

УДК 629.423.3:621.314.63

Инв. №

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи
університету,
д.т.н., професор



С.В. Мямлін
2017 р.

НАУКОВИЙ ЕКСПЕРТНИЙ ВИСНОВОК

за результатами порівняльного аналізу силових напівпровідникових
приладів різного конструктивного виконання
виконано за договором № 24.53.17.17 від 20.01.2017 р.

Керівник НДР
зав. кафедрою
«Електротехніка та електромеханіка»
д.т.н., професор

 А. М. Муха

Дніпро – 2017

Список авторів

Керівник НДР,
головний науковий
співробітник, д.т.н.,
проф.



А. М. Муха
(Загальне керівництво роботою.
Контроль якості виконання
робіт.)

Провідний науковий
співробітник, к.т.н.



Ю. С. Бондаренко (Підготовка
звіту.)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 28 стор., 8 рис., 22 посилання.

Об'єкт досліджень - надійність силових напівпровідникових приладів різного конструктивного виконання.

Предмет досліджень - показники надійності силових напівпровідникових приладів різного конструктивного виконання.

Мета роботи - визначення інтенсивності відмов та часу безвідмовної роботи силових напівпровідникових приладів різного конструктивного виконання.

Методи досліджень - порівняльний аналіз показників надійності силових напівпровідникових приладів різного конструктивного виконання.

В процесі досліджень визначено, що інтенсивність відмов СНП паяної конструкції в 10 разів вище, ніж у приладів з притискною конструкцією.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що використання СНП притискної конструкції, з точки зору збільшення часу безвідмовної роботи, є більш доцільним, ніж використання силових напівпровідникових приладів паяної конструкції.

СИЛОВИЙ НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ПРИЛАД, НАДІЙНІСТЬ, КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ, ПАЯНА КОНСТРУКЦІЯ, ПРИТИСКНА КОНСТРУКЦІЯ.

ЗМІСТ

Вступ	5
1. Огляд технологій конструктивного виконання силових напівпровідникових приладів	6
2. Аналіз відмов та показники надійності силових напівпровідникових приладів	14
3. Прогнозований час безвідмовної роботи силових напівпровідникових приладів різного конструктивного виконання	18
4. Особливості спільної роботи силових напівпровідникових приладів різних підгруп	20
Висновки	24
Перелік посилань	26

ВСТУП

В умовах інтенсивного впровадження новітніх технологій в усіх галузях промисловості, не залишаються осторонь виробники та розробники силових напівпровідникових приладів (СНП). Одним з головних критеріїв є стійкість з'єднання напівпровідникової структури та провідникових частин силового приладу до термічного навантаження під впливом електричних втрат у елементах приладу. Якість з'єднання напівпровідникової структури з провідниками в значній мірі визначається його конструктивним виконанням.

1. ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

Напівпровідникові прилади широко застосовуються у багатьох галузях промисловості та транспорту. Залежно від свого функціонального призначення та особливостей експлуатації такі прилади мають різне конструктивне виконання, зокрема розрізняють прилади штирьової та таблеткової конструкції, а за способом кріплення випрямного елементу до анодного та катодного виводів - паяної та притискної конструкції [1, 2, 3].

Прилади притискної конструкції останнім часом набувають більш широкого застосування, оскільки таке конструктивне виконання сприяє значному підвищенню цикlostійкості приладів та підвищенню стійкості до руйнування контактних з'єднань [1, 2, 4, 5, 6].

Загальний вигляд притискної конструкції приладу, на прикладі тиристора Т171-320 наведено на рисунку 1 [1, 2, 4], а реальний вигляд приладу вказаної конструкції, на прикладі діоду ДЛ161, наведено на рисунку 2.

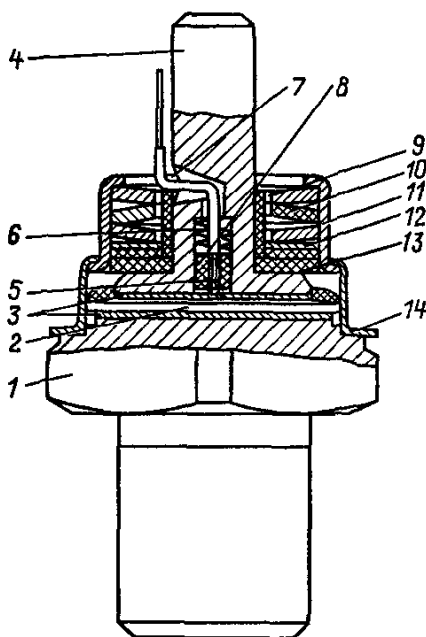


Рисунок 1 – Притискна конструкція приладу на прикладі тиристора Т171-320.



