величини:

						Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_{12} = \varphi_2 - \varphi_3;$$

$$U_{22} = \varphi_3 - \varphi_4;$$

$$U_{32} = \varphi_4 - \varphi_5,$$

$$U_{42} = \varphi_5 - \varphi_6,$$

$$U_{52} = \varphi_6 - \varphi_7,$$

$$U_{62} = \varphi_7 - \varphi_8,$$

$$U_{72} = \varphi_8 - \varphi_9,$$

де $U_{12}, U_{22}, U_{32}, U_{42}, U_{52}, U_{62}, U_{72}$ - падіння напруги на резисторах зв'язку, перший коефіцієнт - номер резистора зв'язку, другий номер вузла, до якого підведено випробувальну напругу, В.

Перегрупуємо члени, що містять однаковий множники:

$$(\varphi_3 - E)/R_{c1} + (\varphi_3 - \varphi_4)/R_{c2} + \varphi_3/R_2 = 0;$$

$$(\varphi_4 - \varphi_3)/R_{c2} + (\varphi_4 - \varphi_5)/R_{c3} - \varphi_4/R_3 = 0;$$

$$(\varphi_5 - \varphi_4)/R_{c3} + (\varphi_5 - \varphi_6)/R_{c4} - \varphi_5/R_4 = 0;$$

$$(\varphi_6 - \varphi_5)/R_{c4} + (\varphi_6 - \varphi_7)/R_{c5} - \varphi_6/R_5 = 0;$$

$$(\varphi_7 - \varphi_6)/R_{c5} + (\varphi_7 - \varphi_8)/R_{c6} - \varphi_7/R_6 = 0;$$

$$(\varphi_8 - \varphi_7)/R_{c6} + (\varphi_8 - \varphi_9)/R_{c7} - \varphi_8/R_7 = 0;$$

$$(\varphi_9 - \varphi_8)/R_{c7} + \varphi_9/R_8 = 0.$$

Перетворимо отриману систему рівнянь:

$$-U_{12}/R_{C1} + U_{22}/R_{C2} + (E - U_{12})/R_2 = 0;$$

$$-U_{22}/R_{C2} + U_{32}/R_{C3} - (E - U_{12} - U_{22})/R_3 = 0;$$

$$-U_{32}/R_{C3} + U_{42}/R_{C4} - (E - U_{12} - U_{22} - U_{32})/R_4 = 0;$$

$$-U_{42}/R_{C4} + U_{52}/R_{C5} - (E - U_{12} - U_{22} - U_{32} - U_{42})/R_5 = 0;$$

$$-U_{52}/R_{C5} + U_{62}/R_{C6} - (E - U_{12} - U_{22} - U_{32} - U_{42} - U_{52})/R_6 = 0;$$

$$-U_{62}/R_{C6} + U_{72}/R_{C7} - (E - U_{12} - U_{22} - U_{32} - U_{42} - U_{52} - U_{62})/R_7 = 0;$$

$$-U_{72}/R_{C7} + (E - U_{12} - U_{22} - U_{32} - U_{42} - U_{52} - U_{62} - U_{72})/R_8 = 0.$$

Вирішуючи систему рівнянь, отримаємо:

						Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_2=R_{C1} \cdot R_{C2} \cdot (E- U_{12})/ (U_{12} \cdot R_{C2}-U_{22} \cdot R_{C1}); \quad (3.1)$$

$$R_3=R_{C2} \cdot R_{C3} \cdot (E- U_{12}- U_{22})/ (U_{22} \cdot R_{C3}- U_{32} \cdot R_{C2}); \quad (3.2)$$

$$R_4=R_{C3} \cdot R_{C4} \cdot (E- U_{12}- U_{22}- U_{32})/ (U_{32} \cdot R_{C4}- U_{42} \cdot R_{C3}); \quad (3.3)$$

$$R_5=R_{C4} \cdot R_{C5} \cdot (E- U_{12}- U_{22}- U_{32}- U_{42})/ (U_{42} \cdot R_{C5}- U_{52} \cdot R_{C4}); \quad (3.4)$$

$$R_6=R_{C5} \cdot R_{C6} \cdot (E- U_{12}- U_{22}- U_{32}- U_{42}- U_{52})/ (U_{52} \cdot R_{C6}- U_{62} \cdot R_{C5}); \quad (3.5)$$

$$R_7=R_{C6} \cdot R_{C7} \cdot (E- U_{12}- U_{22}- U_{32}- U_{42}- U_{52}- U_{62})/ (U_{62} \cdot R_{C7}- U_{72} \cdot R_{C6}); \quad (3.6)$$

$$R_8=R_{C7} \cdot (E- U_{12}- U_{22}- U_{32}- U_{42}- U_{52}- U_{62}- U_{72})/ U_{72}. \quad (3.7)$$

Таким чином, за відомими значеннями опорів зв'язку і падінь напруг на них визначаємо значення зворотних опорів СНП в плечі перетворювача і струмозподіл в гілках без демонтажу. Схема заміщення діагностування для вузла 3 аналогічна схемі, зображеної на рисунку 3.13, вузол 1 заземлений, на вузол 3 подано випробувальну напругу. Система рівнянь при $\varphi_3 = E$.

Вузол 3:

$$\begin{aligned} \varphi_2 \cdot (1/R_1 + 1/R_{C1}) &= E/R_{C1}; \\ \varphi_4 \cdot (1/R_3 + 1/R_{C2} + 1/R_{C3}) - \varphi_5/R_{C3} &= E/R_{C2}; \\ -\varphi_4/R_{C3} + \varphi_5 \cdot (1/R_4 + 1/R_{C3} + 1/R_{C4}) - \varphi_6/R_{C4} &= 0; \\ -\varphi_5/R_{C4} + \varphi_6 \cdot (1/R_5 + 1/R_{C4} + 1/R_{C5}) - \varphi_7/R_{C5} &= 0; \\ -\varphi_6/R_{C5} + \varphi_7 \cdot (1/R_6 + 1/R_{C5} + 1/R_{C6}) - \varphi_8/R_{C6} &= 0; \\ -\varphi_7/R_{C6} + \varphi_8 \cdot (1/R_7 + 1/R_{C6} + 1/R_{C7}) - \varphi_9/R_{C7} &= 0; \\ -\varphi_8/R_{C7} + \varphi_9 \cdot (1/R_8 + 1/R_{C7}) &= 0; \end{aligned}$$

при цьому відомі такі величини:

$$U_{13} = \varphi_2 \cdot E;$$

$$U_{23} = E - \varphi_4;$$

$$U_{33} = \varphi_4 - \varphi_5;$$

$$U_{43} = \varphi_5 - \varphi_6;$$

$$U_{53} = \varphi_6 - \varphi_7;$$

$$U_{63} = \varphi_7 - \varphi_8;$$

$$U_{73} = \varphi_8 - \varphi_9.$$

Перетворимо дану систему рівнянь:

$$\begin{aligned}
(\varphi_2-E)/R_{C1} + \varphi_2/R_1 &= 0; \\
(\varphi_4-E)/R_{C2} + (\varphi_4-\varphi_5)/R_{C3} + \varphi_4/R_3 &= 0; \\
(\varphi_5-\varphi_4)/R_{C3} + (\varphi_5-\varphi_6)/R_{C4} - \varphi_5/R_4 &= 0; \\
(\varphi_6-\varphi_5)/R_{C4} + (\varphi_6-\varphi_7)/R_{C5} - \varphi_6/R_5 &= 0; \\
(\varphi_7-\varphi_6)/R_{C5} + (\varphi_7-\varphi_8)/R_{C6} - \varphi_7/R_6 &= 0; \\
(\varphi_8-\varphi_7)/R_{C6} + (\varphi_8-\varphi_9)/R_{C7} - \varphi_8/R_7 &= 0; \\
(\varphi_9-\varphi_8)/R_{C7} + \varphi_9/R_8 &= 0.
\end{aligned}$$

Перетворимо отриману систему рівнянь:

$$\begin{aligned}
U_{13}/R_{C1} + (U_{13}+E)/R_1 &= 0; \\
-U_{23}/R_{C2} + U_{33}/R_{C3} + (E- U_{23})/R_3 &= 0; \\
-U_{33}/R_{C3} + U_{43}/R_{C4} - (E- U_{13} - U_{23}-U_{33})/R_4 &= 0; \\
-U_{43}/R_{C4} + U_{53}/R_{C5} - (E- U_{13} - U_{23}-U_{33}-U_{43})/R_5 &= 0; \\
-U_{53}/R_{C5} + U_{63}/R_{C6} - (E- U_{13} - U_{23}-U_{33}-U_{43}-U_{53})/R_6 &= 0; \\
-U_{63}/R_{C6} + U_{73}/R_{C7} - (E- U_{13} - U_{23}-U_{33}-U_{43}-U_{53}-U_{63})/R_7 &= 0; \\
-U_{73}/R_{C7} + (E- U_{13} - U_{23} - U_{33}-U_{43}-U_{53}-U_{63}-U_{73})/R_8 &= 0.
\end{aligned}$$

Вирішуючи отриману систему рівнянь, отримаємо зворотні опори СНП:

$$R_1 = R_{C1} (-E- U_{13})/ U_{13}; \quad (3.8)$$

$$R_3 = R_{C2} \cdot R_{C3} (E- U_{23})/ (U_{23} \cdot R_{C3}- U_{33} \cdot R_{C2}); \quad (3.9)$$

$$R_4 = R_{C3} \cdot R_{C4} \cdot (E- U_{13} - U_{23}-U_{33})/ (U_{43} \cdot R_{C3}- U_{33} \cdot R_{C4}); \quad (3.10)$$

$$R_5 = R_{C4} \cdot R_{C5} \cdot (E- U_{13} - U_{23}-U_{33}-U_{43})/ (U_{43} \cdot R_{C5}- U_{53} \cdot R_{C4}); \quad (3.11)$$

$$R_6 = R_{C5} \cdot R_{C6} (E- U_{13} - U_{23}-U_{33}-U_{43}-U_{53})/ (U_{53} \cdot R_{C6}- U_{63} \cdot R_{C5}); \quad (3.12)$$

$$R_7 = R_{C6} \cdot R_{C7} (E- U_{13} - U_{23}-U_{33}-U_{43}-U_{53}-U_{63})/ (U_{63} \cdot R_{C7}- U_{73} \cdot R_{C6}); \quad (3.13)$$

$$R_8 = R_{C7} (E- U_{13} - U_{23} - U_{33}-U_{43}-U_{53}-U_{63}-U_{73})/ U_{73}. \quad (3.14)$$

Рівняння для розрахунку верхнього ряду СНП УВКМ-5 для вузлів 4, 5, 6, 7, 8, 9, на які послідовно подається випробувальну напругу, аналогічні рівнянням 3.1-3.14. Дані рівняння необхідні для підвищення точності результатів діагностування.

Для розрахунку нижнього ряду СНП випрямного плеча також складені системи рівнянь.

На рисунку 3.14 приведена схема заміщення при розрахунку вузла 2. Особливість рівнянь нижнього ряду, полягає в тому, що послідовно заземлюються вузли 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 а випробувальну напругу постійно

						Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

подано на вузол 10 плеча СП, тому схеми заміщення для складання рівнянь аналогічні зображеною на рисунку 3.14.

