

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ВОЗНЯК АНДРІЙ ГЕННАДІЙОВИЧ

УДК 621.373.52

**ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ І ТИСКУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ І ГЕРМЕТИЧНОСТІ ВУЗЛІВ
ВОЛОГОЗАХИСТУ ПЛІВКОВИХ КОНДЕНСАТОРІВ**

05.02.09 – Динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрах “Прикладної механіки” і “Телекомунікацій та радіотехніки” в Хмельницькому національному університеті, м. Хмельницький

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
заслужений діяч науки і техніки України

Ройзман Вілен Петрович,
Хмельницький національний університет
(м. Хмельницький),
Завідувач кафедри телекомунікацій та
радіотехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Зінковський Анатолій Павлович,
Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка
НАН України (м. Київ),
Заступник директора Інституту з наукової роботи,
Завідувач відділом коливань та вібраційної надійності

доктор технічних наук, професор
Шайко-Шайковський Олександр Геннадійович,
Чернівецький національний університет
імені Ю. Федьковича (м. Чернівці),
професор кафедри професійної та технологічної
освіти і загальної фізики

Захист відбудеться 28 листопада 2018 р. о 15.00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06 в Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, навчальний корпус 14, ауд. 61).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “24” 10 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент

Шоловій Ю. П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Аналіз конструкторських особливостей сучасних виробів радіоелектронної апаратури (РЕА) показує, що вирішення завдань щодо забезпечення захисту від вологи (герметичності) і стійкості при зміні температури і тиску навколишнього середовища призвело до використання в конструкціях нових матеріалів з недостатньо вивченими властивостями і об'єднанню таких різномірних матеріалів. Механічна взаємодія, що виникає в таких конструкціях, наприклад в плівкових конденсаторах, може істотно вплинути як на протікання основних електричних процесів, так і на працездатність виробу загалом. Конденсатори складають основу практично будь-якого приладу РЕА, а через їх дефекти відбувається до 60% від загальної кількості відмов РЕА. Серед цих відмов значна кількість має місце через розгерметизацію конденсаторів при зміні температури і тиску навколишнього середовища. По даним національних симпозиумів у США найбільшу інтенсивність відмов мають електролітичні алюмінієві конденсатори. У нас також існує проблема відмови тонкоплівкових алюмінієвих конденсаторів К-78, К-50 та інших через розгерметизацію їх вузлів вологозахисту з прохідними выводами. Тому актуальною науково-технічною задачею є розробка методів та засобів їх захисту від вологи і стійкості. Проте, в даний час, роботи з проектування РЕА часто проводяться лише у виключно радіотехнічному напрямку, без необхідних розрахунків на міцність, без вимірювання напружень і оцінки напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій в цілому і їх окремих елементів. В той же час сучасні вимоги і майбутнє радіоелектроніки, а також сфери її використання, висувають в один ряд з виключно радіоелектронними завданнями проблему забезпечення їх механічної міцності і надійності.

Крім того, для забезпечення функціональної роботоздатності виробів сучасних РЕА виникає необхідність більш детального вивчення питань їх герметичності, оскільки їх вирішенню зараз приділяють недостатньо уваги.

В даній роботі вирішується задача визначення впливу температури і тиску на характеристики деформування та герметичності виробів РЕА на прикладі вузла вологозахисту плівкового конденсатора К-78 (плівковий полістирольний), який широко застосовується в різних медичних приладах, зокрема в дефібриляторах для запуску роботи серця, що зупинилось при операції. Саме експлуатація такого конденсатора показала, що йому притаманно розтріскування компаунда та його відшарування від циліндричного корпусу і виводу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась за особистою участю автора в Хмельницькому національному університеті і відповідає науковому напрямку динамічна міцність машин і приладів РЕА, який був започаткований на кафедрі прикладної механіки, а відтак до сьогодні – на кафедрі телекомунікацій та радіотехніки, а також у держбюджетних роботах 4Б-2015 “Розвиток наукових та інженерних основ надійності електронної техніки шляхом удосконалення

технологій її тестування на вібрації та удари” та “Розробка наукових основ захисту виробів радіоелектроніки, закріплених на об’єднувальних платах, від деформації плат, а плат від динамічних і теплових навантажень” (№ ДР 0117U001168).

Мета роботи полягає у встановленні закономірностей впливу температури і тиску на характеристики деформування та герметичності вузлів вологозахисту плівкових конденсаторів та розробці теоретично-експериментальних методів виявлення причин їх деформування та розгерметизації і рекомендацій з запобігання таких дефектів.

Для досягнення сформульованої мети роботи були визначені такі **задачі**:

1. Розробити теоретично-експериментальні методи виявлення причин деформування та розгерметизації корпусів конденсаторів з урахуванням особливостей конструкції і умов їх експлуатації в приладах та апаратах РЕА .

2. Розробити математичні моделі впливу температури навколишнього середовища в діапазоні $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$... $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиску на міцність та герметичність корпусу плівкового конденсатора і його елементів як на етапі полімеризації компаунда, так завершення процесу полімеризації для підвищення міцності.

3. Розробити математичну модель взаємодії герметизуючого компаунда з оболонкою плівкового конденсатора і його контактним виводом для підвищення міцності при термоударах $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$... $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Провести комплекс експериментально-розрахункових досліджень з визначення впливу температурних умов на характеристики його деформування та герметичності стосовно його міцності.

5. Розробити рекомендації з підвищення функціональної роботоздатності компаундованих гермовузлів.

Об’єктом дослідження є характеристики деформування та герметичності вузлів вологозахисту плівкових конденсаторів.

Предмет дослідження – закономірності впливу температури і тиску на характеристики міцності та герметичності вузлів вологозахисту плівкових конденсаторів.

Наукова новизна.

1. Розроблено математичну модель впливу розігрітого повітря всередині корпусу плівкового конденсатора на етапі заливки і полімеризації компаунда на герметичність гермовузла, на основі якої запропонована альтернативна технологія полімеризації компаунда, яка забезпечує герметичність і міцність.

2. На основі математичного аналізу взаємодії системи “корпус-компаунд-вивід” в діапазоні температур $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$... $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, в яких може експлуатуватись апаратура, до складу якої входить конденсатор, розраховані розміри канавки в компаунді для вузлів вологозахисту (герметизації) конденсаторів трьох типорозмірів, котра забезпечує герметичність конструкцій конденсаторів К78 і його міцність.

3. Запропоновано застосування розділювального кільця у конструкції вузла вологозахисту і проведено обґрунтування його ефективності. Визначені

розміри такого кільця, які забезпечують герметичність і міцність вузла вологозахисту конденсатора.