Рисунок 2 – Реальний вигляд приладу притискної конструкції на прикладі ДЛ161

Згідно рисунку та [1, 2] така конструкція являє собою наступне: на мідній основі 1 розміщується випрямний елемент 2, що являє собою кремнієву пластину сплавлену з вольфрамовим або молібденовим диском, який використовується в якості термокомпенсатора. Для покращення електричного контакту з боку основи випрямного елемента розміщуються спеціальні прокладки 3, що, як правило, являють собою м'які диски або шайби зі срібної або мідної, покритої сріблом фольги товщиною близько 0,2 мм. Вдовж осі катодного виводу 4 висвердлений отвір для виведення

керуючого електроду 5 який прижимається до центральної керуючої області випрямного елементу за допомогою пружини 6 і виводиться назовні через радіальний отвір за допомогою ізольованого провідника 7. Ізолятори 8 та 9, в даному випадку, призначені для ізоляції катодного виводу 4 від керуючого електроду та від інших елементів приладу відповідно. Створення необхідного зусилля притискання досягається за рахунок застосування тарілчастих пружин 10. Передача притискного зусилля пружин на всю структуру приладу здійснюється за допомогою тримача 11 через опорну шайбу 12 та опорний ізолятор 13 при остаточному складанні. Фіксація отриманої структури досягається вальцюванням фланцю 14.

Описану конструкцію приладу особливо доцільно застосовувати при діаметрах кремнієвих пластин від 13 мм і більше оскільки порівняно з притискною конструкцією, при відносно великих діаметрах напівпровідникових структур, прилади паяної конструкції характеризуються низьким показником циклостійкості [2].

На рисунку 3 наведено загальний вигляд паяної конструкції приладу, на прикладі тиристора Т160 [1]. Реальний вигляд, на прикладі діоду ДЛ161, представлено на рисунку 4.

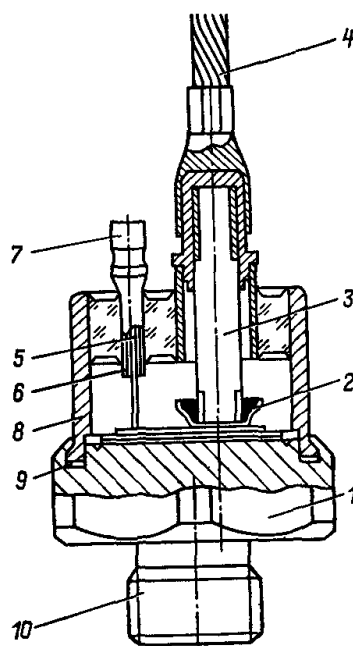


Рисунок 3 – Паяна конструкція приладу на прикладі тиристора Т160



Рисунок 4 – Реальний вигляд приладу паяної конструкції на прикладі ДЛ161

У приладах такої конструкції кремнієва пластина першочергово металізується та напаяється зі сторони аноду на термокомпенсатор з послідуною напайкою на мідну основу 1, яка одночасно служить анодом приладу. До верхнього (з боку катоду) термокомпенсатора випрямного елемента припаюється чашечка 2, до якої в подальшому підпаюється вивід 3, з'єднаний з гнучким зовнішнім виводом 4. За технологією пайки здійснюється також підключення керуючого електроду 5, що з'єднується через ізольовану сталеву втулку 6 з наконечником 7. В мідній основі 1 приладу здійснюється кільцева виточка, в яку перед встановленням корпусу 8 встановлюється фторопластова прокладка 9 що підсилює герметизацію приладу.

Ключовим моментом приладів подібної конструкції є спосіб кріплення випрямного елемента до анодного та катодного виводів. Саме він, згідно [1, 2, 4, 5, 6] визначає низьку надійність таких приладів з точки зору напруцювання на відмову.

На сьогоднішній день широкого застосування знаходять прилади обох конструктивних виконань [7, 8, 9]. При цьому сфера їх застосування головним чином визначається режимами роботи обладнання де застосовуються напівпровідники, а відповідно і особливістю протікання тих чи інших енергетичних процесів. Одним з прикладів є компанія Toshiba Semiconductors, яка виготовляє модулі транзисторів IEGT (Injection Enhanced Gated Transistor) обох конструктивних виконань: ST750GXH21 (750 A, 4,5 кВ), ST1500GXH21 (750 A, 4,5 кВ) – притискової конструкції; MG800GXH1US51 (800 A, 4,5 кВ) – паяної конструкції [7]. Модулі першого типу класифікуються компанією як ті, що призначені до застосування у структурах систем високовольтних ліній передач постійного струму, надпотужних електроприводах і, особливо, у структурі тягових електроприводів електрорухомого складу які характеризуються широким діапазоном режимів роботи [7]. Модулі другого типу рекомендуються до застосування лише у структурі промислових електроприводів.

Аналіз сучасних публікацій [7-13], стосовно модернізації та подальшого удосконалення технології виробництва напівпровідникових приладів, загалом вказує на тенденцію поступової відмови від паяних з'єднань і заміну їх більш сучасними [7, 12, 13]:

- дифузійне спікання (Diffusion sintering);
- дротове склеювання (Wire bonding);
- притискання (Pressure contact).