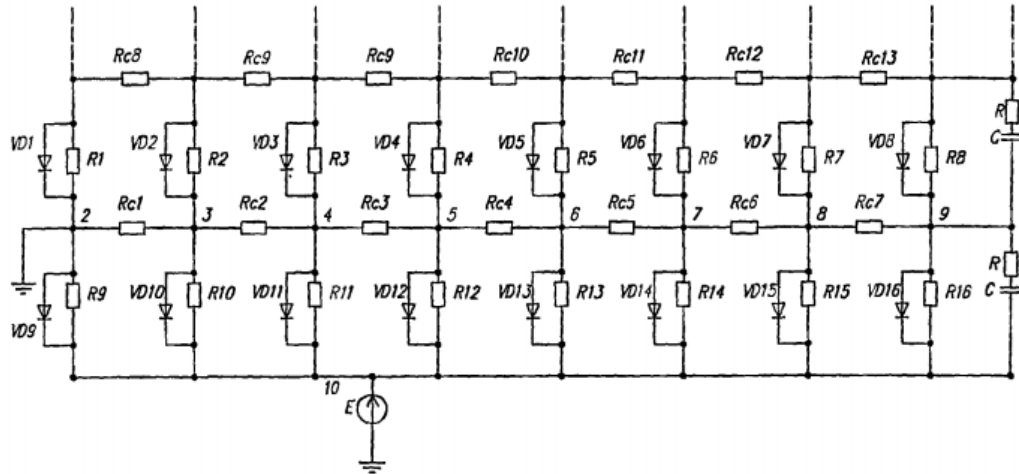


Рисунок 3.14 - Схема заміщення для нижнього ряду СНП випрямного плеча УВКМ-5 в режимі діагностування

Складена система рівнянь при підключенні випробувального сигналу в вузол 10, вузол 2 заземлений.

$$\varphi_2 = 0;$$

$$\varphi_{10} = E;$$

$$\varphi_3 \cdot (1/R_{10} + 1/R_{C1} + 1/R_{C2}) - \varphi_4/R_{C2} = E/R_{10};$$

$$-\varphi_3/R_{C2} + \varphi_4 \cdot (1/R_{11} + 1/R_{C2} + 1/R_{C3}) - \varphi_5/R_{C3} = E/R_{11};$$

$$-\varphi_4/R_{C3} + \varphi_5 \cdot (1/R_{12} + 1/R_{C3} + 1/R_{C4}) - \varphi_6/R_{C4} = E/R_{12};$$

$$-\varphi_5/R_{C4} + \varphi_6 \cdot (1/R_{13} + 1/R_{C4} + 1/R_{C5}) - \varphi_7/R_{C5} = E/R_{13};$$

$$-\varphi_6/R_{C5} + \varphi_7 \cdot (1/R_{14} + 1/R_{C5} + 1/R_{C6}) - \varphi_8/R_{C6} = E/R_{14};$$

$$-\varphi_7/R_{C6} + \varphi_8 \cdot (1/R_{15} + 1/R_{C6} + 1/R_{C7}) - \varphi_9/R_{C7} = E/R_{15};$$

$$-\varphi_8/R_{C7} + \varphi_9 \cdot (1/R_{16} + 1/R_{C7}) = E/R_{16}.$$

При цьому відомі такі величини:

$$U_{12} = -\varphi_3;$$

$$U_{22} = \varphi_3 - \varphi_4;$$

$$U_{32} = \varphi_4 - \varphi_5;$$

$$U_{42} = \varphi_5 - \varphi_6;$$

$$U_{52} = \varphi_6 - \varphi_7;$$

$$U_{62} = \varphi_7 - \varphi_8;$$

$$U_{72} = \varphi_8 - \varphi_9;$$

де $U_{12}, U_{22}, U_{32}, U_{42}, U_{52}, U_{62}, U_{72}$ - падіння напруги на резисторах зв'язку, перший коефіцієнт - номер резистора зв'язку, другий номер заземленого вузла.
Вирішуючи отриману систему рівнянь, отримаємо:

$$R_{10} = R_{C1} \cdot R_{C2} \cdot (E + U_{12}) / (U_{22} \cdot R_{C1} - U_{12} \cdot R_{C2}); \quad (3.15)$$

$$R_{11} = R_{C2} \cdot R_{C3} \cdot (E + U_{12} + U_{22}) / (U_{32} \cdot R_{C2} - U_{22} \cdot R_{C3}); \quad (3.16)$$

$$R_{12} = R_{C3} \cdot R_{C4} \cdot (E + U_{12} + U_{22} + U_{32}) / (U_{42} \cdot R_{C3} - U_{32} \cdot R_{C4}); \quad (3.17)$$

$$R_{13} = R_{C4} \cdot R_{C5} \cdot (E + U_{12} + U_{22} + U_{32} + U_{42}) / (U_{52} \cdot R_{C4} - U_{42} \cdot R_{C5}); \quad (3.18)$$

$$R_{14} = R_{C5} \cdot R_{C6} \cdot (E + U_{12} + U_{22} + U_{32} + U_{42} + U_{52}) / (U_{62} \cdot R_{C5} - U_{52} \cdot R_{C6}); \quad (3.19)$$

$$R_{15} = R_{C6} \cdot R_{C7} \cdot (E + U_{12} + U_{22} + U_{32} + U_{42} + U_{52} + U_{62}) / (U_{72} \cdot R_{C6} - U_{62} \cdot R_{C7}); \quad (3.20)$$

$$R_{12} = R_{C7} \cdot (E + U_{12} + U_{22} + U_{32} + U_{42} + U_{52} + U_{62} + U_{72}) / (-U_{72}). \quad (3.21)$$

Схема заміщення для вузла 3 аналогічна схемі, зображеної на Рисунок 3.14, вузол 3 заземлений, на вузол 10 подано випробувальну напругу. Система рівнянь при $\varphi_{10}=E; \varphi_3=0$:

$$\begin{aligned} \varphi_2 \cdot (1/R_9 + 1/R_{C1}) &= E/R_9; \\ \varphi_4 \cdot (1/R_{11} + 1/R_{C2} + 1/R_{C3}) - \varphi_5/R_{C3} &= E/R_{11}; \\ -\varphi_4/R_{C3} + \varphi_5 \cdot (1/R_{12} + 1/R_{C3} + 1/R_{C4}) - \varphi_6/R_{C4} &= E/R_{12}; \\ -\varphi_5/R_{C4} + \varphi_6 \cdot (1/R_{13} + 1/R_{C4} + 1/R_{C5}) - \varphi_7/R_{C5} &= E/R_{13}; \\ -\varphi_6/R_{C5} + \varphi_7 \cdot (1/R_{14} + 1/R_{C5} + 1/R_{C6}) - \varphi_8/R_{C6} &= E/R_{14}; \\ -\varphi_7/R_{C6} + \varphi_8 \cdot (1/R_{15} + 1/R_{C6} + 1/R_{C7}) - \varphi_9/R_{C7} &= E/R_{15}; \\ -\varphi_8/R_{C7} + \varphi_9 \cdot (1/R_{16} + 1/R_{C7}) &= E/R_{16}. \end{aligned}$$

При цьому відомі такі величини:

$$U_{13} = \varphi_2;$$

$$U_{23} = \varphi_4;$$

$$U_{33} = \varphi_4 - \varphi_5;$$

$$U_{43} = \varphi_5 - \varphi_6;$$

$$U_{53} = \varphi_6 - \varphi_7;$$

$$U_{63} = \varphi_7 - \varphi_8;$$

$$U_{73} = \varphi_8 - \varphi_9;$$

Вирішуючи отриману систему рівнянь, отримаємо:

						Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_9 = R_{C1} \cdot (-E + U_{13}) / U_{13}; \quad (3.22)$$

$$R_{11} = R_{C2} \cdot R_{C3} \cdot (E + U_{23}) / (U_{23}R_{C3} - U_{33}R_{C2}); \quad (3.23)$$

$$R_{12} = R_{C3} \cdot R_{C4} \cdot (-U_{23} - U_{33} - E) / (U_{33}R_{C4} - U_{43}R_{C3}); \quad (3.24)$$

$$R_{13} = R_{C4} \cdot R_{C5} \cdot (-U_{23} - U_{33} - U_{43} - E) / (U_{43}R_{C5} - U_{53}R_{C4}); \quad (3.25)$$

$$R_{14} = R_{C5} \cdot R_{C6} \cdot (-U_{23} - U_{33} - U_{43} - U_{53} - E) / (U_{53}R_{C6} - U_{63}R_{C5}); \quad (3.26)$$

$$R_{15} = R_{C6} \cdot R_{C7} \cdot (-U_{23} - U_{33} - U_{43} - U_{53} - U_{63} - E) / (U_{63}R_{C7} - U_{73}R_{C6}); \quad (3.27)$$

$$R_{16} = R_{C7} \cdot (-U_{23} - U_{33} - U_{43} - U_{53} - U_{63} - U_{73} - E) / U_{73}. \quad (3.28)$$

Рівняння для інших вузлів при моделюванні діагностування нижнього ряду УВКМ-5 аналогічні.

За отриманими рівняннями в пакеті MATLAB складено програмний блок, який визначає по відомим падінням напруги на резисторах зв'язку і значенням опорів резисторів зв'язку струмозподіл в паралельних гілках і провідності гілок.

3.3 Підвищення точності вимірювань універсального пристрою експрес-діагностування напівпровідникових перетворювачів з резисторами зв'язку

При діагностуванні СП без демонтажу схеми результати обтяжені суттєвими помилками за рахунок впливу РС-ланцюгів, резисторів зв'язку, самих СНП в паралельних гілках. Отримана при цьому похибка є методичною і не може бути усунена простою кількістю числа вимірів. З іншого боку, через занадто велику різницю в значеннях опорів зв'язку і зворотних опорів СНП, а також таких факторів, як контактні опори, розкид фактичних параметрів резисторів зв'язку і т.д., облік яких досить складний, представляється скрутним заздалегідь розрахувати методичну похибку, щоб ввести потім необхідну поправку в результат.

Підвищення точності результатів можливо при використанні сукупних вимірювань з надмірною кількістю спостережень.

Сукупні вимірювання в даному випадку складаються з ряду прямих вимірювань напруг на резисторах зв'язку. При переході від одного ряду вимірювань до іншого змінюються поєднання вимірюваних величин.

У загальному вигляді рівняння для трьох невідомих можна уявити як

$$F(a, b, c, X, Y, Z) = l, \quad (3.29)$$

де X, Y, Z - шукані-величини; a, b, c, l - безпосередньо вимірювані величини.

Приклад розрахунку наведено при діагностуванні СНП нижнього ряду напівпровідникового перетворювача, рисунок 3.14, напруга $U_{исп}$ подається на загальну точку СНП катодною групи.

При цьому використовуються рівняння (3.15-3.28), а також для заземлених вузлів 4, 5, 6, 7, 8, 9. При заземленому вузлу 2:

						Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{aligned}
K1 &= R_{10} = R_{c1} \cdot R_{c2} \cdot (E + U_{12}) / (U_{22} R_{c1} - U_{12} R_{c2}); \\
K2 &= R_{11} = R_{c2} \cdot R_{c3} \cdot (E + U_{12} + U_{22}) / (U_{32} R_{c2} - U_{22} R_{c3}); \\
K3 &= R_{12} = R_{c3} \cdot R_{c4} \cdot (E + U_{12} + U_{22} + U_{32}) / (U_{42} R_{c3} - U_{32} R_{c4}); \\
K4 &= R_{13} = R_{c4} \cdot R_{c5} \cdot (E + U_{12} + U_{22} + U_{32} + U_{42}) / (U_{52} R_{c4} - U_{42} R_{c5}); \\
K5 &= R_{14} = R_{c5} \cdot R_{c6} \cdot (E + U_{12} + U_{22} + U_{32} + U_{42} + U_{52}) / (U_{62} R_{c5} - U_{52} R_{c6}); \\
K6 &= R_{15} = R_{c6} \cdot R_{c7} \cdot (E + U_{12} + U_{22} + U_{32} + U_{42} + U_{52} + U_{62}) / (U_{72} R_{c6} - U_{62} R_{c7}); \\
K7 &= R_{16} = R_{c7} \cdot (E + U_{12} + U_{22} + U_{32} + U_{42} + U_{52} + U_{62} + U_{72}) / (-U_{72}).
\end{aligned}$$

При заземленому вузлу 3:

$$\begin{aligned}
K8 &= R_9 = R_{c1} \cdot (-E + U_{13}) / U_{13}; \\
K9 &= R_{11} = R_{c2} \cdot R_{c3} \cdot (E + U_{23}) / (U_{23} \cdot R_{c3} - U_{33} \cdot R_{c2}); \\
K10 &= R_{12} = R_{c3} \cdot R_{c4} \cdot (-U_{23} - U_{33} - E) / (U_{33} \cdot R_{c4} - U_{43} \cdot R_{c3}); \\
K11 &= R_{13} = R_{c4} \cdot R_{c5} \cdot (-U_{23} - U_{33} - U_{43} - E) / (U_{43} \cdot R_{c5} - U_{53} \cdot R_{c4}); \\
K12 &= R_{14} = R_{c5} \cdot R_{c6} \cdot (-U_{23} - U_{33} - U_{43} - U_{53} - E) / (U_{53} \cdot R_{c6} - U_{63} \cdot R_{c5}); \\
K13 &= R_{15} = R_{c6} \cdot R_{c7} \cdot (-U_{23} - U_{33} - U_{43} - U_{53} - U_{63} - E) / (U_{63} R_{c7} - U_{73} \cdot R_{c6}); \\
K14 &= R_{16} = R_{c7} \cdot (-U_{23} - U_{33} - U_{43} - U_{53} - U_{63} - U_{73} - E) / U_{73}.
\end{aligned}$$