4. Запропонована математична модель і виконаний розрахунок деформації перегородки під дією надлишкового тиску розігрітого повітря, на основі якої отримані такі розміри перегородки і її опори, які забезпечують її надійну роботу під дією надлишкового тиску розігрітого повітря всередині конденсатора.

5. Розроблена математична модель контактної взаємодії компаунда з оболонкою і контактним виводом на етапах полімеризації і термоударів, яким піддається апаратура, що дало можливість отримати різні технічні рішення по забезпеченню герметичності і міцності вузла герметизації конденсатора.

6. З розробленої математичної моделі були реалізовані наступні основні технічні рішення, які забезпечили герметичність вузла герметизації:

- секторна конструкція вузла герметизації;
- оптимальна форма герметизуючого компаунда;
- та ще 5 конструкторсько-технічних рішень, похідних від них.

7. З результатів розрахунків розроблено два варіанти пристосувань для формування фігурної форми компаунда у вузлах герметизації конденсаторів:

- за допомогою обичайки;
- за допомогою фігурної перегородки (діафрагми).

Достовірність і обґрунтованість основних результатів і досліджень забезпечується використанням обґрунтованих математичних моделей, класичних та добре апробованих методів розрахунку на міцність товстостінних і тонкостінних циліндрів та доброю узгодженістю з даними експериментальних досліджень цих об'єктів і практикою їх використання.

Практичне значення отриманих у роботі результатів розрахунково-експериментальних досліджень полягає в тому, що запропоновані конструктивно-технологічні рішення по організації вузлів герметизації забезпечують їх герметичність і міцність, що значно підвищує надійність і довговічність їх роботи та приладів і апаратів РЕА в яких вони застосовуються. Деякі результати дисертаційної роботи впровадженні на підприємстві “Лотос – Вест”.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних конференціях: IX Міжнародній науковій конференції “Наука і освіта”, січень 2016, м. Хайдусобосло, Угорщина; XI Міжнародній науковій конференції “Сучасні досягнення в науці і освіті”, жовтень 2016, м. Єрусалим, Ізраїль; X Міжнародна наукова конференція “Наука і освіта”, квітень 2017, м. Рим, Італія; XII міжнародна наукова конференція “Сучасні досягнення в науці і освіті”, вересень 2017, м. Нетанія, Ізраїль; VI Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”, вересень 2017, м. Вінниця, Україна; X Всеукраїнська науково-практична конференція “Освітньо-наукове забезпечення діяльності складових сектору безпеки і оборони України”, листопад 2017, м. Хмельницький, Україна; XIII

міжнародна наукова конференція “Сучасні досягнення в науці і освіті”, січень 2018, м. Хайдусобосло, Угорщина; XII Міжнародна наукова конференція “Наука і освіта”, червень 2018, м. Осло, Норвегія.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Дисертація викладена на 168 сторінках, робота проілюстрована 52 рисунками, містить 17 таблиць, список використаних джерел складає 101 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** приведено обґрунтування актуальності обраної теми дисертаційної роботи та розкрито сучасний стан досліджень в науковому напрямку у відповідності з постановкою задачі. Сформульовано мету роботи, задачі, які необхідно вирішити для її реалізації, та можливості практичного використання результатів досліджень. Обґрунтована наукова новизна результатів роботи та наведені відомості про їх апробацію.

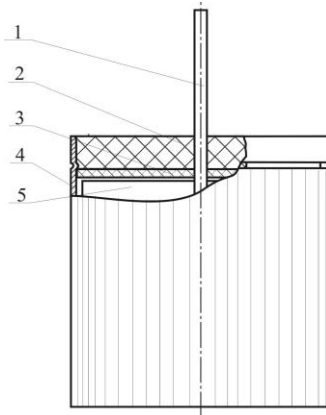
Перший розділ присвячений розкриттю сучасного стану досліджень герметичності виробів радіоелектронної апаратури. Аналіз відомих результатів досліджень показує, що на даний час роботи з їх проектування проводяться, як правило, виключно в радіотехнічному напрямку, без необхідного вивчення характеристик напружено-деформованого стану, в першу чергу деформування з урахуванням таких експлуатаційних чинників, як температура та тиск.

Значний внесок у розвиток дослідження міцності і герметичності радіоелектронної апаратури внесли Харпер Ч., Галушко А. І., Ройзман В. П., Хавкін М. І., Черняк К. І., Кан К. Н., Тернер С., Швед П. І., Єрліх К. М., Гуль В. Є. та інші. Але, на жаль, в них теж не висвітлена проблема розгерметизації емностей з прохідними виводами, до яких відносять плівкові конденсатори.

Варто також відмітити, що існуючі результати досліджень носять більше якісний, аніж кількісний характер оскільки вони проведені на лабораторних зразках або спрощених теоретичних моделях, що істотним чином обмежує сферу їх використання для реальних конструкцій. Крім того, реальні умови експлуатації герметизуючих матеріалів у всьому робочому діапазоні температур настільки складні, що вимагають проведення випробувань з визначення їх механічних характеристик з урахуванням експлуатаційних чинників.

У **другого розділу** надано основні відомості про плівкові конденсатори і їх конструкції, зокрема конденсатора К78. Цьому конденсатору було притаманно розтріскування компаунда та відслоювання його від циліндричного корпусу і виводу.

На рис. 1. схематично зображено плівковий конденсатор К78. Корпус являє з себе тонкостінну циліндричну оболонку, в якій розміщена секція конденсатора, негерметично закрита текстолітовою перегородкою, яка має отвір для контактного виводу.



- 1 – вивід; 2 – компаунд;
 3 – корпус; 4 – перегородка;
 5 – штампування в корпусі, так званий “зиг”.

Рисунок 1 - Конструкція плівкового конденсатору

Після того, як конденсатор зібраний, зі сторони його вільного торця проводиться заливка герметизуючим компаундом ЕК-23. Полімеризація цього компаунда проходить при температурі 100 °С. По такій же схемі організуються гермовузли смностей різноманітної форми, розмірів, назв. В ці смності вварюються горловини, в яких і організуються подібні гермовузли.

Корпус конденсатора виготовляється з алюмінієвого сплаву. Контактний вивід виготовлений з мідного дроту. Перегородка штампується з текстоліту.

Щоб зрозуміти причини розгерметизації розроблена математична модель, в якій тонкостінний алюмінієвий корпус (банка) приймається за циліндричну оболонку, навантажену по частині її довжини розподіленим контактним тиском і далі розглядається деформація цієї оболонки.