Так, ще у 1988 році, компанією ABB Semiconductors AG було започатковано технологію Press-Pack, яка в той час широко застосовувалась для виготовлення традиційних напівпровідникових приладів силової електроніки таблеткової конструкції [7]. На сьогоднішній день компанія ABB продовжує розвиток технології Press-Pack яка знаходить своє застосування при виготовленні приладів модульної конструкції, модулів IGBT, IGCT, GTO, які характеризуються високими показниками надійності та одночасно з тим відносно низькою собівартістю [11].

Висока надійність напівпровідникових приладів, зібраних за технологією Press-Pack, пояснюється відсутністю металізованих з'єднань складових частин а відповідно зведенням до мінімуму значень механічних напружень, які виникають у них при температурних коливаннях, що є характерним для приладів з іншими типами з'єднань [11, 12, 14]

Структура модулю подібної конструкції наведена на рисунку 5.

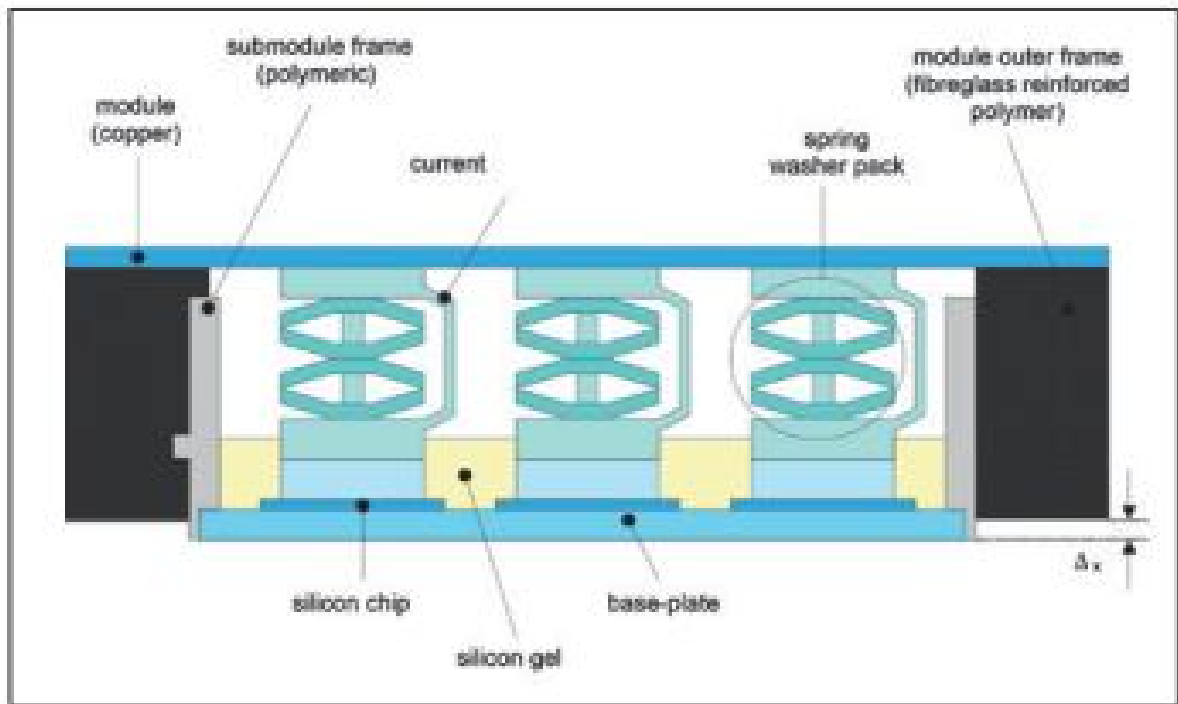


Рисунок 5 – Внутрішня структура напівпровідникового модулю компанії ABB, виготовленого за технологією Press-Pack

Окрім технології Press-Pack широкого застосування набуває технологія низькотемпературного зварювання з використанням ультразвуку (Wire bonding), що являє собою процес низькотемпературного зварювання, де ультразвукова енергія використовується для приєднання алюмінієвих провідників до алюмінієвих, мідних або золотих поверхонь [11, 12] (рис. 6).



Рисунок 6 – Приклад виконання з'єднання за технологією Wire bonding.

Аналогічно до компанії АВВ провідні виробники напівпровідникових приладів застосовують подібні або ті ж технології при виробництві, поступово відмовляючись від традиційних паяних з'єднань. Так, компанія Semikron, керуючись ідеєю технології Press-Pack, здійснює виготовлення інтегральних силових модулів за технологією SKiiP (Semikron integrated intelligent Power Module). Основною ідеєю технології є виключення зі складу приладу опорної мідної основи з встановленням DBC-кераміки безпосередньо на охолоджувач що призводить до відсутності великої площі пайки [7, 12]. Приклад конструкції напівпровідникового модулю, зібраного за технологією SKiiP наведено нижче (рис. 7) [7, 8].