При заземленому вузлу 4:

$$\begin{aligned}
K15 &= R_{c1} \cdot (E - U_{14} - U_{24}) / (U_{14}); \\
K16 &= R_{c1} \cdot R_{c2} \cdot (-U_{24} + E) / (R_{c1} \cdot U_{24} - R_{c2} \cdot U_{14}); \\
K17 &= R_{c3} \cdot R_{c4} \cdot (U_{34} + E) / (R_{c3} \cdot U_{44} - R_{c4} \cdot U_{34}); \\
K18 &= R_{c4} \cdot R_{c5} \cdot (U_{34} + U_{44} + E) / (R_{c4} \cdot U_{54} - R_{c5} \cdot U_{44}); \\
K19 &= R_{c5} \cdot R_{c6} \cdot (U_{54} + U_{44} + U_{34} + E) / (R_{c5} \cdot U_{64} - R_{c6} \cdot U_{54}); \\
K20 &= R_{c6} \cdot R_{c7} \cdot (U_{64} + U_{54} + U_{44} + U_{34} + E) / (R_{c6} \cdot U_{74} - R_{c7} \cdot U_{64}); \\
K21 &= R_{c7} \cdot (U_{74} + U_{64} + U_{54} + U_{44} + U_{34} + E) / (-U_{74}).
\end{aligned}$$

При заземленому вузлу 5:

$$\begin{aligned}
K22 &= R_{c1} \cdot (-E + U_{15} + U_{25} + U_{35}) / (U_{15}); \\
K23 &= R_{c1} \cdot R_{c2} \cdot (-U_{25} - U_{35} + E) / (R_{c1} \cdot U_{25} - R_{c2} \cdot U_{15}); \\
K24 &= R_{c2} \cdot R_{c3} \cdot (-U_{35} + E) / (U_{25} \cdot R_{c3} - U_{35} \cdot R_{c2}); \\
K25 &= R_{c4} \cdot R_{c5} \cdot (U_{45} + E) / (R_{c4} \cdot U_{55} - R_{c5} \cdot U_{45}); \\
K26 &= R_{c5} \cdot R_{c6} \cdot (U_{45} + U_{55} + E) / (R_{c5} \cdot U_{65} - R_{c6} \cdot U_{55});
\end{aligned}$$

						Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K27=R_{C6} \cdot R_{C7} \cdot (U_{65}+U_{55}+U_{45}+E)/(R_{C6} \cdot U_{75}-R_{C7} \cdot U_{65});$$

$$K28=R_{C7} \cdot (U_{75}+U_{65}+U_{55}+U_{45}+E)/(-U_{75});$$

При заземленому вузлу 6:

$$K29=R_{C1} \cdot (-E+U_{16}+U_{26}+U_{36}+U_{46})/(-U_{16});$$

$$K30=R_{C1} \cdot R_{C2} \cdot (-U_{26}-U_{36}-U_{46}+E)/(R_{C1} \cdot U_{26}-R_{C2} \cdot U_{16});$$

$$K31=R_{C2} \cdot R_{C3} \cdot (-U_{36}-U_{46}+E)/(U_{36} \cdot R_{C2}-U_{26} \cdot R_{C3});$$

$$K32=R_{C3} \cdot R_{C4} \cdot (E-U_{46})/(R_{C3} \cdot U_{46}-R_{C4} \cdot U_{36});$$

$$K33=R_{C5} \cdot R_{C6} \cdot (U_{56}+E)/(R_{C5} \cdot U_{66}-R_{C6} \cdot U_{56});$$

$$K34=R_{C6} \cdot R_{C7} \cdot (U_{66}+U_{56}+E)/(R_{C6} \cdot U_{76}-R_{C7} \cdot U_{66});$$

$$K35=R_{C7} \cdot (U_{76}+U_{66}+U_{56}+E)/(-U_{76}).$$

При заземленому вузлу 7:

$$K36=R_{C1} \cdot (-E+U_{17}+U_{27}+U_{37}+U_{47}+U_{57})/(-U_{17});$$

$$K37=R_{C1} \cdot R_{C2} \cdot (-U_{27}-U_{37}-U_{47}-U_{57}+E)/(R_{C1} \cdot U_{27}-R_{C2} \cdot U_{17});$$

$$K38=R_{C2} \cdot R_{C3} \cdot (-U_{37}-U_{47}-U_{57}+E)/(U_{37} \cdot R_{C2}-U_{27} \cdot R_{C3});$$

$$K39=R_{C3} \cdot R_{C4} \cdot (E-U_{47}-U_{57})/(R_{C3} \cdot U_{47}-R_{C4} \cdot U_{37});$$

$$K40=R_{C4} \cdot R_{C5} \cdot (-U_{57}+E)/(R_{C4} \cdot U_{57}-R_{C5} \cdot U_{47});$$

$$K41=R_{C6} \cdot R_{C7} \cdot (U_{67}+E)/(R_{C6} \cdot U_{77}-R_{C7} \cdot U_{67});$$

$$K42=R_{C7} \cdot (U_{77}+U_{67}+E)/(-U_{77}).$$

При заземленому вузлу 8:

$$K43=R_{C1} \cdot (-E+U_{18}+U_{28}+U_{38}+U_{48}+U_{58}+U_{68})/(-U_{18});$$

$$K44=R_{C1} \cdot R_{C2} \cdot (-U_{28}-U_{38}-U_{48}-U_{58}-U_{68}+E)/(R_{C2} \cdot U_{18}-R_{C1} \cdot U_{28});$$

$$K45=R_{C2} \cdot R_{C3} \cdot (-U_{38}-U_{48}-U_{58}-U_{68}+E)/(U_{28} \cdot R_{C3}-U_{38} \cdot R_{C2});$$

$$K46=R_{C3} \cdot R_{C4} \cdot (E-U_{48}-U_{58}-U_{68})/(R_{C4} \cdot U_{38}-R_{C3} \cdot U_{48});$$

$$K47=R_{C4} \cdot R_{C5} \cdot (-U_{58}-U_{68}+E)/(R_{C4} \cdot U_{58}-R_{C5} \cdot U_{48});$$

$$K48=R_{C5} \cdot R_{C6} \cdot (-U_{68}+E)/(R_{C5} \cdot U_{68}-R_{C6} \cdot U_{58});$$

$$K49=R_{C7} \cdot (U_{78}+E)/(-U_{78}).$$

При заземленому вузлу 9:

						Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{aligned}
K50 &= R_{C1} \cdot (-E + U_{19} + U_{29} + U_{39} + U_{49} + U_{59} + U_{69} + U_{79}) / (-U_{19}); \\
K51 &= R_{C1} \cdot R_{C2} \cdot (-U_{29} - U_{39} - U_{49} - U_{59} - U_{69} - U_{79} + E) / (R_{C1} \cdot U_{29} - R_{C2} \cdot U_{19}); \\
K52 &= R_{C2} \cdot R_{C3} \cdot (-U_{39} - U_{49} - U_{59} - U_{69} - U_{79} + E) / (U_{39} \cdot R_{C2} - U_{29} \cdot R_{C3}); \\
K53 &= R_{C3} \cdot R_{C4} \cdot (E - U_{49} - U_{59} - U_{69} - U_{79}) / (R_{C3} \cdot U_{49} - R_{C4} \cdot U_{39}); \\
K54 &= R_{C4} \cdot R_{C5} \cdot (-U_{59} - U_{69} - U_{79} + E) / (R_{C4} \cdot U_{59} - R_{C5} \cdot U_{49}); \\
K55 &= R_{C5} \cdot R_{C6} \cdot (-U_{79} - U_{69} + E) / (R_{C5} \cdot U_{69} - R_{C6} \cdot U_{59}); \\
K56 &= R_{C6} \cdot R_{C7} \cdot (-U_{79} + E) / (R_{C6} \cdot U_{79} - R_{C7} \cdot U_{69}).
\end{aligned}$$

Запишемо систему нормальних рівнянь:

$$\begin{aligned}
7+0+0+0+0+0+0+0+(K8+K15+K22+K29+K36+K43+K50) &= 0; \\
0+7+0+0+0+0+0+0+(K1+K16+K23+K30+K37+K44+K51) &= 0; \\
0+0+7+0+0+0+0+0+(K2+K9+K24+K31+K38+K45+K52) &= 0; \\
0+0+0+7+0+0+0+0+(K3+K10+K17+K32+K39+K46+K53) &= 0; \\
0+0+0+0+7+0+0+0+(K4+K11+K18+K225+K40+K47+K54) &= 0; \\
0+0+0+0+0+7+0+0+(K5+K12+K19+K26+K33+K48+K55) &= 0; \\
0+0+0+0+0+0+7+0+(K6+K13+K20+K27+K34+K41+K56) &= 0; \\
0+0+0+0+0+0+0+7+(K7+K21+K14+K28+K35+K42+K49) &= 0;
\end{aligned} \tag{3.30}$$

де $K_1, K_2 \dots K_{56}$ - залишкові похибки умовних рівнянь, так звані нев'язки.

Відповідно до принципу Лежандра шукані величини мають найбільше достовірне рішення, якщо сума квадратів нев'язок приймає найменше значення:

$$\sum_{i=1}^n K_i^2 = \min, \tag{3.31}$$

де K_i розглядається як функція незалежних величин.

Рішення умовних рівнянь виконують за методом найменших квадратів.

В отриманій системі нормальних рівнянь коефіцієнти виражені через коефіцієнти нормальних рівнянь. Вирішивши систему нормальних рівнянь, отримують найбільш достовірні значення шуканих величин. Отримані оцінки шуканих величин підставляють в умовні рівняння і обчислюють залишкові похибки.

Середнє квадратичне відхилення (СКВ) умовних рівнянь визначають за формулою

						Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n K_i^2}{n-m}},$$

де n - число умовних рівнянь; m - число шуканих величин.

Визначивши СКВ отриманих оцінок шуканих величин, будують довірчий інтервал для істинного значення величини, використовуючи розподіл Стюдента. Число ступенів свободи при цьому для всіх вимірюваних величин дорівнює $n-m$.

Точність результату вимірів залежить від співвідношення числа шуканих величин і числа умовних рівнянь. Чим більше число умовних рівнянь в порівнянні з числом шуканих величин, тим точніше результат. Точність даного методу залежить від знання функціональних залежностей умовних рівнянь.

3.4 Оцінка методичної похибки пристрою експрес-діагностування напівпровідникових перетворювачів з резисторами зв'язку

Як відомо, що повна систематична похибка визначена декількома складовими:

$$\delta_c = \delta_n + \delta_m + \delta_{сп} + \delta_o,$$

де δ_n - інструментальна похибка, у відсотках; δ_m - похибка методу, у відсотках; $\delta_{сп}$ - суб'єктивна похибка, у відсотках; δ_o - похибка зовнішніх умов, в процентах.

Для даного пристрою експрес - діагностування похибка відхилення через зовнішні умову не перевищує одного відсотка, бо вимірювання проводяться в нормальних умовах, суб'єктивна похибка вимірювання не враховується внаслідок того, що засіб вимірювання - АЦП.

Похибка засобу вимірювання - АЦП, не перевищує одного відсотка. У зв'язку з цим при моделюванні підключення пристрою експрес-діагностування СП до випрямної установці УВКМ-5 оцінюється перш за все методична похибка при різних варіантах схем струморозподілу (тридротовій і чотиридротовій схемах підключення пристрою).

При моделюванні пристрою експрес-діагностування напівпровідникових перетворювачів в програмі MULTISIM були проаналізовані наступні варіанти:

- 1) зміна струму витoku в одному з СНП при незмінних токах витoku інших приладів;
- 2) зниження значення опору зв'язку при різних токах витoku одного з СНП;
- 3) зниження значення опору вимірювального резистора і опорів зв'язку.