Аналіз конструкції конденсатора дозволяє припустити, що наявність текстолітової перегородки утворює додаткову кругову опору і тим самим як би укорочує довжину оболонки, що контактує з компаундом (приблизно в 8-10 разів), збільшуючи її жорсткість. Тому потрібно було перевірити, чи не призведе до значного збільшення деформацій оболонки в області контакту з компаундом заміна текстолітової перегородки на гумову, яка через свою велику податливість не може вважатися опорою, що перешкоджає переміщенню оболонки.

Для цього, був проведений розрахунок прогину оболонки з перегородкою та без перегородки.

Задачі, пов'язані з симетричними деформаціями круглих циліндричних оболонок постійної товщини, зводяться до інтегрування рівняння:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + \frac{E \cdot h}{R^2 \cdot D} \cdot y = \frac{f(z)}{D} \quad (1)$$

де $y(z)$ - радіальне переміщення (прогин) точок серединної поверхні оболонки; R - радіус серединної поверхні оболонки; E - модуль пружності матеріалу; D - циліндрична жорсткість; μ - коефіцієнт Пуассона матеріалу; $f(z)$ - розподілене навантаження, прикладене до серединної поверхні оболонки.

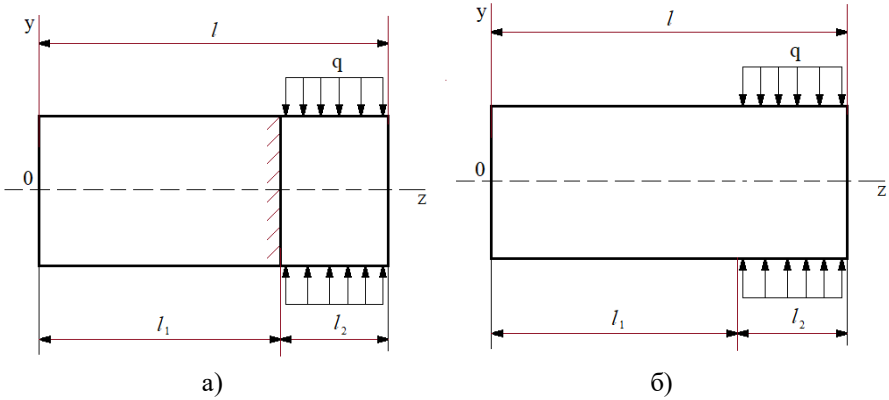


Рисунок 2 - Схема циліндричної оболонки постійної товщини під дією контактної тиску з перегородкою (а) та без перегородки (б)

Кінцеві формули для розрахунку прогину $y(z)$ оболонки з перегородкою (2) та без перегородки (3) мають вигляд:

$$y_1(z) = 4 \cdot \alpha \cdot \frac{\overline{k_1^2} + \overline{k_0} \cdot \overline{k_2}}{k_0^2 + 4 \cdot \overline{k_1} \cdot \overline{k_3}} \cdot k_2(\beta z) - 4 \cdot \alpha \cdot \frac{\overline{k_0} \cdot \overline{k_1} + 4 \cdot \overline{k_2} \cdot \overline{k_3}}{k_0^2 + 4 \cdot \overline{k_1} \cdot \overline{k_3}} \cdot k_3(\beta z) + \alpha \cdot [1 - k_0(\beta z)], \quad (2)$$

$$y_2(z) = 4\alpha \cdot \frac{\overline{k_1} \cdot \overline{k_1} \cdot (\beta(l-l_1)) - \overline{k_0} \cdot \overline{k_2} \cdot (\beta(l-l_1))}{k_0^2 + 4\overline{k_1}\overline{k_3}} \cdot k_2(\beta z) - 4\alpha \cdot \frac{\overline{k_0} \cdot \overline{k_1} \cdot (\beta(l-l_1)) + 4 \cdot \overline{k_3} \cdot \overline{k_2} \cdot (\beta(l-l_1))}{k_0^2 + 4\overline{k_1}\overline{k_3}} \cdot k_3(\beta z) + \alpha \cdot [1 - k_0(\beta(z-l_1))] \cdot \eta \cdot (z-l_1) - \alpha \cdot [1 - k_0(\beta(z-l))] \cdot \eta \cdot (z-l). \quad (3)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{q}{4D\beta^4}; \beta^4 = \frac{E \cdot h}{4 \cdot R^2 \cdot D}; k_i(\beta l) = \bar{k}_i, i = 0, 1, 2, 3.$$

Порівняння результатів розрахунків (рис. 3) показує, що відмінність в прогинах розглянутих оболонок суттєва лише на невеликому, (0,2 мм) проміжку поблизу перегородки, тобто у оболонки з перегородкою, відшарування компаунда може початися біля перегородки, і далі, при сприятливих умовах поширитися по всій довжині компаунда. Тому одна з рекомендацій, яка впливає з цього порівняння, полягає в необхідності забезпечення достатнього зазору між оболонкою конденсатора і текстолітовою перегородкою. Для запобігання протікання компаунда в цей зазор, останній може бути закритий, наприклад, шаром гумоподібного компаунда КЛТ-30. Для цієї ж мети замість текстолітової перегородки може застосовуватися гума, яка дозволяє вільно деформуватися оболонці при дії на неї зусиль з боку компаунда.

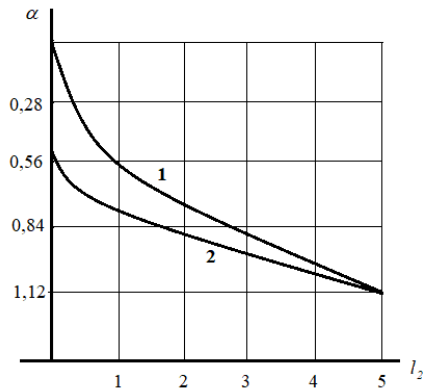


Рисунок 3 - Залежність відносного переміщення частини оболонок з перегородкою (1) та без перегородки (2), які знаходяться під дією контактного тиску, від їх довжини

У третьому розділі наведено результати дослідження впливу температури і залежного від цього надлишкового тиску розігрітого повітря на герметичність конденсаторів.

На герметичність вузла негативно впливає надлишковий тиск повітря, при температурі 100 °С, який знаходиться всередині конденсатора. При дослідженні впливу цього фактору потрібно вказати, що температура 100 °С відповідає не тільки одному з режимів полімеризації компаунда, а й крайньому значенню перепаду температур термоциклів. Тому, вплив надлишкового тиску повітря повинен бути вивчений як на етапі полімеризації, так і при випробуваннях.