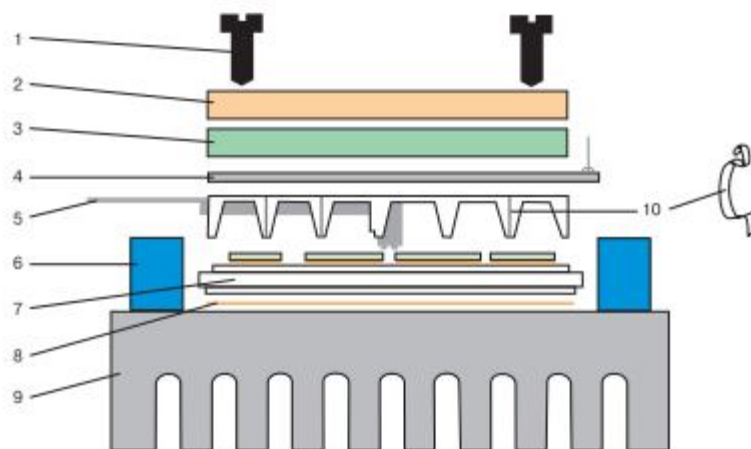


Рисунок 7 – Приклад конструкції модулю, виконаного за технологією SKiiP

В даній конструкції шар DBC-кераміки 7 з напаяними за технологією Wire bonding чіпами через теплопровідну прокладку (або теплопровідну пасту) встановлюється безпосередньо на охолоджувач 9. Силові контакти 5 та контакти керування модулем 4, 10 є притискними та з'єднуються з електричною частиною модулю за технологією Pressure contact. Необхідне притискне зусилля контактів забезпечується кришкою 2, яка через еластичну прокладку 3 притискається до структури за допомогою гвинтів 1.

За аналогічними принципами виготовлення напівпровідникових приладів здійснюють і інші передові компанії, такі як Toshiba, Hitachi , які широко застосовують технології на основі Press-Pack [8], а також Fuji Electric, Infineon базовою технологією складання напівпровідників яких є Wire bonding та їй подібні [15, 16].

Таким чином, заміна паяних з'єднань на більш сучасні технологічні рішення є ключовим напрямком розвитку, що об'єднує всі компанії-виробники в прагненні разом зі зниженням собівартості напівпровідникових приладів досягти підвищення їх надійності.

2. АНАЛІЗ ВІДМОВ ТА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

Надійність є комплексною величиною, яке включає в загальному випадку безвідмовність, ремонтпридатність, довговічність, збереженість [17]. В умовах застосування СНП в схемах електрорухомого складу (ЕРС) необхідно враховувати всі ці чотири фактори.

До основних показників надійності електронної апаратури, у тому числі силових напівпровідникових приладів, відносяться: показники безвідмовності (імовірність безвідмовної роботи, середній наробіток на відмову, інтенсивність відмов і ін.) і довговічності, показники ремонтпридатності (імовірність відновлення, інтенсивність відновлення, середній час відновлення та ін.), показники зберігання (середній термін зберігання) [17].

За допомогою показників надійності проводиться оцінка випадкових величин - часу безвідмовної роботи, часу відновлення, часу збереження параметрів при зберіганні, напрацювання апаратури або її елементів в циклах [18].

На практиці для визначення ймовірності безвідмовної роботи електронної апаратури протягом часового інтервалу найбільш часто використовується експонентний закон розподілу часу безвідмовної роботи [18, с.425]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де λ - інтенсивність відмов апаратури, приладів.

При цьому вважаємо, що електронна апаратура пройшла період підробітки; потік відмов є найпростішим; старіння елементів відсутнє.

Інтенсивність відмов електронної апаратури для електрорухомого складу залізниць визначається згідно виразу [18, с.477]:

$$\lambda_{зал} = k_a \cdot \lambda, \quad (2)$$

де $k_a = 70$ – коефіцієнт, що враховує умови експлуатації апаратури на рухомому складі залізниць.

Задача визначення інтенсивності відмов силових напівпровідникових приладів є досить складною, оскільки відмова силового напівпровідникового приладу може відбутися за декількох чинників [6,19]: обрив контактних з'єднань, коротке замикання, пробій та параметричні (відхилення параметрів). У відсотковому відношенні вага кожного з чинників наступна: обрив - 15%, КЗ - 15%, пробій - 5%, параметричні - 65%.

Основну увагу необхідно звернути на те, що різні електричні з'єднання всередині корпусу СНП паяної конструкції створюються із застосуванням паяння м'якими припоями з температурами плавлення від 180°C до 350°C. Матеріали, щозастосовуються для створення напівпровідникових приладів, відомі зі світової практики, це: монокристалічний кремній (Si), молібден (Mo) і мідь (Cu). Матеріали суттєво відрізняються коефіцієнтами термічного розширення (КТР), так:

- для монокристалічного кремнію $КТР = 2,5 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$;
- для молібдену $КТР = 5,4 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$;
- для міді $КТР = 17,0 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$;
- для припоїв на основі олова (Sn) і свинцю (Pb) $КТР = 19,0 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

При імпульсних теплових впливах на СНП в струмових режимах циклів і впливах ударними струмами, розвиваються втомні явища в паяних

з'єднаннях, що обумовлює їх низьку надійність. Стійкість СНП до струмових перевантажень значною мірою визначається рівномірністю розподілу струму по площі силової структури. На розподіл щільності струму по структурі впливає цілий ряд факторів: рівномірність питомого опору кремнію, якість обробки поверхні кристала, якості забезпечення електричних контактів і т. д. При складанні випрямляючого елемента з мідною основою застосовуються припої з низькою межею плинності (наприклад, ПОС-61). Цей контакт найбільш слабе місце, яке і визначає межу циклостойкості діодів паяної конструкції.