При моделюванні прийнято наступне припущення: діоди випрямного плеча представлені їх статичної схемою заміщення, причому зворотний опір

						Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

діодів (згідно ВАХ) дорівнює 40 кОм.

Пристрій експрес-діагностування СП має два способи підключення чотиридротовий і тридротовий, рисунок 3.15 і рисунок 3.16 відповідно.

Спосіб підключення залежить від місця знаходження в плечі випробуваного СНП.

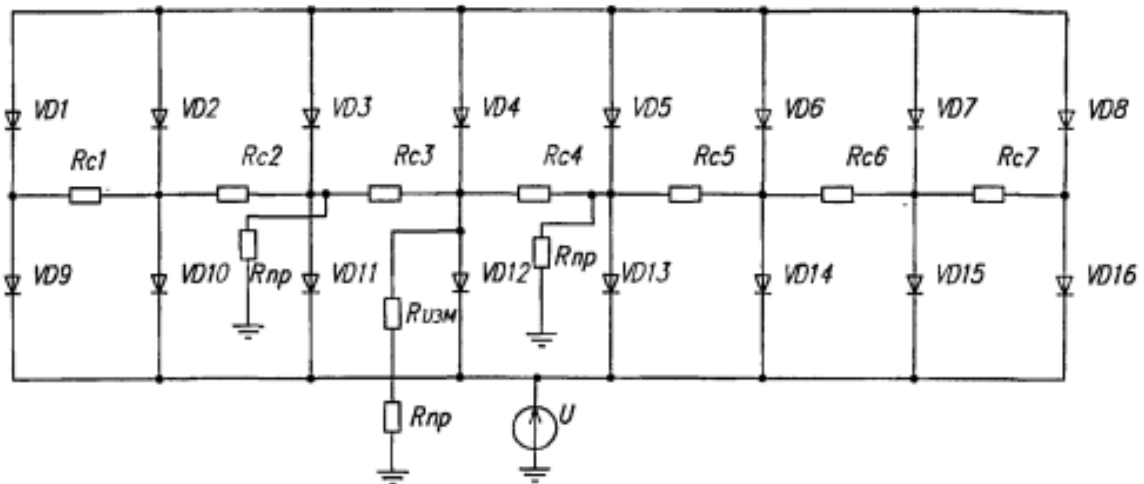


Рисунок 3.15 - Чотиридротова схема підключення пристрою експрес-діагностування (приклад підключення до діодів №10, 11, 12, 13, 14, 15)

Рисунок 3.16 - Тридротова схема підключення пристрою експрес-діагностування (приклад підключення до діодів №9, 16)

Моделювання схем підключення виконано в програмі MULTISIM.

Значення опору проводів R_{np} підключення пристрою експрес-діагностування визначено як опір мідного дроту довжиною півтора метра і площею поперечного перерізу чотири квадратних міліметра.

Значення опору вимірювального резистора R_{izm} взято як одна десята від значення опору резистора зв'язку.

Діоди типу ДЛ161-200 замінені статичними опорами:

$$R_{VD} = \frac{U_{RRM}}{I_{RRM}},$$

де U_{RRM} – повторювальна імпульсна зворотна напруга, В; I_{RRM} – повторюваний імпульсний зворотний струм, тА.

$$R_{VD} = \frac{1000}{0,0025} = 40000 \text{ Ом.}$$

Випробувальна напруга, прикладена до діодів:

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	56

$$U=U_{исп}=1000В.$$

Опору сполучних проводів:

$$R_{np1}=R_{np2}=\rho \cdot \frac{l}{S},$$

де ρ - питомий опір міді, $\rho = 18,6 \cdot 10^{-9}$ Ом*мм/м; l - довжина з'єднувального проводу, прийнята рівною $l = 1,5$ м; S - площа поперечного перерізу проводів, мм².

$$R_{np1}=R_{np2}=18,6 \cdot 10^{-9} \frac{1,5}{4 \cdot 10^{-6}} = 0,007 \text{ Ом.}$$

Приклад моделювання схем підключення пристрою експрес-діагностування пліч випрямної установки представлений на рисунку 3.15-3.17

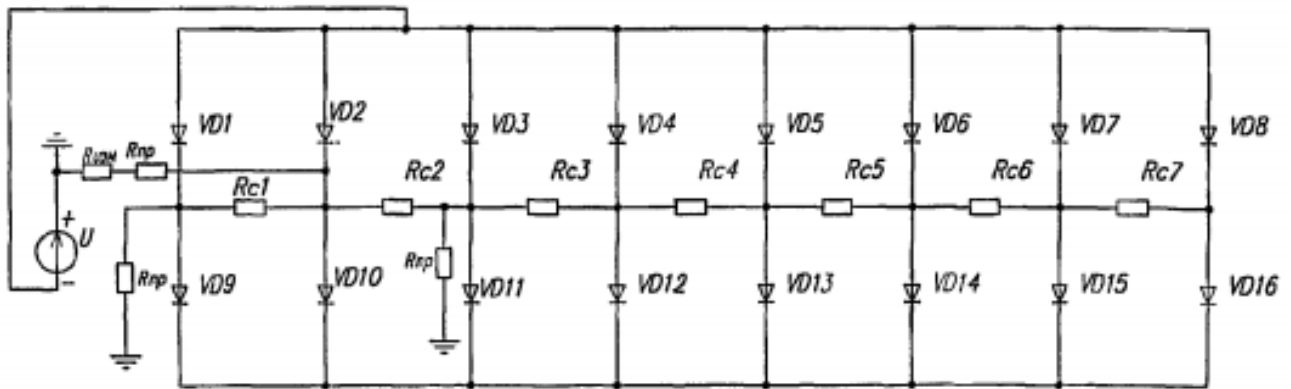


Рисунок 3.17 - Приклад підключення пристрою до діода VD2

Моделювання підключення пристрою експрес-діагностування до VD12, рисунок 3.15:

1) моделювання підключення пристрою експрес-діагностування при незмінному значенні опору зв'язку $R_c = 10$ Ом; $U_{исп} = 1000$ В; $R_{np} = 0,007$ Ом; $R_{изм} = 0,1 \cdot 10 = 1$ Ом.

Умова - СНП змінює свої параметри: значення зворотного опору діода VD12 R_{VD12} зменшується з 40 кОм до 4ком.

Дійсне значення струму витоку $I_{Rизм}$ порівнюється зі справжнім струмом витоку I_{R12} , розраховується відносна похибка δ . Результати зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Зміна опору VD12 при $R_c = 10$ Ом і $R_{изм} = 1$ Ом

R_{VD12}	кОм	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4
I_{R12}	мА	25,0	27,8	31,3	35,7	41,7	50	62,5	83,3	125	249,9
$I_{Rизм}$	мА	20,92	23,2	26,1	29,8	34,8	41,7	52,1	69,5	104,1	208,1

δ	%	16,32	16,38	16,42	16,44	16,49	16,54	16,59	16,63	16,72	16,73
----------	---	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

2) Вихідні дані ті ж, за винятком значення опору вимірювального резистора, $R_{IЗМ} = 0,1$ Ом. Дані моделювання зведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Зміна опору VD12 при $R_C = 10$ Ом і $R_{IЗМ} = 0,1$ Ом

R_{VD12}	кОм	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4
I_{R12}	мА	25,0	27,8	31,3	35,7	41,7	50,0	62,5	83,3	125,0	250
$I_{R_{IЗМ}}$	мА	24,6	27,3	30,7	35,1	40,9	49,1	61,3	81,7	122,5	244
δ	%	1,56	1,66	1,70	1,74	1,80	1,84	1,90	1,94	2,0	2,08

3) Моделювання схеми підключення при зміні значень опору вимірювального резистора $R_{IЗМ}$ від 1 до 0,1 Ом при опорі зв'язку $R_C = 10$ Ом; $U_{ИСП} = 1000$ В; $R_{ПР} = 0,007$ Ом; $R_{VD12} = 40$ кОм. Результати зведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Зміна опору вимірювального резистора $R_{IЗМ}$

R_{VD12}	Ом	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
I_{R12}	мА	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
$I_{R_{IЗМ}}$	мА	20,92	21,27	21,64	22,02	22,41	22,82	23,27	23,68	24,13	24,61
δ	%	16,32	14,92	13,44	11,92	10,36	8,72	6,92	5,28	3,48	1,56

За даними таблиць 3.1-3.3 побудовані графічні залежності, наведені на рисунках 3.18-3.20 залежно від зворотного опору СНП.

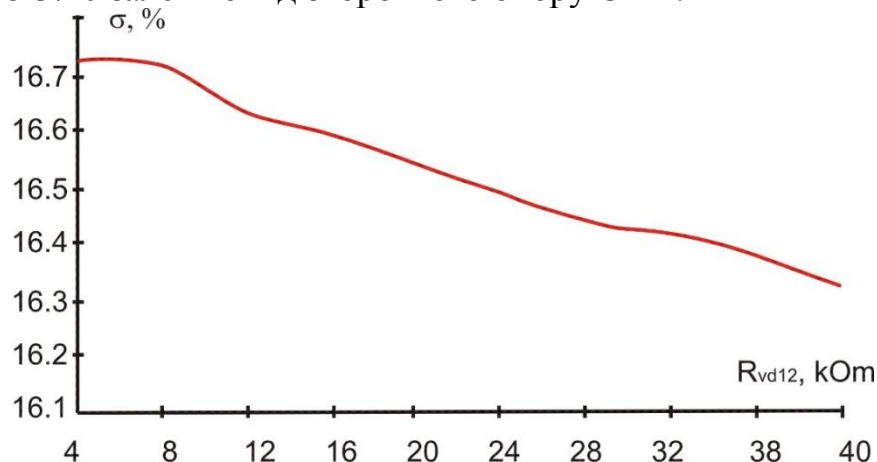


Рисунок 3.18 - Зміна похибки пристрою експрес-діагностування при значенні вимірювального резистора $R_{IЗМ} = 1$ Ом при чотиридротовій схемі заміщення

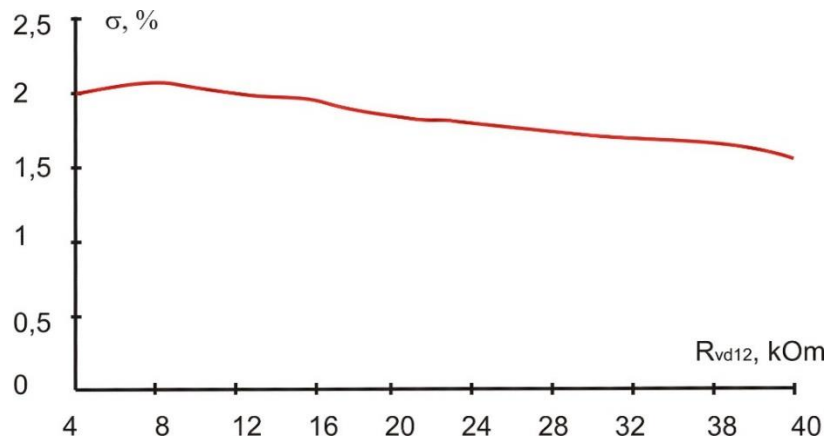


Рисунок 3.19 - Зміна похибки пристрою при значенні вимірювального резистора $R_{IЗМ} = 0,1$ Ом при чотиридротовій схемі заміщення

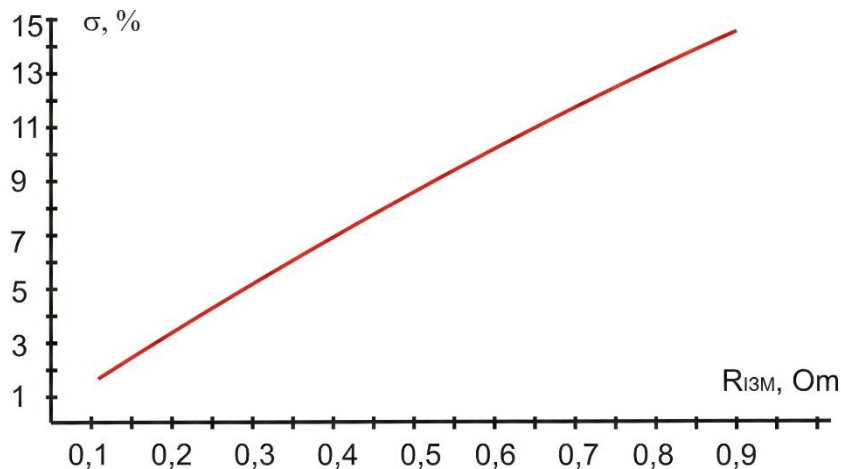


Рисунок 3.20 - Зміна похибки пристрою експрес-діагностування при варіації значень вимірювального резистора $R_{IЗМ}$ при чотиридротовій схемі підключення пристрою

Моделювання схем підключення пристрою до діода VD16, рисунок 3.16.