Було проведено відповідні розрахунки надлишкового тиску повітря в осьовому і радіальному напрямках (рис. 4). Результати розрахунків показали, що дія надлишкового внутрішнього тиску повітря на етапі випробувань при температурі $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ як в осьовому, так і в радіальному напрямках не може бути причиною розгерметизації вузла вологозахисту плівкових конденсаторів, якщо закінчилось утворення адгезійних зв'язків між компаундом і стінками корпусу, а також між компаундом і виводом.

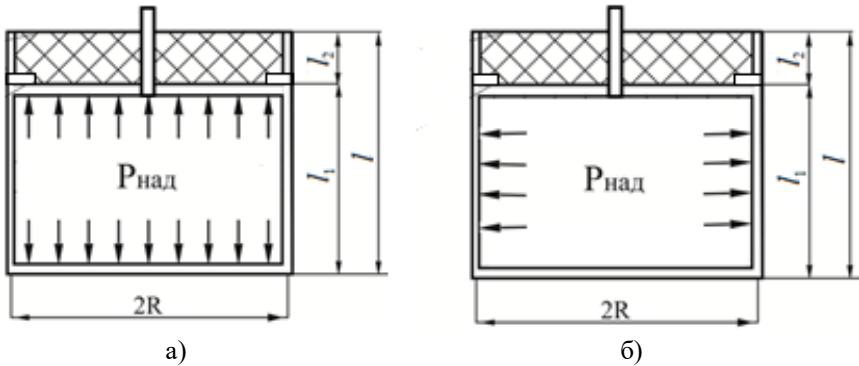


Рисунок 4 - Схема взаємодії елементів конденсатора – компаунда, виводу та корпусу в осьовому (а) та радіальному (б) напрямку

У зв'язку з тим, що мали місце виштовхування надлишковим тиском повітря компаунда разом з перегородкою (коли ще не була завершена полімеризація компаунда) наведено дослідження впливу розмірів розділювальної перегородки і "зига" (її опори) на цей дефект.

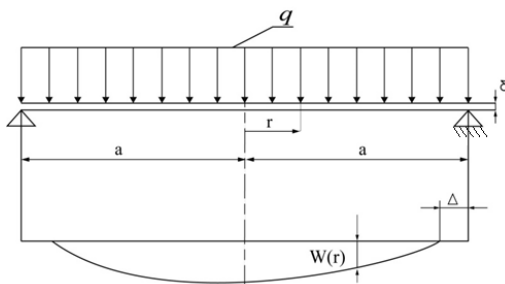


Рисунок 5 - Розрахункова схема текстолітової перегородки під дією надлишкового тиску розігрітого повітря

Візуальний огляд і обмірювання перегородки і компаунда підтвердили припущення, що такі виштовхування викликані надлишковим тиском розігрітого повітря, який знаходиться всередині корпусу конденсатора.

З цією метою проведено розрахунок прогину і радіального переміщення текстолітової перегородки від дії надлишкового тиску повітря при температурі $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому сили адгезії між корпусом і компаундом вважаються малими або відсутні. В якості математичної моделі прийняли розрахункову схему (рис. 5), вільно спертої по краю круглої пластинки, на яку діє рівномірно розподілений постійний тиск q .

Вивчення можливості забезпечення опору перегородки на "зиг" за рахунок збільшення радіусу перегородки " a " зводяться до вирішення наступного завдання - визначити таке значення радіусу " a ", при яких виконувалося б нерівність:

$$\Delta < a - R_3,$$

де R_3 - внутрішній радіус "зига"; Δ - величина радіального переміщення пластини; a - радіус перегородки пластини.

Розв'язання цього завдання було проведено для трьох типорозмірів конденсаторів при фіксованій товщині перегородки. Розрахунки проходилися для реальних перегородок, товщина яких становила $\delta = 0,05$ см.

Аналіз результатів розрахунків дозволяє зробити висновок про те, що при передбачених технічними умовами розмірах текстолітової перегородки корпусу і допусків на них в умовах дії на перегородку надлишкового тиску розігрітого повітря при температурі $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і відсутності зчепленого з корпусом компаунда, який перешкоджає прогину перегородки, вдасться забезпечити спірання перегородки на "зиг" лише в конструкціях конденсаторів першого типорозміру. У конструкціях конденсаторів другого і третього типорозмірів за рахунок допустимої зміни радіуса перегородки в даній конструкції вузла герметизації практично неможливо забезпечити виконання вказаної вимоги.

У **четвертому розділі** для ліквідації відшарування компаунда від стінки оболонки було запропоновано значно збільшити гнучкість оболонки, щоб вона легше слідувала за деформаціями компаунда, шляхом розрізання частини оболонки по висоті вузла герметизації по утворюючим на n -секторів, які тепер утворюють секторну конструкцію (рис. 6).

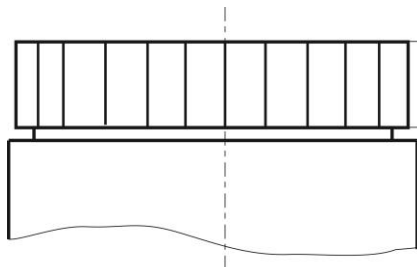


Рисунок 6 - Секторна конструкція гермовузла

Результати розрахунку прогину балки довжиною 5 мм, яка дорівнює відстані від вільного торця оболонки до перегородки, з поперечним перерізом одиничної ширини представлені в відносних одиницях у вигляді графіка на рис. 7.

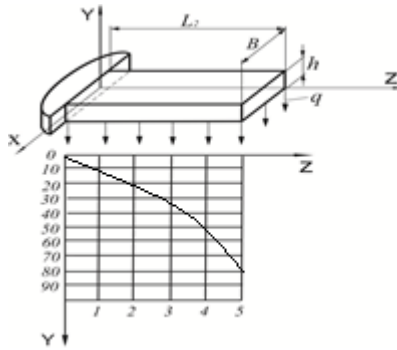


Рисунок 7 - Схема навантаження балки і залежність її прогину від довжини

Порівняння цього графіка з попередніми графіками показує багаторазове (майже в 80 разів) збільшення гнучкості оболонки секторної конструкції за її довжиною, що контактує з компаундом в порівнянні з нерозрізаною оболонкою. Очевидно, що гнучкість секторної конструкції можливо зробити дуже великою. Її (гнучкість) можна регулювати розрізанням оболонки на необхідну кількість секторів, задаючи тим самим жорсткість утворених таким чином балочок.

Таким чином, секторна конструкція вологозахисту має бути ефективнішою існуючої, і це було доведено експериментально.