У відповідності з інформаційними матеріалами на діод ВЛ200, при перепаді температури 80°C число циклів до відмови з імовірністю 0,5 становить 7,5 тисяч, згідно каталогу [20].

У СНП, які працюють в схемах з відносно невеликою робочою напругою, струму перевантаження може виявитися достатньо для часткового розплавлення припою у спаї кремній – молибден, що пред'являє особливі вимоги до вибору припою. Після припаювання випрямляючого елемента до мідної основи (яке проводиться при температурі не менше 200°C) і охолодження приладу до температури навколишнього середовища, в припої виникають розтягуючі, а в міді і молибдені стискаючі зусилля. Таким чином, після охолодження, всі елементи конструкції будуть мати певну радіальну деформацію, максимальну в шарі пов'язаному з молибденом і міддю. Одним з важливих дефектів в паяному з'єднанні, є відсутність його цілісності та наявність усадочних порожнеч. Усадочні порожнечі, а також газові пористості здійснюють несприятливий вплив на міцність паяного з'єднання. Особливо різко знижує втомну міцність паяного з'єднання порожнечі, розташовані біля його краю. Це призводить до місцевих перегрівів, які і є центрами рекристалізації припою після його охолодження. Коли діод починає нагріватися під дією струмового навантаження, напруження розтягу спочатку зменшуються до нуля, потім змінюють знак і стають напруженнями стиску. Якщо температура переходу підвищується до певної величини, виникає явище пластичної течії припою. При охолодженні припою напруга в

паяному шарі змінюється, процес спочатку має пружний характер, поки знову не буде досягнутий рівень його пластичної течії. Таким чином, поступово руйнується паяне з'єднання від появи перших пластичних деформацій до моменту його повного руйнування. Цей процес докладно розглянуто в роботі [8].

Аналіз фізичних процесів, що відбуваються при струмовому циклуванні, показує, що основною причиною відмов силових напівпровідникових є руйнування паяних з'єднань. Головним наслідком цього процесу є збільшення теплового опору переходу (Mo-Cu), підвищення температури структури при незмінному струмі, збільшення падіння напруги, зростання струму витoku і зниження класу по напрузі, тобто починається параметрична відмова СНП.

При досить великих напругах, зменшення робочої площі контактів (пов'язане з процесом руйнування припою) призводить до збільшення щільності струму через діод, призводячи до збільшення падіння напруги. Процес йде порівняно повільно, відносно збільшення падіння напруги виявляється набагато менше, ніж відносно збільшення теплового опору. Тому за міру руйнування, насамперед, приймається тепловий опір. При певному числі струмових циклів відбувається утворення безлічі зон руйнування припою. Значення теплового опору досягає граничної величини, силова структура діода перегрівається і виходить з ладу.

Комплексним показником, який характеризує стійкість СНП до струмових та теплових перевантажень є цикlostійкість. Середня цикlostійкість характеризується кількістю циклів нагріву та охолодження із заданою величиною перепаду температури, яке витримує вентиль до виходу з ладу [8]. Для СНП паяної конструкції середня цикlostійкість не перевищує 10 тис. циклів [7]. Для приладів побудованих з використанням багат шарових паяно-зварних з'єднань це значення сягає 40 тис.циклів, а для приладів притискної конструкції 100 тис. циклів, тобто в 10 разів більше ніж у приладів традиційної паяної конструкції. Таким чином, можна вважати, що

інтенсивність відмов СНП паяної конструкції в 10 разів вище, ніж у приладів з притискною конструкцією.

3. ПРОГНОЗОВАНИЙ ЧАС БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ РІЗНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ

При виконанні досліджень, метою яких є визначення прогнозованого часу роботи електронної та перетворювальної техніки, з використанням різної елементної бази доцільним є провести порівняння часу безвідмовної роботи, за умов однакового рівня вірогідності безвідмовної роботи.

В разі використання СНП паяної конструкції вірогідність безвідмовної роботи одного вентиля може бути визначена як:

$$P_{\text{паян}}(t) = e^{-\lambda_{\text{паян}} t_{\text{паян}}} \quad (3)$$

Аналогічно для СНП притискної конструкції:

$$P_{\text{притискн}}(t) = e^{-\lambda_{\text{притискн}} t_{\text{притискн}}} \quad (4)$$

Виходячи з умови реалізації однакового рівня безвідмовної роботи СНП різного конструктивного виконання $P_{\text{притискн}}(t) = P_{\text{паян}}(t)$ отримуємо:

$$e^{-\lambda_{\text{паян}} t_{\text{паян}}} = e^{-\lambda_{\text{притискн}} t_{\text{притискн}}} \quad (5)$$