1) Моделювання підключення пристрою експрес-діагностування при незмінному значенні опорі зв'язку $R_C = 10$ Ом; $U_{исп} = 1000$ В; $R_{пр} = 0,007$ Ом; $R_{IЗМ} = 0,1 \cdot 10 = 1$ Ом.

Умова - СНП змінює свої параметри: значення зворотного опору діода VD16 зменшується з 40 кОм до 4ком.

Виміряне значення струму витоку $I_{RIЗМ}$ порівнюється з струмом витоку I_{R16} , розраховується відносна похибка δ . Результати зведені в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 - Зміна опору витоку VD16 при $R_C = 10$ Ом і $R_{IЗМ} = 1$ Ом

R_{VD12}	кОм	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4
I_{R12}	мА	25	27,78	31,25	35,71	41,66	50	62 ^	83,33	125	249,9
$I_{RIЗМ}$	мА	22,89	25,41	28,56	32,62	38,03	45,6	56,95	75,88	113,7	227,2
δ	%	0,53	0,66	0,84	1,10	1,51	2,20	3,47	6,21	14,13	56,73

2) Моделювання підключення пристрою експрес-діагностування

при незмінному значенні опорі зв'язку $R_C = 10 \text{ Ом}$; $U_{\text{исп}} = 1000 \text{ В}$; $R_{\text{пр}} = 0,007 \text{ Ом}$; $R_{\text{изм}} = 0,1 \text{ Ом}$.

Умова - СНП змінює свої параметри: значення зворотного опору діода VD16 зменшується з 40 кОм до 4 кОм. Отримані дані моделювання зведені в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 - Зміна опору витоку VD16 при $R_C = 10 \text{ Ом}$ і $R_{\text{изм}} = 0,1 \text{ Ом}$.

R_{VD12}	кОм	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4
I_{R12}	мА	25,0	27,8	31,3	35,7	41,7	50,0	62,5	83,3	125,0	250,0
$I_{\text{Rизм}}$	мА	24,9	27,7	31,1	35,5	41,4	49,7	62,0	82,6	123,9	247,5
δ	%	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0

3) Моделювання схеми підключення пристрою, до діода VD16 при зміні значень опору вимірювального резистора $R_{\text{изм}}$ від 1 до 0,1 Ом при опорі зв'язку $R_C = 10 \text{ Ом}$; $U_{\text{исп}} = 1000 \text{ В}$; $R_{\text{пр}} = 0,007 \text{ Ом}$; $R_{\text{VD16}} = 40 \text{ кОм}$.

Результати зведені в таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 - Зміна значень опору вимірювального резистора $R_{\text{изм}}$

R_{VD12}	Ом	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
I_{R12}	мА	25	25	25	25	25	25
$I_{\text{Rизм}}$	мА	22,89	23,31	23,75	24,2	24,68	24,92
δ	%	8,44	6,76	5	3,2	1,28	0,32

За даними таблиць 3.4-3.6 побудовані графічні залежності на рисунках 3.21-3.23.

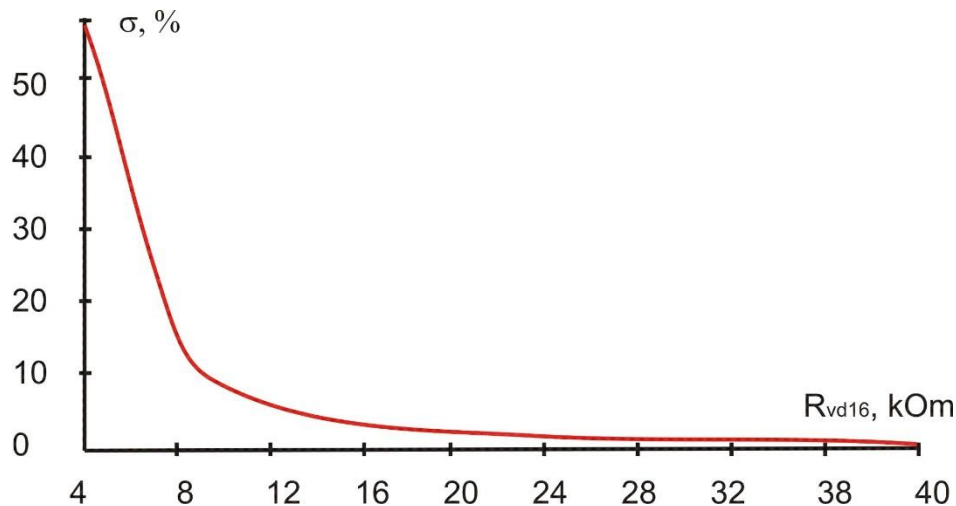


Рисунок 3.21 - Зміна похибки пристрою при значенні вимірювального резистора $R_{\text{изм}} = 1 \text{ Ом}$ і тридротовою схемою заміщення

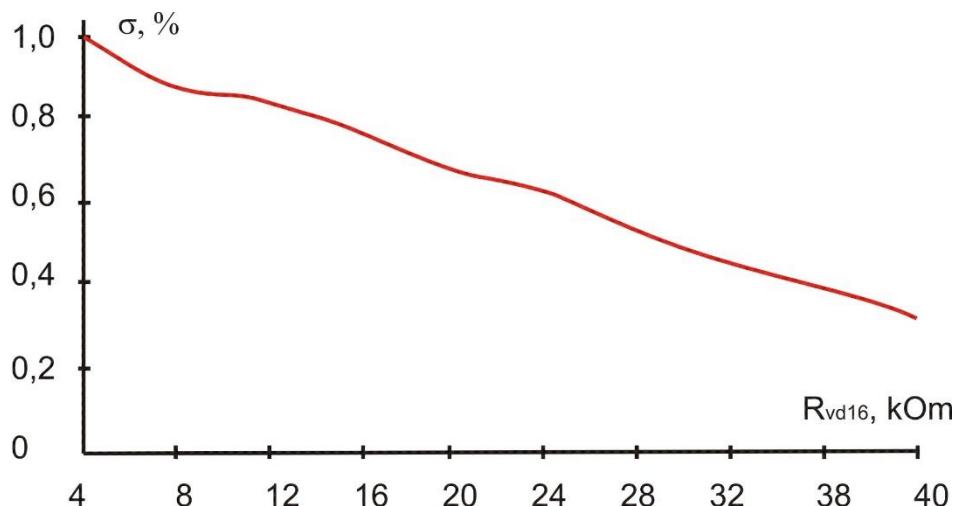


Рисунок 3.22 - Зміна похибки пристрою при значенні вимірювального резистора $R_{I3M} = 0,1 \text{ Ом}$ і тридротовою схемою заміщення

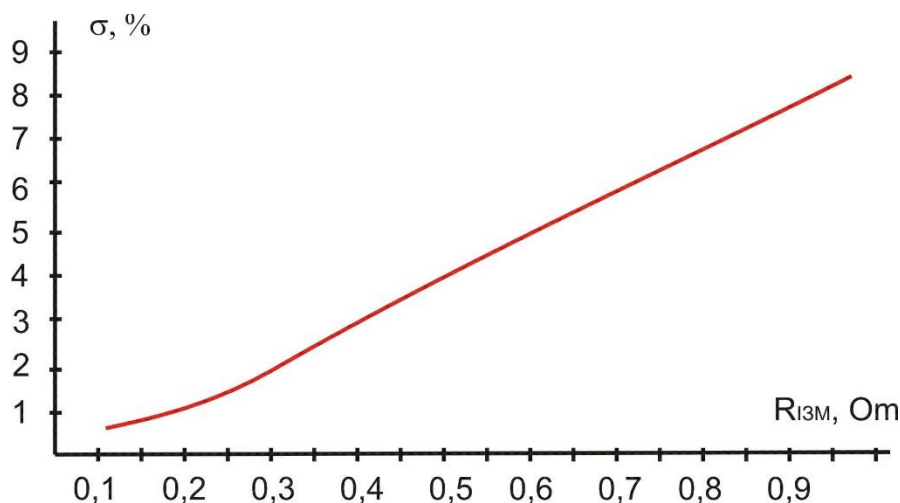


Рисунок 3.23 -Зміна похибки пристрою експрес-діагностування при варіації значень вимірювального резистора R_{I3M} і тридротовою схемою підключення

Висновки до розділу 3

- 1 Зроблено аналіз розподілу зворотних струмів і провідності гілок СП в процесі діагностування.
2. Запропоновано алгоритм контролю технічного стану СП з резисторами зв'язку без демонтажу за допомогою універсального пристрою експрес-діагностування, реалізований в MATLAB у вигляді програмного блоку.
- 3 Проведено моделювання роботи пристрою експрес-діагностування СП. Встановлено, що методична похибка δ_m за тридротовою схемою підключення пристрою діагностики менше, ніж при чотиридротовій в кілька разів тобто для дослідження похибки основною є чотиридротова схема.
- 4 Результати розрахунків, проведених в пакеті MATLAB, відрізняються від результатів моделювання в пакеті MULTISIM в межах 1%.

4 РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ЕКСПРЕС-ДІАГНОСТУВАННЯ СНП І НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ЇХ ОСНОВІ

Незважаючи на широке впровадження і істотний прогрес силової електроніки в усіх галузях промисловості в експлуатації залишається досить багато СП, укомплектовані діодами і тиристорами і які мають групове з'єднання приладів. Слід зазначити, що в даний час і в доступній для огляду перспективі на залізничному транспорті будуть застосовуватися СП з груповим з'єднанням СНП. Групове з'єднання дозволяє підвищити граничне значення загальної потужності перетворювача.

Навіть мала різниця в абсолютних значеннях зворотних напруг призводить до великого розкиду зворотних струмів СНП, що в свою чергу може привести до руйнування напівпровідникової структури приладу. Для підвищення рівня надійності слід впроваджувати нові методи і пристрої діагностики як групового з'єднання, так і окремих приладів; методики оцінки стану СНП в перетворювачах і відбраковування приладів з прихованими дефектами.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки пристроїв діагностування технічного стану СП, причому пристрої діагностування повинні мати малу масу і габарити, володіти заданою імовірністю вимірювань, прості в обслуговуванні, а також здійснювати контроль параметрів СНП без демонтажу схеми перетворювачів.

Для підвищення надійності СП в процесі експлуатації необхідно знати основні параметри кожного СНП і вміти їх прогнозувати. Це дозволяє визначити потенційно ненадійні СНП, вчасно-замінити їх і, тим самим, запобігти можливу відмову. При сучасному рівні розвитку вимірювальної та обчислювальної техніки тестова діагностика дозволяє виявляти не тільки ті деталі, які відмовили, але і потенційно ненадійні СНП в перетворювачі. Отже, з'являється можливість прогнозувати подальший стан СНП і перетворювачів в цілому.

З економічної точки зору діагностування повинно проводитися з мінімальними витратами часу і праці. Бажано також щоб діагностування СП проводилося під навантаженням без зупинки виробничого процесу. Для цих цілей найбільш оптимально застосування експрес-діагностування.

4.1 Серія пристроїв експрес-діагностування силових напівпровідникових перетворювачів

4.1.1 Пристрій експрес-діагностування напівпровідникових перетворювачів з резисторами зв'язку

Резистори зв'язку застосовують в різних перетворювачах (ВВП 2200м, ВВП 4000, УВКМ-Л2, УВКМ-5, УВКМ-6, ПВЕ-3 і ін.) з метою вирівнювання зворотних напруг СНП, а також для зменшення кількості шунтуючих резисторів і РС-кіл.