Для того, щоб підрахувати конкретні цифрові значення прогину і напруження потрібно знати конкретні значення контактних тиску на границі компаунд-оболонка і компаунд-вивід. Тому далі надається вивід формули для контактних тисків. Для цього застосована теорія товстостінних циліндрів (Ляме-Гадоліна). Самі формули, по яким можна розрахувати контактні тиски та розподіл напружень в кожному елементі конструкції вивід-компаунд-оболонка, мають вигляд:

$$P_{1k} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T}{\frac{1 - 2\mu_1}{E_1} + \frac{R_1^2 \cdot (1 - 2\mu_2) + a_1^2 \cdot (1 + \mu_2)}{E_2 \cdot (a_1^2 - R_1^2)}}, \quad (4)$$

$$P_{2k} = \frac{(\alpha_2 - \alpha_3) \cdot \Delta T}{\frac{R_2^2 \cdot (1 - 2\mu_2) + a_2^2 \cdot (1 + \mu_2)}{E_2 \cdot (R_2^2 - a_2^2)} + \frac{R_2^2 \cdot (1 - 2\mu_3) + R_3^2 \cdot (1 + \mu_3)}{E_3 \cdot (R_3^2 - R_2^2)}}$$

$$\sigma_{1\max} = \sigma_{1r} \Big|_{r=R_1} = \frac{P_{1k} \cdot (R_1^2 + a_1^2)}{a_1^2 - R_1^2}, \quad \sigma_{2\max} = \sigma_{2t} \Big|_{R=a_2} = -\frac{2P_{2k} \cdot R_2^2}{R_2^2 - a_2^2},$$

$$\sigma_i = \sigma_{2t} \Big|_{R=R_2} = -\frac{P_{2k} \cdot (R_2^2 + a_2^2)}{R_2^2 - a_2^2},$$
(5)

де фізико-механічні характеристики E , μ , α - модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу виводу має індекс 1, компаунда - 2, матеріалу корпусу - 3, ΔT - перепад температур, R_1 - радіус виводу, R_2 - внутрішній радіус корпусної оболонки, R_3 - зовнішній радіус корпусної оболонки, σ_i - окружне напруження.

Також проведений розрахунок контактної тиску на границі "вивід-компаунд-оболонка" за схемою тришарового товстостінного циліндра. За отриманими формулами можна розрахувати розподіл напружень в кожному елементі конструкції "вивід-компаунд-оболонка".

$$\sigma_{r1} = P_{1k} \quad \sigma_{t1} = P_{1k},$$

$$\sigma_{r2} = \frac{P_{1k} R_2^2 + P_{2k} R_3^2}{R_3^2 - R_2^2} - \frac{(P_{1k} + P_{2k}) R_2^2 R_3^2}{R^2 \cdot (R_3^2 - R_2^2)},$$

$$\sigma_{t2} = \frac{P_{1k} R_2^2 + P_{2k} R_3^2}{R_3^2 - R_2^2} + \frac{(P_{1k} + P_{2k}) R_2^2 R_3^2}{R^2 \cdot (R_3^2 - R_2^2)},$$

$$\sigma_{r3} = \frac{P_{2k} R_3^2 + P_2 R_4^2}{R_4^2 - R_3^2} - \frac{(P_{2k} + P_2) R_4^2 R_3^2}{R^2 \cdot (R_4^2 - R_3^2)},$$

$$\sigma_{t3} = \frac{P_{2k} R_3^2 + P_2 R_4^2}{R_4^2 - R_3^2} + \frac{(P_{2k} + P_2) R_4^2 R_3^2}{R^2 \cdot (R_4^2 - R_3^2)},$$
(6)

де P_k - контактний тиск, σ_r - радіальне напруження, σ_t - окружне напруження; 1, 2, 3 – в з'єднаннях "вивід-компаунд", "компаунд-оболонка" та оболонка відповідно.

Розглядається ще одна ідея по забезпеченню герметичності і міцності компаунда шляхом утворення замість тришарової конструкції двох двошарових шляхом створення кільцевої канавки в шарі компаунду між оболонкою і виводом, яка дає можливість регулювати товщину компаунду в кожній з конструкцій.

Для визначення технічно прийнятних радіусів канавки розглядається практичне забезпечення виконання поставлених умов. З цією метою розраховані значення і побудовані графіки залежностей контактних тисків і максимального

напруження в системі "вивід-компаунд" від зовнішнього радіуса компаундного циліндра (a_1) по формулам (4,5), один з яких показаний на рис. 8.

Для визначення оптимальних розмірів внутрішнього і зовнішнього радіусів канавки приймаються наступні критерії оптимізації:

1. Забезпечення максимально можливого значення контактного тиску на межі "вивід-компаунд".
2. Забезпечення мінімально можливого значення контактного тиску на межі "компаунд-оболонка".
3. Для забезпечення міцності конструкції необхідне виконання умови міцності для компаунда в обох частинах аналізованої конструкції, тобто:

$$\sigma_{екв1} < [\sigma], \quad (7)$$

$$\sigma_{екв2} < [\sigma], \quad (8)$$

де $\sigma_{екв1}$, $\sigma_{екв2}$ - еквівалентні напруження, за прийнятою теорією міцності в компаунді відповідно, в з'єднаннях "вивід-компаунд" і "компаунд-оболонка"; $[\sigma]$ - допустимі напруження для компаунда, які при коефіцієнті запасу міцності $n = 3$ дорівнюють 15 МПа.

Крім того, для забезпечення міцності адгезійного зв'язку між компаундом і корпусом, необхідно виконати умову:

$$\sigma_{2 \max} /_{R=R_2} \leq \frac{\sigma_{адг}}{K}, \quad (9)$$

де $\sigma_{2 \max} /_{R=R_2}$ - максимальне напруження на поверхні контакту компаунда і корпусу; $\sigma_{адг}$ - адгезійне напруження між компаундом і корпусом, дорівнює 12,5 МПа; K - коефіцієнт запасу по адгезії.