тобто

$$\lambda_{\text{паян}} t_{\text{паян}} = \lambda_{\text{притискн}} t_{\text{притискн}} \quad (6)$$

Враховуючи, що інтенсивність відмов СНП паяної конструкції в 10 разів вище, ніж у приладів з притискною конструкцією, отримуємо:

$$10 \cdot \lambda_{\text{притискн}} t_{\text{паян}} = \lambda_{\text{притискн}} t_{\text{притискн}} \quad (7)$$

тоді співвідношення прогнозованого часу роботи силових напівпровідникових приладів різного конструктивного виконання дорівнюватиме:

$$\frac{t_{\text{притискн}}}{t_{\text{паян}}} = 10 \quad (8)$$

тобто СНП притискної конструкції мають час напрацювання на відмову більший в 10 раз ніж у приладів паяної конструкції, при однакових умовах експлуатації.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що використання СНП притискної конструкції, з точки зору збільшення часу безвідмовної роботи, є більш доцільним, ніж використання силових напівпровідникових приладів паяної конструкції.

4. ОСОБЛИВОСТІ СПІЛЬНОЇ РОБОТИ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ РІЗНИХ ПІДГРУП

Як правило максимальні струми і зворотні напруги СНП обмежені і тому однотипні СНП доводиться з'єднувати в групи для збільшення потужності статичних перетворювачів [22].

Поєднуючи СНП паралельно, необхідно прагнути до рівного розподілу струму навантаження за приладами. Потрібно забезпечити ідентичність умов роботи СНП і рівність вольт-амперних характеристик, з огляду на технологічний розкид параметрів.

Для вирішення цього завдання необхідно наступне:

- послідовно з кожним напівпровідникових приладом встановлювати електромагнітні або омичні ділянки струму;
- здійснювати добір напівпровідникових приладів за статичними втратами в робочій точці (за значенням U_{TM} / U_{FM} на робочому струмі). Слід зазначити, що завжди існує певний технологічний розкид параметрів СНП.
- при проектуванні перетворювачів, що мають паралельне з'єднання напівпровідникових приладів, рекомендується обирати робочі струми, що знаходяться вище точки інверсії вольт-амперної характеристики СНП. В цьому випадку вирівнювання струмів в паралельних гілках буде відбуватися автоматично, так як в області ВАХ, що лежить вище точки інверсії, діє негативний зворотний зв'язок, тобто при збільшенні температури р-п переходу збільшується його опір і зменшується прямий струм, що призводить до зниження температури р-п переходу;
- для мінімізації впливу часу включення окремих тиристорів і як наслідок - нерівномірного розподілу струму по гілках в первинний момент часу, необхідно застосовувати потужні імпульси керування з крутим фронтом, що призводить до зменшення часу затримки ввімкнення тиристора і мінімізації впливу цього ефекту на перерозподіл струму по паралельних гілках;

- в схемах, де застосовуються потужні високовольтні тиристори, виконані на кристалах великих діаметрів (більше 56 мм), а також при наявності великих індуктивностей в силовій частині, які обмежують швидкість зміни силового струму, необхідно додатково враховувати час поширення ввімкненого стану тиристора. Це пов'язано з тим, що потужні тиристори в початковий момент часу вмикаються в обмеженій області поблизу керуючого електрода, після цього за обмежений час відбувається позовжнє поширення ввімкненого стану;

- конструктивне розташування паралельних гілок має забезпечувати рівність опорів струмоведучих шин, включаючи запобіжники;

- для всіх приладів, що входять в паралельне з'єднання, умови охолодження повинні бути однакові.

Поєднуючи тиристори або діоди послідовно, необхідно намагатися забезпечити рівномірний розподіл прямої і (або) зворотної напруги, як в стаціонарному стані, так і в динамічних режимах, а саме - при ввімкненні тиристорів і при відновленні блокуючих властивостей під час вимикання тиристора або діода.

Причини нерівномірного розподілу блокуючих напруг можуть бути наступні:

- відмінності витоків в послідовно з'єднаних приладах внаслідок природного технологічного розкиду і (або) різних робочих температур внаслідок, наприклад, різних умов охолодження (до відома: в середньому зміна температури на 8°C призводить до зміни витоків у два рази). Перенапруження виникає на приладах, що мають менше значення струму витоку;

- розкид часу включення окремих тиристорів, з'єднаних послідовно у гілці, веде до перерозподілу напруги між ввімкнутими раніше і тиристорами які вмикаються із запізненням. Перенапруження виникає на тиристорах, що вмикаються із запізненням;

- розкид величин заряду зворотного відновлення в послідовно з'єднаних приладах призводить до того, що в момент відновлення такі прилади приймають зворотну напругу в різний час;

- перенапруга виникає на тиристорах, що мають менший заряд зворотного відновлення.

Зокрема на електрорухомому складі залізничного транспорту широко застосовуються силові напівпровідникових приладів різних типів, серед яких діоди серії ВЛ200. Ці діоди масово застосовувалися у випрямляючих установках одностипних електровозів змінного і постійного струму серій: ЧС-4, ВЛ-80в/і, ВЛ-82м, ЧС-8 та тепловозів серій: ТЭП70, 2ТЭ116 та інших.