Одним з недоліків аналогічних пристроїв експрес-діагностування [17], є можливість вимірювання зворотних струмів і струмів витоку СНП для

						Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конкретного класу перетворювачів, а саме якщо резистори зв'язку мають спільну точку (ВВП 2200м, ВВП 4000). Це призводить до неможливості їх використання з іншими типами перетворювачів (УВКМ-Л2, УВКМ-5, УВКМ-6, ПВЕ та ін.);

В результаті вивчення сучасного стану в області діагностичного забезпечення перетворювачів розроблено пристрій експрес - діагностування СП з резисторами зв'язку, які не мають спільної точки.

На рисунку 4.1 представлена структурна схема запропонованого пристрою експрес-діагностування.

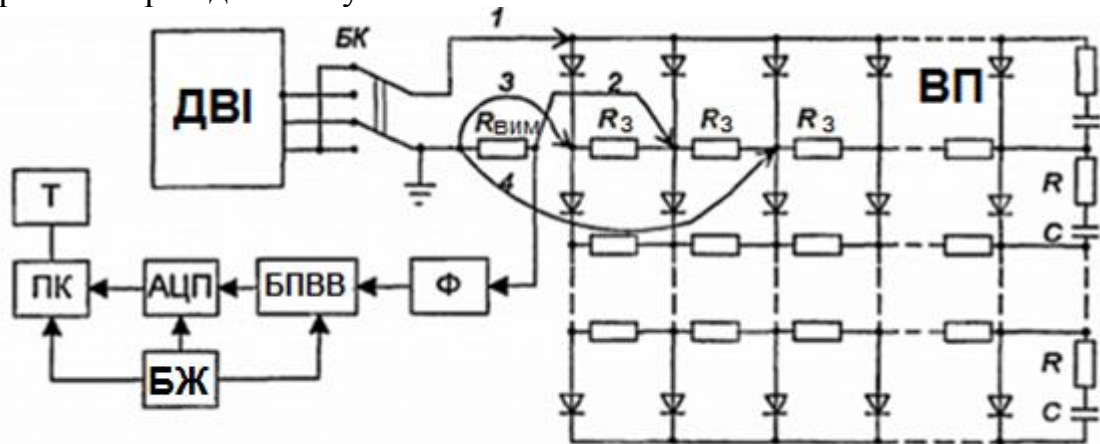


Рисунок 4.1 - Пристрій експрес- діагностування СНП в перетворювачах при наявності резисторів зв'язку

При вимірюванні струму витoku або зворотного струму випробувального приладу (ВП), що знаходиться в плечі перетворювача, вивід 1 пристрою підключається до катода (анода) ВП, а вивід 2 пристрою - до анода (катода) ВП, в залежності від розташування ВП у плечі перетворювача. Відводи 3, 4 пристрою підключаються до відводів резисторів зв'язку R_3 даного паралельного ряду СНП. Напруга від джерела випробувальних імпульсів ДВІ через відводи 1 і 2 пристрою і вимірювальний резистор $R_{ВИМ}$ підводиться до ВП. При підключенні відводів 3, 4 пристрою до резисторів зв'язку R_3 безпосередньо ВП створюється електричне коло, рисунок 4.2.

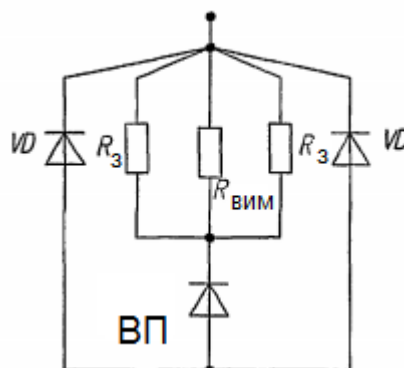


Рисунок 4.2 - Схема розподілу зворотного струму СНП

При виборі опору вимірювального резистора $R_{\text{вим}}$ зі співвідношення $(0,5R_c/R_{\text{вим}} > 10)$ на схемі, рисунок 4.2, практично весь струм витоку або зворотний струм даного ВП буде проходити через вимірювальний резистор $R_{\text{вим}}$ і, таким чином, сигнал з $R_{\text{вим}}$ буде пропорційний шуканому струму. Зворотний струм інших СНП паралельного ряду не буде проходити через вимірювальний резистор $R_{\text{вим}}$. При вимірюванні зворотного струму окремо взятого СНП відводи 3 і 4 пристрої не використовуються.

Виміряний сигнал з $R_{\text{вим}}$ надходить в блок фільтра Ф; з виходу якого виміряні величини надходять в блок перетворення вимірюваних величин БПВВ, де проводиться початкове перетворення вимірюваного сигналу, який потім надходить в аналого-цифровий перетворювач АЦП з якого сигнал надходить в блок перетворення кодів ПК і відображається в цифровому вигляді на табло Т. Блок живлення БЖ служить для живлення ПК, АЦП, БПВВ.

Для цього пристрою експрес-діагностування необхідно провести оцінку похибки вимірювань, визначити умови, при яких вона не перевищить допустимого значення.

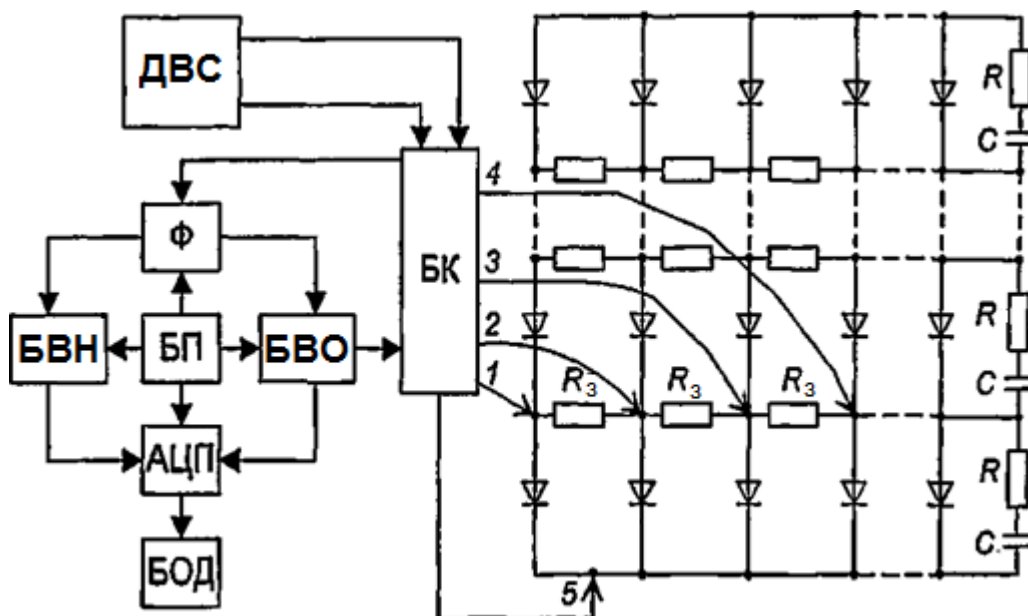
В даному випадку основною є систематична похибка, так як вимірювання проводяться при постійних випробувальних сигналах в стаціонарних умовах. Згідно з отриманими результатами, методична похибка δ_m при трипровідній схемі підключення пристрою діагностування менше, ніж при чотирипровідній в 5 разів, і залежить від значення вимірювального резистора $R_{\text{вим}}$. Необхідно виконувати співвідношення параметрів $0,5R_c/R_{\text{вим}} > 10$.

Цей пристрій для експрес-діагностування зворотного струму СНП забезпечує контроль технічного стану в СП з резисторами зв'язку без демонтажу з похибкою, що не перевищує допустиме значення згідно нормативним документам.

4.1.2 Універсальний пристрій експрес-діагностування напівпровідникових перетворювачів

У процесі виконання магістерської роботи розроблено ще один пристрій експрес - діагностування СП з резисторами зв'язку, який при тих же функціональних можливостях забезпечує більш високу точність вимірювання, рисунок 4.3.

Принцип роботи даного пристрою експрес - діагностування полягає в безпосередньому вимірюванні фактичних значень опорів резисторів зв'язку R_z перетворювача, непрямою вимірюванні струмів в самих резисторах зв'язку R_z і розрахунку за заданим алгоритмом струморозподілу в паралельних гілках. Застосування мікропроцесорної техніки дозволяє опрацювати великий обсяг інформації і визначити потенційно ненадійні СНП в плечі перетворювача з резисторами зв'язку, а також підвищити точність вимірювання за рахунок застосування метрологічних способів зменшення похибки.



ДВС - джерело випробувальних сигналів; БК - блок комутації; Ф - фільтр; БЖ - блок живлення; БВН - блок вимірювання напруги; БВО - блок вимірювання опору; АЦП - аналого-цифровий перетворювач; БОД - блок обробки даних; 1, 2, 3, 4, 5 - відводи пристрою; R_3 - резистори зв'язку, ВП - випробувальний напівпровідниковий прилад

Рисунок 4.3 - Універсальний пристрій експрес - діагностування СП з резисторами зв'язку

При вимірюванні падіння напруги на резисторах зв'язку R_3 , відводи 1, 2, 3, 4, пристрою підключаються до R_3 , які з'єднані також з випробувальними приладами ВП, а відвод 5 пристрою - до спільної точки ВП.

Випробувальний сигнал формується в джерелі випробувальних сигналів ДВС і підводиться через комутаційний блок БК і відвод 5 до катодів ВП. З блоку комутації К при вимірюванні напруги сигнал надходить в блок фільтра високих частот Ф, з виходу якого виміряні величини надходять в блок БВН, де проводиться початкове перетворення вимірюваного сигналу, який потім надходить на вхід АЦП, з якого сигнал надходить в БОД.

При вимірюванні опорів резисторів зв'язку сигнал від ВП через БВО і БК надходить на резистори зв'язку R_3 сигнал з яких через БК, Ф надходить на вхід БВО, і потім в АЦП, звідки сигнал надходить в БОД.

Результатами роботи БОД є отримані значення струмів в гілках за допомогою алгоритму розрахунку схеми перетворювача. Розрахунок схеми проведено методом вузлових напруг, з урахуванням того, що зворотна гілка ВАХ СНП має практично лінійну залежність.

Кількість відводів пристрою залежить від номенклатури перетворювача і визначається кількістю резисторів зв'язку за формулою $(n+2)$, де n - кількість резисторів зв'язку в паралельному ряду. При діагностуванні СП без демонтажу схеми результати обтяжені похибками.

Універсальний пристрій експрес - діагностування СП з резисторами зв'язку істотно підвищує точність діагностики СНП, що знаходяться в плечі перетворювача з резисторами зв'язку без демонтажу самого перетворювача.

4.1.3 Пристрій діагностування СНП в перетворювачі

Розглянуті вище пристрої діагностування вирішують проблему експрес-діагностування СП з резисторами зв'язку. Однак на практиці широко застосовуються перетворювачі без резисторів зв'язку, параметри яких необхідно контролювати.

Запропоновано пристрій для перевірки СНП в перетворювачі. Цей пристрій дозволяє контролювати параметри СНП без необхідності демонтажу перетворювача, а також вирішує проблему діагностування при короткому замиканні в одній або декількох гілках перетворювача.

На рисунку 4.4 приведена схема пристрою діагностування СНП в перетворювачі, що містить джерело живлення ДЖ, блок захисту БЗ, міліамперметр mA, вимірювальні резистори R_{H1} і R_{H2} , вольтметри V1 і V2, перший вимірювальний щуп 1, відвод 2 БЗ, додаткові вимірювальні щупи 3 і 4. Для визначення гілки з короткозамкненими послідовно включеними СНП відвод блоку захисту 2 підключають до катодного групи ПП, а вимірювальні щупи 1, 3, 4 послідовно з'єднують з анодами випробовуваних СНП катодного групи перетворювача. Блок захисту БЗ забезпечує вимикання джерела, живлення ВП при досягненні певного рівня напруги [125].

Опір вимірювальних резисторів R_{H1} і R_{H2} , вибрано з співвідношення

$$R \cdot I_{\text{ист. пнт.}} \leq U_{\text{ТО}},$$

де $R = R_{H1} = R_{H2}$ - опір вимірювальних резисторів, Ом; $I_{\text{дж. жив}}$ - струм джерела живлення, mA; $U_{\text{ТО}}$ - порогова напруга випробувальних СНП, В.