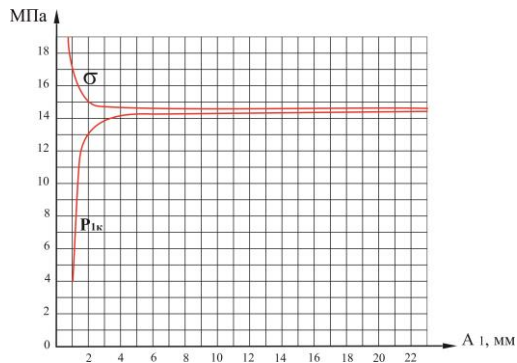


Рисунок 8 - Графіки залежності тиску і напруження від зовнішнього радіуса компаундного циліндра

З графіка видно, що при малих значеннях a_1 на порівняно невеликій ділянці (до 4 мм) відбувається інтенсивне зростання P_{1k} і спадання $\sigma_{1\max}$, а при зростанні a_1 до нескінченності обидві функції прямують до однієї і тієї ж межі.

$$\lim \sigma_{1\max} = \lim P_{1k} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T}{\frac{1 - 2\mu_1}{E_1} + \frac{1 + \mu_2}{E_2}} = 14,5 \text{ МПа}. \quad (10)$$

За результатами розрахунків, технічно задовільним можна вважати значення внутрішнього радіусу канавки, яка складає не менше 2,5 мм, що зручно з технологічної, економічної і інших точок зору, наприклад від 2,5 мм до 10 мм. При цьому контактний тиск і максимальні напруження приймають значення, при яких виконується умова міцності, а величина контактного тиску становить 95-99% від максимально можливого значення.

Мінімальне значення зовнішнього радіусу канавки для всіх типорозмірів і для всіх значень обраних 5 мм, щоб забезпечити мінімально можливу ширину канавки. Зазначені таким способом радіальні розміри канавки забезпечують надійність, герметичність і міцність конструкції вузла вологозахисту. Для реалізації в конструкції конденсатора зазначених вище пропозицій рекомендуються два варіанти пристроїв, які формують задану форму компаунда вузла вологозахисту.

На практиці, щоб уникнути концентраторів напружень у гострих кутах канавки, їх згладжують, отримуючи фігурну форму компаунда. Її можна створити шляхом заливки через обечайку (рис. 9) або шляхом застосування фігурної перегородки (рис. 10).

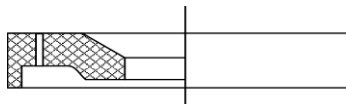


Рисунок 9 - Обечайка

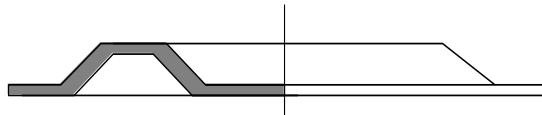


Рисунок 10 - Перегородка

Застосування одного із запропонованих варіантів підвищує показники міцності і герметичності. Вибір тієї чи іншої конструкції повинен ґрунтуватися на зручності і економічності в конкретних умовах.

Наведений розрахунок вузла герметизації з розділювальним кільцем (рис. 11). Відшарування і розтріскування компаунда відбувається внаслідок того, що

при заливці компаунда, корпус і вивід розширюються вільно, а в ході охолодження і при термоциклюванні вони вже не можуть звужуватися незалежно, і внаслідок відмінності в коефіцієнтах лінійного температурного розширення матеріалів корпусу і герметизуючого компаунду на границях матеріалів виникає контактний тиск, або натяг.

Тому наявність кільця з матеріалу, який не адгезує з компаундом, дозволить умовно розбити по висоті тришарову конструкцію на дві двошарові, в кожній з яких в процесі проектування можна в радіальному напрямку змінювати товщину компаунда за рахунок зміни товщини кільця. При цьому конструкції "вивід-компаунд" і "компаунд-корпус" можуть розглядатися як двошарові складені циліндри, навантажені контактним тиском (P_{k1} та P_{k2} , відповідно) на межі розділу компаунда і матеріалу кільця, де P_{k1} та P_{k2} задаються відомими нам формулами.

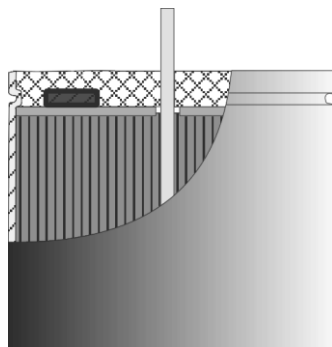


Рисунок 11 - Конструкція з розділювальним кільцем

Розділювальне кільце виконує наступні функції: при охолодженні гермовузла воно утримує частину компаунда біля корпусу, тому що КЛТР кільця менше КЛТР компаунда, зменшуючи енергію його відриву від корпусу, і дає можливість частині компаунда навколо виводу вільно, не «чіпляючись» за корпус, притискатися до виводу; при нагріванні гермовузла кільце утримує частину компаунда біля виводу, зменшуючи енергію його відриву від виводу, і дає можливість частині компаунда біля корпусу вільно, не "спираючись" в вивід, притискатися до корпусу.

Таким чином, використання розділювального регулюючого контактний тиск кільця в конструкції вузла захисту від вологи дозволяє підвищити герметичність корпусу плівкового конденсатора (або іншої ємності, що містить вузол герметизації схожої конструкції). Можна застосувати кільце з матеріалу, який має демпфуючі властивості.

Була запропонована альтернативна технологія полімеризації компаунда направлена на те, щоб адгезійні зв'язки між компаундом і оболонкою і виводом створювалися і в умовах наявності надлишкового тиску. Для цього пропонується

після заливання компаунда робити 6 годинну витримку при кімнатній температурі, після чого полімеризація закінчується при температурі 100 °С.

В п'ятому розділі викладені експериментальні дослідження, направлені на перевірку теоретичних положень, методів і засобів забезпечення герметичності гермовузлів. Для цього була доопрацьована тензометрична апаратура, яка тепер має можливість регулювати силу струму, що дає можливість не перегрівати тензорезистори. Також описано випробувальний стенд, на якому проводилась перевірка готових конденсаторів на герметичність і висотність, вимірювали деформацію оболонки від дії компаунда як вже заполімеризованого, при термоударах +100 °С...-60 °С, так і на етапі полімеризації. В цьому розділі наведені ще вісім можливих варіантів організації вузла вологозахисту та альтернативної технології заливання і полімеризації компаунда.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, яка присвячена розв'язанню актуальної науково – технічної задачі з розробки методів та засобів захисту тонкоплівкових алюмінієвих конденсаторів від розгерметизації, найбільш важливими результатами є:

1. З результатів проведеного аналізу існуючих публікацій, встановлено, що значна частина конструкцій радіоелектронних пристроїв представляють собою заполімеризований об'єм компаунда з багаточисленними включеннями у вигляді різнорідних елементів та плат з контактними виводами і можуть розглядатися як єдине тіло або гермомодуль, у яких на етапах виробництва, зберігання і експлуатації пристроїв при коливаннях температури внаслідок відмінності фізико-механічних характеристик усіх елементів, які утворюють систему, має місце взаємодія компаунда з його включеннями, тобто з електронними елементами та іншими складовими конструкції, і виникають механічні напруження. При їх наявності можуть руйнуватися найменш міцні ділянки конструкції. Однак немає достовірних математичних моделей деформування та герметизації як на етапі полімеризації, так і по її завершенні, а також в процесі експлуатації.