Наприклад, у випрямляючого блоку серії ВУК-4000Т електровозів серії ВЛ80 було встановлено 192 шт. діодів серії ВЛ200, які масово застосовувались і при проведенні капітальних ремонтів КР1 та КР2.

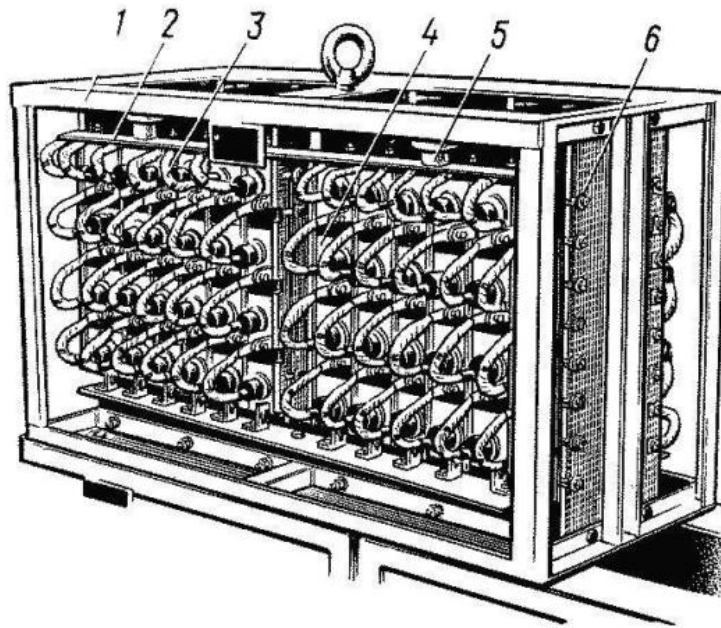


Рисунок 8 - Зовнішній вигляд випрямляючого блоку серії ВУК-4000Т електровозів серії ВЛ80

Згідно [21] діоди, для забезпечення струмового розподілення, повинні мати чітко визначені технічні параметри, а саме:

1. Діоди повинні поставлятися з імпульсним зворотнім струмом, що повторюється не більш 2 мА. В період зберігання та експлуатації допускається збільшення імпульсного зворотного струму до 5 мА;

2. Значення імпульсної прямої напруги, середнє значення, повинне знаходитися в межах: $0,52 \div 0,58$ В;

3. Амплітудне значення імпульсної прямої напруги повинно знаходитись в межах $1,11 \div 1,24$ В.

Це вимагає їх додаткового відбору за значенням імпульсного прямого падіння напруги при проведенні робіт з ремонту та модернізації перетворювачів. Для зручності заміни в експлуатації лавинні діоди для перетворювачів електрорухомого складу розбиті на дві підгрупи, кожна з яких має таке маркування:

I підгрупа 1,11 - 1,16 В включно, що відповідає середньому значенню $0,52 - 0,54$ В

II підгрупа 1,17 - 1,24 В включно, що відповідає середньому значенню $0,55 - 0,58$ В

Маркування за значенням прямої імпульсної напруги на корпусі діодів забезпечує можливість їх підбору для паралельної роботи. Монтаж діодів без підбору призводить до нерівномірного розподілу струму між гілками, перевантаження окремих гілок і, в результаті, зниження надійності роботи випрямної установки електровоза.

Для забезпечення якісного ремонту в умовах експлуатаційних підприємств необхідно проводити вхідний контроль за вказаними вище параметрами, у відповідності до нормативної документації. Це можливо виконувати за умов наявності спеціалізованого обладнання, зокрема випробувальних стендів, що дозволить зменшити експлуатаційні витрати на ремонт та модернізацію електрорухомого складу.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз фізичних процесів, що відбуваються при струмовому циклуванні, показує, що основною причиною відмов силових напівпровідникових є руйнування паяних з'єднань. Головним наслідком цього процесу є збільшення теплового опору переходу (Mo-Cu), підвищення температури структури при незмінному струмі, збільшення падіння напруги, зростання струму витоку і зниження класу за напругою, тобто починається параметрична відмова СНП.

2. Комплексним показником, який характеризує стійкість СНП до струмових та теплових перевантажень є цикlostійкість. Середня цикlostійкість характеризується кількістю циклів нагріву та охолодження із заданою величиною перепаду температури, яке витримує вентиль до виходу з ладу. Для СНП паяної конструкції середня цикlostійкість не перевищує 10 тис. циклів. Для приладів побудованих з використанням багат шарових паяно-зварних з'єднань це значення сягає 40 тис.циклів, а для приладів притискної конструкції 100 тис. циклів, тобто в 10 разів більше ніж у приладів традиційної паяної конструкції. Таким чином, можна вважати що інтенсивність відмов СНП паяної конструкції в 10 разів вище, ніж у приладів з притискною конструкцією.

3. СНП притискної конструкції мають час напрацювання на відмову більший в 10 раз ніж у приладів паяної конструкції, при однакових умовах експлуатації.