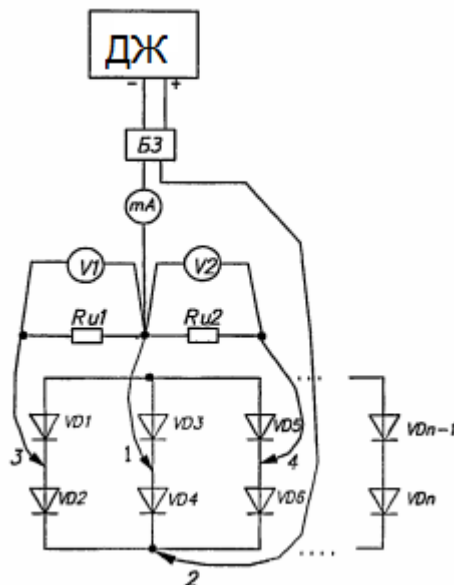


Рисунок 4.4 Пристрій діагностування СНП в перетворювачі

Приклад моделювання роботи даного пристрою зроблений в програмі MULTISIM.

В якості захисту від перевантажень СП в робочому режимі пропонується застосовувати пристрій захисту від перевантажень.

4.2 Розрахунок очікуваного економічного ефекту

Зроблено розрахунок очікуваного економічного ефекту від впровадження в сукупності методики контролю стану СНП і методики виявлення потенційно ненадійних СНП за результатами розподілу зворотних струмів в паралельних гілках без демонтажу перетворювача, для реалізації якої розроблено пристрій експрес-діагностування напівпровідникових перетворювачів.

Розрахунок орієнтовної вартості кількості СНП, що підлягають ремонту: Програма ремонту напівпровідникових перетворювачів на Дніпровському метрополітені в 2019 році склала 12 випрямних установок.

Кількість СНП, що підлягають діагностиці:

$$N = n_{СП} * n_{ВУ}, \quad (4.1)$$

де $n_{СП}$ - кількість СНП в одній випрямної установці, шт; $n_{ВУ}$ - кількість випрямних установок, що підлягають капітальному ремонту, шт.

За формулою (4.1) для УВКМ-6 кількість СНП, що підлягають діагностиці:

$$N_1 = 96 * 3 = 288 \text{ шт.}$$

Для УВКМ-5 кількість СНП, що підлягають діагностиці:

$$N_2 = 192 * 9 = 1728 \text{ шт.}$$

Загальна кількість СНП, які необхідно продіагностувати:

$$N = N_1 + N_2.$$

$$N = 288 + 1728 = 2016 \text{ шт.}$$

Вартість одного діода марки ДЛ161 на 2020 рік становить 1,4 тис. грн. За даними Дніпровського метрополітену при ремонті відбраковують до 30% СНП. Решта 70% після діагностики можуть, бути використані в подальшій експлуатації. З відбракованих 30% СНП близько 40% СНП можна було б зберегти в разі своєчасного виявлення потенційно ненадійних приладів.

Вартість пірометра, який дозволяє проводити випробування випрямних установок під навантаженням, на 2020 рік становить 12 тис. грн. Орієнтовна вартість розробленого пристрою експрес-діагностування на 2020 рік становить 120 тис. грн. Разом капітальні витрати складуть:

						Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K = 12 + 120 = 132 \text{ тис. грн.}$$

Розрахунок очікуваного річного економічного ефекту E_{Γ} від впровадження в сукупності методики контролю стану СНП під навантаженням і методики виявлення потенційно ненадійних СНП за результатами розподілу зворотних струмів в паралельних гілках без демонтажу перетворювача, проведений за формулою:

$$E_{\Gamma} = \Sigma C_1 * Q_1 - E_n * K \quad (4.2)$$

де K -капітальні витрати, тис. грн.; E_n - нормативний коефіцієнт ефективних капіталовкладень для нової техніки, $E_n = 0,15$; C_1 - вартість і-тої складової економіки, тис. грн; Q_1 - обсяг і-тої складової економіки, тис. грн.

$$E_{\Gamma} = (0,3 * 2016 * 1,4) 0,40 - 0,15 * 132 = 318,888 \text{ тис. грн.}$$

Висновки до розділу 4

1. Розроблено методики виявлення потенційно ненадійних СНП за результатами розподілу зворотних струмів в паралельних гілках без демонтажу перетворювача з груповим з'єднанням і пристрою експрес-діагностування на основі даних методик, які дозволяють істотно економити трудовитрати і скоротити час ТО і ремонту НП, зменшити кількість відмов СНП за рахунок виявлення передвідмовних станів.

2. Розглянуто принцип роботи пристрою експрес-діагностування СП без демонтажу.

3. Розглянуто принцип роботи універсального пристрою експрес-діагностування СП без демонтажу.

4. Запропоновано пристрій діагностування СНП в перетворювачі, що дозволяє вирішити проблему діагностування при короткому замиканні в одній або декількох гілках СП.

5. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження розробленої методики виявлення потенційно ненадійних СНП і пристрою експрес-діагностування СНП в перетворювачах метрополітену становить близько 320 тис. грн. на 12 одиниць СП.

						Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ЕКСПРЕС-НАГРІВУ СНП

5.1 Конструктивні параметри пристроїв експрес-нагріву СНП

При проведенні ремонтів ВПІ на базі великих ремонтних заводів і локомотивних депо досить часто доводиться стикатися з необхідністю контролювати електричні параметри великої кількості СНП як при температурі навколишнього середовища, (імпульсна пряма напруга U_{TM} , напруга пробою U_{BR} , тепловий опір перехід-корпус R_{hjc} , струм утримання I_H , час включення t_{gt}), так і при максимально допустимій температурі р-п переходу (імпульсна зворотна напруга, що не повторюється, U_{RSM} ; ударний прямий струм, що не повторюється I_{TSM} ; повторюваний імпульсний зворотний струм I_{RRM} ; час зворотного відновлення t_r ; заряд зворотного відновлення Q ; критична швидкість наростання струму у відкритому стані $(dI/dt)_{crit}$; критична швидкість $(dU_0/dt)_{crit}$ наростання напруги в закритому стані; невідпираючий струм керуючого електрода I_{GD} ; час вимикання по основному колу t_q [12, 13].

В умовах масових випробувань параметрів СНП необхідний рівномірний і швидкий нагрів великої кількості приладів до граничних температур і підтримання цих температур в заданому інтервалі протягом необхідного часу.

Для цих цілей використовуються індукційні печі; термостати звичайних конструкцій. При індукційному нагріванні необхідно застосування джерел струму великої потужності: Нагрівання СНП в термостатах звичайної конструкції досить тривале за часом і інерційне, так як нагрівається тіло оточене повітрям, теплопровідність якого досить невелика, тому передача теплоти від джерела потужності нагрівання протікає з істотною затримкою, а саме нагрівається тіло прогрівається вкрай нерівномірно.

При цьому в залежності від конкретного завдання нагріву (швидкість нагріву, діапазон заданих температур і ін.) виникає проблема вибору конструктивних параметрів пристрою з метою досягнення зазначеного результату.

Параметри роботи пристроїв залежать від їх конструкції і застосовуваних матеріалів. У зв'язку з цим для вибору даних параметрів слід оцінити конструктивні характеристики пристроїв експрес-нагріву, зокрема:

- кількість, форму, потужність і місце розташування електронагрівачів пристрої;
- вибір (тип і характеристики) теплопровідного матеріалу основного теплоносія;
- вибір (тип і характеристики) теплопровідного матеріалу тепловоду;
- форму і геометричні розміри тепловоду;
- загальну масу тепловоду по відношенню до маси пристрою нагріву;
- раціональну кількість каналів для нагріву СНП.

Раціональна кількість каналів розглядається в залежності від:

- 1) конструкції і часу нагріву СНП;
- 2) оптимального часу роботи оператора.

						Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При цьому температура СНП буде залежати від конструкції, швидкості нагріву, режиму підтримки температури нагріву, а також від точності підтримки температури.

Одним з основних параметрів, що визначають працездатність СНП, є максимально допустима температура напівпровідникової структури. Її значення лімітується не тільки температурними властивостями кремнію, але і температурою припою, технологією виготовлення, крім того, для тиристорів вона лімітована температурною залежністю напруги перемикавання. Так значення максимально допустимої температури визначається вимогами до граничних змін параметрів і вимог до стабільності параметрів і надійності протягом терміну служби.

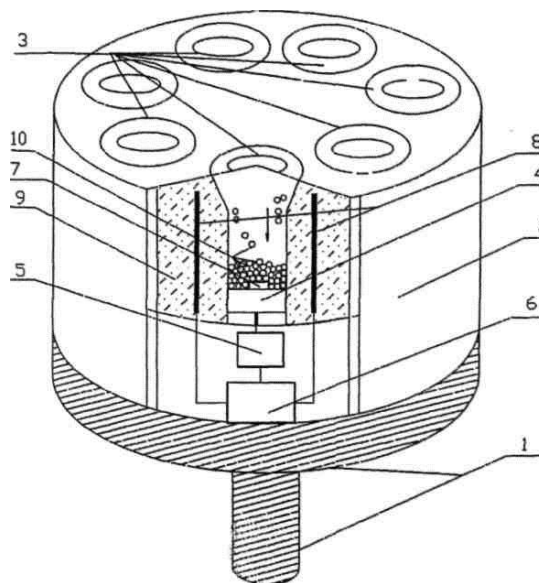
5.2 Серія пристроїв експрес - нагрівання СНП

5.2.1 Пристрій експрес - нагрівання СНП з електродвигуном

З метою забезпечення швидкого і рівномірного нагріву СНП до граничних температур, підтримки цих температур в заданому діапазоні протягом часу запропонована серія автоматизованих пристроїв для експрес-нагріву СНП різних типів.

Пристрій нагріву СНП з електродвигуном, наведено на рисунку 5.1.

Для прискорення нагрівання і забезпечення рівномірного прогріву СНП в термостатах використовується додатковий тепловод, здатний відстежувати зміну форми СНП. В якості такого тепловоду використовуються металеві кульки.



1 - поворотний стіл, 2 - теплопровідне тіло у вигляді барабана; 3 - вертикальні циліндричні канали; 4 - рухомі поршні; 5 - електродвигун; 6 - джерело живлення, 7 - гнізда для СНП; 8 - нагрівачі; 9 - основний теплоносіє; 10 - тепловод.

Рисунок 5.1 - Пристрій нагріву СНП з електродвигуном

В якості основного теплоносія може бути використано трансформаторне масло.

Перед початком нагріву СНП металеві кульки засипаються всередину

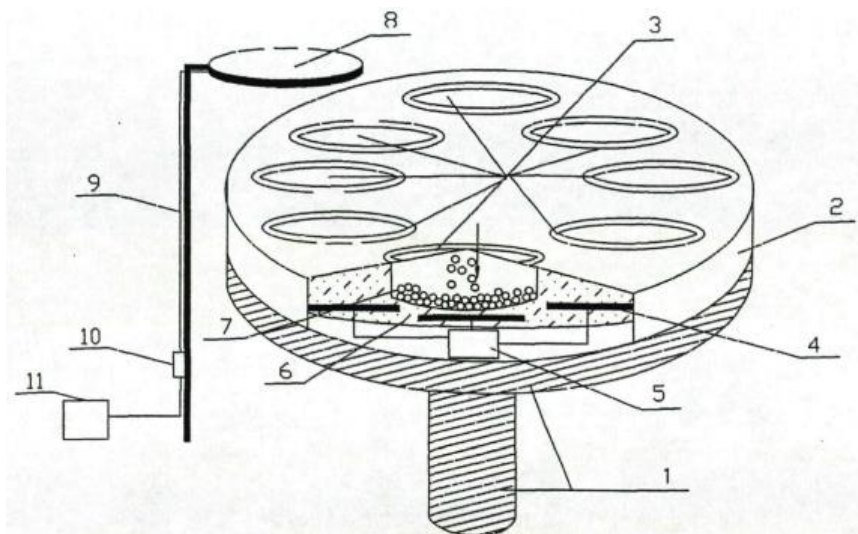
					Арк.
					70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

каналів 3, і здійснюється попередній розігрів пристрою, теплоносія і тепловоду за допомогою нагрівачів. За рахунок поворотного столу барабан з каналами повертається по колу. Перед установкою кожного окремого СНП в термостат рухомий поршень за допомогою електродвигуна приводиться в рух і піднімається до верху каналу. При цьому металеві кульки автоматично звільняють посадочне місце під СНП, залишаючись в розширенні каналу. У гніздо завантажується «холодний» СНП і за допомогою рухомого поршня, що приводиться в рух електродвигуном, опускається на дно каналу: Металеві кульки засипаються в канал поверх СНП за рахунок конструкції каналу - розширення у верхній частині, займаючи весь обсяг, і забезпечуючи найкращу передачу теплоти від теплоносія.