2. Розроблені математичні моделі існуючих конструкцій гермовузлів та отримані аналітичні вирази для переміщень оболонок з перегородкою та при її відсутності.

3. Розроблено математичні моделі дії надлишкового тиску повітря всередині конденсатора в осьовому і радіальному напрямку як на етапі полімеризації компаунда, так і після закінчення полімеризації.

4. Аналіз результатів проведених розрахунків дозволяє зробити висновок, що для передбачених технічними умовами на виготовлення конденсаторів розмірів текстолітової перегородки, "зигу" і допусків на них в умовах дії на перегородку надлишкового тиску розігрітого повітря, при температурі 100 °С до закінчення полімеризації компаунда, вдасться забезпечити

опирання прокладки на "зиг" лише в конструкціях конденсаторів першого типорозміру. У конструкціях конденсаторів другого і третього типорозмірів за рахунок допустимої зміни радіуса перегородки можливе невиконання вимоги герметичності.

5. Виконані розрахунки по впливу розмірів текстолітової перегородки на герметичність вузла вологозахисту та визначені оптимальні розміри перегородки і "зига", які забезпечують герметичність вузла вологозахисту.

6. Запропоновано секторну конструкцію вузла вологозахисту та розроблено її математичну модель.

7. Побудовано математичну модель та виконаний вивід формул для визначення контактного тиску за схемою двохшарового та трьохшарового циліндрів.

8. Для регулювання контактного тиску запропоновано замінити трьохшарову конструкцію на дві двохшарові шляхом утворення в прошарку компаунда до половини висоти заливки канавку і на прикладі розгляду трьох його типорозмірів проведено обчислювальні експерименти з визначення розмірів канавок, які забезпечують міцність і герметичність вузла вологозахисту. Згладжуванням гострих кромek канавки, отримана фігурна форма компаунда.

9. Запропоновано два варіанти пристосувань для формування фігурної форми компаунда на основі використання циліндричної обечайки і гнучкої фігурної форми перегородки. Встановлені переваги та недоліки таких варіантів.

10. Запропоновано використання в конструкції вузла вологозахисту розділювальне кільце і проведено обґрунтування його ефективності. Визначені розміри такого кільця, які забезпечують герметичність вузла вологозахисту конденсатора.

11. Розроблено і введено в практику тензометричний спосіб перевірки загерметизованих конструкцій на герметичність, висотність, і визначення часу закінчення полімеризації компаунда. Доопрацьована тензометрична апаратура з урахуванням специфіки неметалевих матеріалів, які застосовуються в РЕА та розмірів реальних виробів.

12. Застосовано методи схемної і послідовної температурної компенсації похибки тензометрування при термоударах.

13. Тензометруванням підтверджено результати розрахунків по збільшенню надійності герметизації і міцності вузла вологозахисту плівкових конденсаторів, які мають оптимальну фігурну форму компаунда в порівнянні з серійною, а також секторної конструкції, конструкції з розділювальним кільцем і ще 6 пропозицій по забезпеченню герметичності вузла вологозахисту.

14. В цілому все вище викладене призводить до суттєвого підвищення довговічності і надійності плівкових конденсаторів, а отже і приладів і апаратів радіоелектронної апаратури.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Возняк А.Г. Огляд проблеми міцності і герметичності компаундованих виробів радіоелектронної апаратури / В.П. Ройзман, А.Г. Возняк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. - №1. – С. 112-116. *(аналіз сучасного стану проблеми розгерметизації компаундних гермовузлів).*
2. Voznyak A. Solving problem of thermal conduction for providing strength of electronic units on thermal impacts / S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Voznyak // Heat and Mass Transfer in the system of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment. - MATEC, Volume 72, 01086, 2016. – P. 1-5. *(створена програма на основі математичного пакету Mathcad для розрахунку температурних полів в об'ємі гермомодуля).*
3. Возняк А.Г. Розробка конструкції вузла герметизації конденсатора з розділювальним кільцем / В.П. Ройзман, А.Г. Возняк // Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Сер. : Військові та технічні науки. – 2017. - №3. – С. 224-233. *(побудована математична модель роботи розділювального кільця).*
4. Возняк А.Г. Розрахунок контактного тиску в вузлах вологозахисту алюмінієвих конденсаторів / А.Г. Возняк, В.П. Ройзман // Молодий вчений, Технічні науки. – 2017. - №12. – С. 544-547. *(розрахунок контактного тиску для трьох циліндричного варіанту конструкції).*
5. Voznyak A. Contact pressure calculation in waterproof joints of aluminum capacitors / A. Voznyak, V. Royzman // Scientific Light (Wroclaw, Poland), VOL 1, No 19 (2018), ISSN 0548-7110. – P. 35-42. *(розрахунок контактного тиску в з'єднанні оболонка-компаунд-вивід).*
6. Voznyak A. Research of unsealing problem in cylindrical sealed volumes of various purposes by the example of thin-film capacitors / A. Voznyak, V. Royzman, A. Bubulis // Беларусский национальный технический университет; Серия Приборостроение, редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 309-311. *(розроблено математичну модель спільної роботи матеріалів в вузлі герметизації).*
7. Возняк А.Г. Проблема міцності і герметичності компаундованих виробів радіоелектронної апаратури / В.П. Ройзман, А.Г. Возняк // Наука и образование : Сб. тр. IX Междунар. науч. конференции, (3-10 января 2016 г., Хайдусобосло, Венгрия). – Хмельницкий : ХНУ, 2015. – С. 22-32.
8. Возняк А.Г. Дефекти компаундованих виробів радіоелектронної апаратури. Огляд літератури / В.П. Ройзман, А.Г. Возняк // Современные достижения в науке и образовании : Сб. тр. XI Междунар. науч. конф., (29 сент. – 6 окт. 2016 г., г. Иерусалим, Израиль). – Хмельницкий : ХНУ, 2016. – С. 84-90.
9. Возняк А.Г. Розробка конструкції вузла герметизації конденсатора з розділюваним кільцем / А.Г. Возняк // Наука и образование : сб. тр. X Междунар.

науч. конференции, (27 апр. – 4 мая 2017 г., Рим, Италия). – Хмельницький : ХНУ, 2017. – С. 18-24.

10. Возняк А.Г. Розрахунок прогину секторної конструкції вузла герметизації / А.Г. Возняк // Сучасні досягнення у науці та освіті : Зб. пр. XII Міжнародної наукової конференції, (17 – 24 вересня 2017 р., Нетанія, Ізраїль). – Хмельницький : ХНУ, 2017. – С. 100-103.