4. Отримані результати дозволяють стверджувати, що використання СНП притискної конструкції, з точки зору збільшення часу безвідмовної роботи, є більш доцільним, ніж використання силових напівпровідникових приладів паяної конструкції.

5. Маркування за значенням прямої імпульсної напруги на корпусі діодів забезпечує можливість їх підбору для паралельної роботи. Монтаж

діодів без підбору призводить до нерівномірного розподілу струму між гілками, перевантаження окремих гілок і, в результаті, зниження надійності роботи випрямної установки електровоза.

6. Для забезпечення якісного ремонту в умовах експлуатаційних підприємств необхідно проводити вхідний контроль за вказаними вище параметрами, у відповідності до нормативної документації. Це можливо виконувати за умов наявності спеціалізованого обладнання, зокрема випробувальних стендів, що дозволить зменшити експлуатаційні витрати на ремонт та модернізацію електрорухомого складу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Чебовский О. Г. Силовые полупроводниковые приборы: справочник / Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Недошивин Р. П. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.
2. Расчёт силовых полупроводниковых приборов / [Дерменжи П.Г., Кузьмин В.А., Крюкова Н.И. и др.]; под. ред. В.А. Кузьмина. – М.: Энергия, 1986. – 184 с.
3. Гришанин А. Мощные диоды и тирсторы для преобразовательной техники нового поколения / А. Гришанин, В. Елисеев, В. Мартыненко // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. – 2014. – №4. – С. 102–109.
4. Вишневский А. И. Силовые ионные и полупроводниковые приборы / Вишневский А. И., Руденко В.С., Платонов А. П. – М.: Высшая школа, 1975. – 343 с.
5. Верёвкин В. Краткие результаты исследования поддельных силовых полупроводниковых приборов / В. Верёвкин, А. Солодовник, А. Санчугов // *Силовая электроника*. – 2012. – №5. – С. 68–70.
6. Бардин В.М. Надёжность силовых полупроводниковых приборов. / Бардин В.М. – М.: Энергия, 1978. – 96 с.
7. Флоренцев С. Силовые IGBT-модули – основа современного преобразовательного оборудования. / Флоренцев С. // *Электронные компоненты*. – 2002. – №6. – С. 11–17.
8. Штокмайер Т. От «корпусных» к «бескорпусным». Тенденции рынка силовых полупроводниковых модулей / Штокмайер Т. ; пер. А. Колпаков // *Компоненты и технологии*. – 2008. – №8. – С. 108–116.
9. Welleman A. Полупроводниковые компоненты и твёрдотельные ключи компании АВВ для импульсной техники / А. Welleman, Е. Ramezani, J.Waldmeyer ; пер. И.Корзина, А.Чекмарёв // *Силовая электроника*. – 2007. – №3. – С. 12–14.

10. Каменцев, Ю.Г. ОАО «Электровыпрямитель» создает силовую электронику 5-го поколения/ Ю.Г. Каменцев // Журнал «Волга-Бизнес». – 2013. – №2. – С.34.
11. Power semiconductors: product brochure, 2016. – [Switzerland: ABB Switzaerland Ltd Semiconductors, 2016]. – 40 p.
12. Application Manual Power Semiconductors. – [SEMIKRON International GmbH, 2015]. – 452 p.
13. TECHSEM Pressure contact newsletter [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://trgcomponents.com/uploads/media/TECHSEM_Pressure_Contact_Newsletter.pdf
14. Sihua Wen. Thermal and Thermo-Mechanical Analyses of Wire Bond vs. Three-dimensionally Packaged Power Electronics Modules: chapter 1 [Электронный ресурс]: (Thesis submitted to the faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of science). – Режим доступа: <https://theses.lib.vt.edu/theses/available/etd-0106100-113320/unrestricted/ChpI.pdf>
15. Solder Bond Modules: product brief, 2016. – [Infineon Technologies Bipolar GmbH & Co. KG, 2016]. – 2 p.
16. Fuji IGBT modules application manual. – [Fuji Electric Co., Ltd, 2016]. – 132 p.
17. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения; Введ.01.07.90. – М.: Изд-во стандартов, 1990. - 37 с.
18. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники: В 2 т. Под ред. Б.Х. Кривицкого, В.Н. Дулина. – М.: Энергия, 1977. – Т.1. – 504 с.
19. Килибаева, Ж. К. Анализ отказов и надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / Ж. К. Килибаева // Молодой ученый. — 2014. — №8.1. — С. 13-16.
20. Информационный каталог М., Информэлектро, 1979. «Диоды лавинные типов ВЛ10, ВЛ25, ВЛ50, ВЛ200, ВЛ5-200, ВЛ320».
21. «Руководству на ремонт выпрямительных установок за № 105.80900.13291».

22. Параллельное и последовательное соединение силовых полупроводниковых приборов. [Электронный ресурс]: (статьи на сайте ЗАО «Протон-Электротекс»). – Режим доступа: http://www.proton-electrotex.com/files/project_52/01_Parallelinoe_i_posledovatelinoe_soedinenie_SPP_rus.pdf.