Застосування тепловоду - металевих кульок забезпечує контактний нагрів СНП і дозволяє вирішити проблему рівномірного нагріву СНП за рахунок інтенсивного і рівномірного потоку теплової енергії до об'єкту нагрівання.

5.2.2 Пристрій експрес - нагрівання СНП з електромагнітом

Пристрій нагріву СНП з електродвигуном, розглянутий вище, має деякі недоліки, а саме - складність механічної частини пристрою, недостатню швидкість нагріву СНП, а також значні габарити. Для зменшення габаритів пристрою, прискорення нагріву СНП, а також підвищення коефіцієнта корисної дії розроблено пристрій нагріву СНП з електромагнітом, представлений на рисунку 5.2.



1 - поворотний стіл; 2 теплопровідне тіло у вигляді барабана; 3 - канали для СНП; 4 - нагрівачі, розташовані горизонтально під каналами; 5-джерело живлення; 6 - основний теплоносії; 7 - тепловод; 8 - електромагніт; 9 - кронштейн; 10 - контактор; 11 - джерело живлення електромагніту.

Рисунок 5.2 - Пристрій експрес - нагрівання СНП з електромагнітом

Відмінністю конструкції даного пристрою нагріву від представленого на рисунку 5.1 є спосіб вилучення і завантаження тепловоду (металевих кульок). В даному випадку замість рухомого поршня застосований електромагніт, під дією якого металеві кульки послідовно піднімаються з каналів і після установки СНП, і припинення дії електромагніту під дією сили тяжіння засипаються назад в

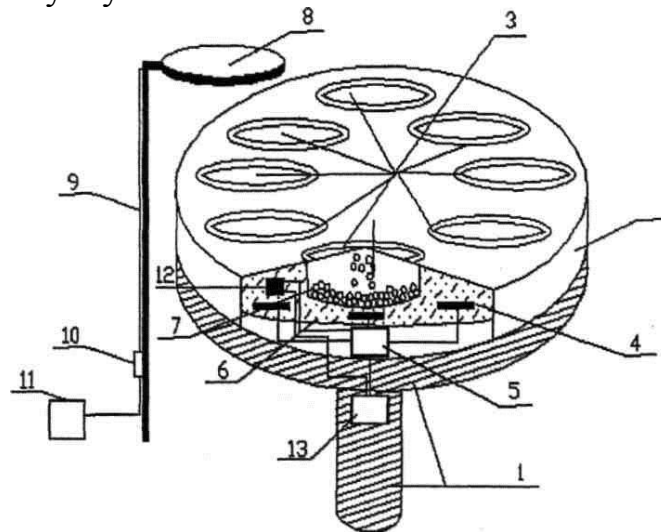
					Арк.
					71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

канал.

Для зменшення вагогабаритних показників пристрою нагріву змінено положення нагрівачів 4. Їх розміщення в горизонтальному положенні під каналами дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії пристрою за рахунок перерозподілу теплових потоків нагрівачів і спростити конструкцію механічної частини пристрою.

5.2.3 Пристрій експрес - нагрівання СНП з автоматичним регулюванням

З метою більш точної стабілізації температури нагріву СНП в заданому діапазоні розроблено пристрій з автоматичним регулюванням нагріву, представлений на рисунку 5.3.



1 - поворотний стіл; 2 - теплопровідне тіло у вигляді барабана; 3 - канали для укладання СНП; 4 - нагрівачі, горизонтально розташовані під каналами; 5 - джерело живлення нагрівачів; 6 - теплоносій; 7 - тепловоду; 8 - електромагніт; 9 - кронштейн; 10 - контактор; 11-джерело живлення електромагніту; 12- датчик температури; 13-стабілізатор температури.
Рисунок 5.3 - Пристрій експрес- нагріву з автоматичним регулюванням нагріву

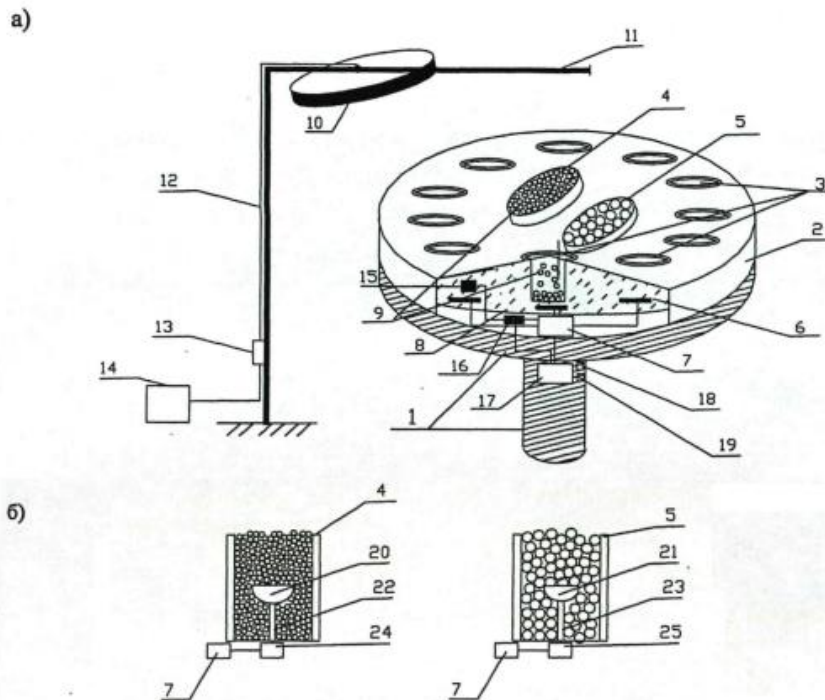
Відмінністю даного пристрою від представлених пристроїв експрес - нагріву СНП на рисунку 5.1 і рисунку 5.2 є наявність в конструкції датчика температури 12 і стабілізатора температури 13. Датчик температури вимірює значення температури нагріву теплоносія і передає його на стабілізатор температури. Стабілізатор температури дозволяє регулювати температуру нагрівання теплоносія, а також візуально контролювати її значення. При цьому з'являється можливість розрахувати температуру напівпровідникової структури СНП, і вивести ці показання на індикатор.

5.2.4 Пристрій експрес - нагрівання СНП з регулюванням швидкості нагріву

Розроблено пристрій для експрес-нагріву СНП, в якому передбачена можливість регулювання швидкості нагріву на різних етапах прогріву СНП і підтримання температури в заданому діапазоні, рисунок 5.4.

Відмінністю даного пристрою для експрес-нагріву від представлених вище є попереднє розігрівання тепловоду - металевих кульок в резервуарах для зберігання за допомогою нагрівачів і теплоносія.

					Арк.
					72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	



а) пристрій; б) резервуари для зберігання тепловоду в розрізі: 1 - поворотний стіл; 2 - теплопровідне тіло у вигляді барабана; 3 - канали для укладання СНП; 4 і 5 резервуари для зберігання і нагрівання тепловоду (металевих кульок різного діаметру); 6 - нагрівачі, горизонтально розташовані під каналами; 7 - джерело живлення нагрівачів; 8 - теплоносій; 9 - тепловідводи; 10 - електромагніт; 11 - балка; 12 - кронштейн; 13 - контактор; 14 - джерело живлення електромагніту; 15 - датчик температури; 16 - стабілізатор температури; 17 - блок контролю температури; 18 і 19 - пускові кнопки; 20 і 21 - дозатори резервуарів; 22 і 23 - рухомі поршні резервуарів 4 і 5 для тепловоду (металевих кульок); 24 і 25 - електродвигуни.

Рисунок 5.4 - Пристрій експрес-нагріву СНП з регулюванням швидкості нагріву

Дозатори 20 і 21 використовуються для нормування кількості металевих кульок. Для регулювання швидкості нагріву випробовуваних СНП застосовуються металеві кульки 9 малого і великого діаметрів.

За допомогою металевих кульок 9 малого діаметра здійснюється швидке нагрівання СНП до максимально допустимої температури, яка контролюється за допомогою датчика температури 15, блоку контролю температури 16. Металеві кульки 9 великого діаметру застосовуються для регулювання швидкості нагріву випробовуваних СНП і підтримки температури нагріву в заданому значенні.

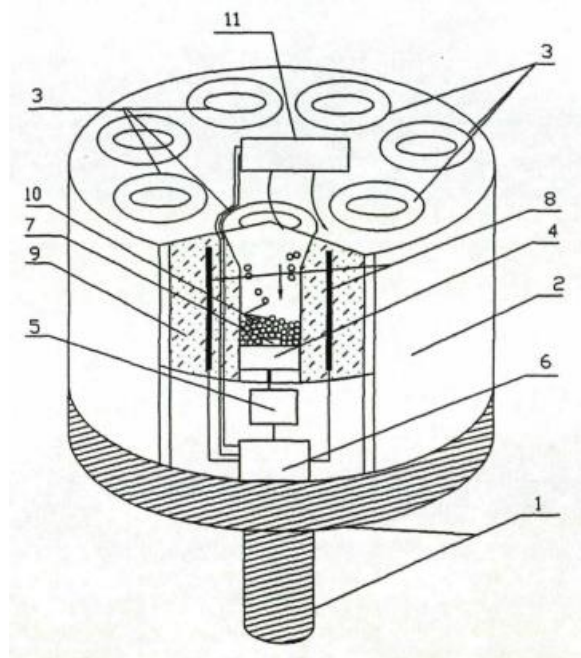
Для цієї мети електромагніт 10 приводиться у включений стан над каналом 3, і металеві кульки 9 малого діаметра за допомогою електромагніту 10 переносяться в резервуар 4, після чого електромагніт 10 переводять в вимкнений стан. Натисканням другої пускової кнопки 19 приводиться в рух асинхронний, двигун 25; рисунок 5.5, за допомогою якого рухомий поршень 23 з дозатором 21 переміщується вгору резервуара 5 для металевих кульок великого діаметру. Після чого електромагніт 10 переводиться у включений стан і переміщається в горизонтальному стані до резервуару 5 для металевих кульок 9 великого діаметру.

Металеві кульки великого діаметру переносяться до верху каналу 3. Після повторного натискання контактора 13 електромагніт 10 наводиться в неробочий стан, і металеві кульки великого діаметра під дією сили тяжіння засипаються в канал з випробуванням СНП.

5.2.5 Пристрій експрес - нагрівання СНП з блоком прогріву

Останнім у серії пристроїв експрес - нагрівання СНП є пристрій для експрес-нагріву СНП з блоком прогріву напівпровідникової структури СНП, рисунок 5.5.

Відмінністю даного термостата для експрес-нагріву від представленого на рисунок 5.1 є додатковий прогрів напівпровідникової структури СНП за допомогою блоку підігріву. Цей пристрій експрес-нагріву СНП дозволяє скоротити час нагрівання і створювати більш рівномірний нагрів напівпровідникової структури.



1 - поворотний стіл, 2 - теплопровідне тіло у вигляді барабана; 3 - вертикальні циліндричні канали; 4 - рухомі поршні; 5 - електродвигун; 6 - джерело живлення, 7 - гнізда для СНП; 8 - нагрівачі; 9 - основний теплоносій; 10 - тепловод; 11- блок прогріву.

Рисунок 5.5 - Пристрій експрес-нагріву СНП з блоком прогріву

Висновки до розділу 5

1 Для контролю електричних параметрів згідно з чинними нормативними документами при максимально допустимій температурі напівпровідникової структури великих партій СНП, запропонована методика, яка може бути використана при вхідному (вихідному) контролі параметрів СНП, що дозволяє скоротити час випробувань і автоматизувати процес контролю приладів.

2 Для реалізації даної методики розроблено серію пристроїв експрес-нагріву СНП.