11. Возняк А.Г., Ройзман В.П. Забезпечення герметичності вузлів вологозахисту плівкових конденсаторів / А.Г. Возняк, В.П. Ройзман // Освітньо-наукове забезпечення діяльності складових сектору безпеки і оборони України : тези X Всеукраїнської науково-практичної конференції (Хмельницький, 2 листопада 2017 року). – Хмельницький, Вид-во НАДПСУ, 2017. – С. 546-548.

12. Возняк А.Г. Вплив температури і тиску на характеристики деформування та герметичності вузлів вологозахисту плівкових конденсаторів / В.П. Ройзман, А.Г. Возняк // Сучасні досягнення у науці і освіті, м. Хайдусобосло, Угорщина. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – С. 23-25.

13. Возняк А.Г. Технологія полімеризації компаунда при наявності надлишкового тиску повітря / А.Г. Возняк // XII Международная научная конференция “Наука и образование”. г. Осло, Норвегия – Хмельницький : ХНУ, 2018

АНОТЦІЯ

Возняк А. Г. Вплив температури і тиску на характеристики напружено-деформованого стану і герметичності вузлів вологозахисту плівкових конденсаторів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – Динаміка та міцність машин. Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, 2018.

У роботі представлено теоретичні і експериментальні дослідження по вирішенню проблеми забезпечення міцності і герметичності вузлів герметизації у вигляді циліндричних компаундованих горловин з прохідними виводами на прикладі плівкового конденсатора К-78. Розроблено математичну модель силової взаємодії заполімеризованого компаунда, яка має контакт з оболонкою і прохідним виводом при температурі від +100 °С до -60 °С. Розроблено математичну модель впливу надлишкового тиску повітря і витікаючі з неї технології полімеризації компаунда. Представлені практичні розрахунки елементів розроблених конструкцій на прикладі плівкових конденсаторів К-78 трьох типорозмірів. Розроблено і введено в практику тензометричний спосіб перевірки конструкцій на герметичність, висотність і визначення часу закінчення полімеризації компаунда.

Експериментальними дослідженнями підтверджено теоретично отримані результати.

Ключові слова: компаунд, гермовузол, напруження, полімеризація, герметичність, конденсатор, деформація, циліндрична оболонка.

АНОТОЦИЯ

Возняк А. Г. Влияние температуры и давления на характеристики напряженно-деформированного состояния и герметичности узлов влагозащиты пленочных конденсаторов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – Динамика и прочность машин. Хмельницкий национальный университет, г. Хмельницкий, 2018.

В работе представлены теоретические и экспериментальные исследования по решению проблемы обеспечения прочности и герметичности узлов герметизации в виде цилиндрических компаундованных горловин с проходными выводами на примере пленочного конденсатора К-78. Разработана математическая модель силового взаимодействия заполимеризованого компаунда, контактирующего с оболочкой и проходным выводом при температуре от +100 °С до – 60 °С. Разработана математическая модель влияния избыточного давления воздуха и вытекающие из нее технологии полимеризации компаунда. Представленные практические расчеты элементов разработанных конструкций на примере пленочных конденсаторов К-78 трех типоразмеров. Разработан и введен в практику тензометрический способ проверки конструкций на герметичность, высотность и определения времени окончания полимеризации компаунда.

Экспериментальными исследованиями подтверждено теоретически полученные результаты.

Ключевые слова: компаунд, гермоузол, напряжение, полимеризация, герметичность, конденсатор, деформация, цилиндрическая оболочка.

ABSTRACTS

Vozyak A. G. Influence of temperature and pressure on the characteristics of the stress-strain state and watertightness of the moisture trap of film capacitors. – Manuscript.

The dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences on the specialty 05.02.09 - Dynamics and strength of machines. Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, 2018.

The analysis of the design features of modern products of REA shows that solving the problems of providing protection against moisture and stability when changing the temperature and pressure of the environment has led to the use of new materials with insufficiently studied properties and the unification of such heterogeneous materials. Mechanical interaction arising in such structures can have a significant effect on both the occurrence of basic electrical processes and the performance of the product as a whole. However, at present, the design of REA is often carried out only in a purely radio engineering, without the necessary calculations of strength, without measuring the stresses and assessing the tense state of structures in general and their individual elements. At the same time, modern requirements and the

future of radioelectronics, as well as the scope of its use, put together in one row with exclusively radio-electronic tasks the problem of ensuring their mechanical strength and reliability.

In this paper an attempt is made to fill this gap to some extent. For this purpose, the K-78 (polystyrene film) condenser has been selected, which is widely used in various medical devices, in particular in defibrillators for the operation of the heart that has stopped during operation. This condenser was characterized by the depressurization of the moisture protection unit due to cracking the compound and detaching it from the cylindrical body and the output.

In order to understand the causes of depressurization, a mathematical model is developed in which a thin-walled aluminum body is taken for a cylindrical shell loaded in part of its length or along the entire length of the distributed contact pressure from the side of the compound, and then the deformation of this shell is considered. To eliminate the detachment of the compound from the shell wall, it was proposed to significantly increase the flexibility of the shell so that it more easily followed the deformations of the compound by cutting the part of the shell forming n -sectors that form the sector structure.

Another idea is considered to ensure the tightness and strength of the compound by replacing the three-layer construction of two two-layers with the creation of a ring groove in the layer of the compound between the shell and the output, which will enable the thickness of the compound to be adjusted in each of the constructions. The radial dimensions of the grooves are calculated, which ensure the reliability, tightness and durability of the design of the moisture protection unit. For their implementation, we recommend two variants of devices that form a given form of the compound.

In addition to the contact pressure acting on the interface of the contacting materials, the pressure of the knot is negatively affected by excessive air pressure at a temperature of 100 °C, which is inside the condenser. Calculations were carried out in the axial and radial directions, the results of which showed that this can not be the reason for the depressurization of the moisture protection unit, if the formation of adhesive joints between the compound and the walls of the body, as well as between the compound and the output, has ended. Finally, the experimental studies are aimed at checking the theoretical positions, methods and means of ensuring the tightness of the hermetic units.

The strain gauge method of checking sealing structures for tightness, height, and determining the time of completion of polymerization of the compound is developed and introduced into practice. The methods of circuit and consistent temperature compensation of strain measurement error at the thermal shock are developed. In total nine possible variants of the organization of the unit of moisture protection and alternative technology of pouring and polymerization of the compound were worked out.

The obtained results can be found not only in the capacitors, but in all capacities, which have similar units of moisture protection.

Keywords: compound, hermetic node, tension, polymerization, tightness, condenser, deformation, cylindrical shell.