

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Возняка Андрія Геннадійовича

**«Вплив температури і тиску на характеристики напружено-деформованого стану і герметичності вузлів вологозахисту плівкових конденсаторів»**,  
подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

*Актуальність теми дисертаційної роботи.* Аналіз конструктивних особливостей сучасних виробів радіоелектронної апаратури показує, що для вирішення завдань із забезпечення їх захисту від вологи і стійкості при зміні температури і тиску навколишнього середовища викликало необхідність використання в конструкціях нових матеріалів з недостатньо вивченими властивостями. Крім того, механічна взаємодія складових з різнорідних матеріалів може істотно вплинути як на протікання основних електричних процесів, так і процеси деформування і роботоздатність радіоелектронного виробу в цілому. Так, наприклад, конденсатори складають основу практично будь-якої радіоелектронної апаратури, а їх можливі дефекти обумовлюють до 60% її відмов в процесі експлуатації. Слід зазначити, що значна кількість таких відмов має місце внаслідок розгерметизації конденсаторів при зміні температури і тиску навколишнього середовища. За відомими з літературних джерел даних, найбільша інтенсивність відмов характерна для електролітичних та тонкоплівкових алюмінієвих конденсаторів. Тому актуальною науково-технічною задачею є розробка методів та засобів їх захисту від вологи. Проте, в даний час, роботи з проектування радіоелектронної апаратури більшою мірою проводяться лише у виключно радіотехнічному напрямку, без необхідного аналізу її напружено-деформованого стану та розрахунків на міцність. В цьому контексті слід відзначити наукову школу проф. В.П.Ройзмана з розробки методів та засобів підвищення надійності радіоелектронної апаратури за критеріями міцності.

Враховуючи викладене, актуальність теми представленої дисертаційної роботи, яка 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, не викликає сумніву.

*Зв'язок роботи з пріоритетними науковими програмами, планами, темами.* Тема представленої дисертаційної роботи у цілому відповідає затверджених на законодавчому рівні пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України. Дисертаційна робота підготовлена в Хмельницькому національному університеті, де існує і активно функціонує наукова школа з розробки методів та засобів надійності і довговічності за критеріями міцності об'єктів радіоелектронної апаратури. Наведені в роботі результати розрахунково-

експериментальних досліджень отримані в рамках держбюджетних тем, перелік яких приводиться та які пройшли відповідну державну реєстрацію.

**Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій роботи** полягає в тому, що основні результати розрахунково-експериментальних досліджень отримані з використанням обґрунтованих математичних моделей, побудованих на основі закономірностей функціонування радіоелектронної апаратури та апробованих підходів до її моделювання, класичних та добре апробованих методів визначення характеристик напружено-деформованого стану і розрахунку на міцність товстостінних і тонкостінних циліндрів та доброю узгодженістю результатів розрахунків з даними експериментальних досліджень обраних об'єктів вивчення і практикою їх використання.

**Наукова новизна результатів роботи** полягає в тому, що за результатами комплексних розрахунково-експериментальних досліджень, отриманих з використанням розроблених математичних моделей деформування корпусу конденсатора та герметизації корпусу плівкового конденсатора і його елементів як на етапі полімеризації компаунда, так і її завершення, а також в процесі експлуатації, і контактної взаємодії компаунда з оболонкою і контактним виводом, встановлені закономірності впливу температури і тиску на характеристики деформування та герметичності вузлів вологозахисту плівкових конденсаторів та розроблені теоретично-експериментальні методи виявлення причин порушення їх функціональної робото здатності, на основі яких запропоновані альтернативна технологія полімеризації компаунда, яка забезпечує герметичність і міцність вузла вологозахисту, та нові технічні рішення, зокрема за рахунок застосування в конструкції розділювального кільця, із забезпечення його герметичності при дії надлишкового тиску розігрітого повітря всередині конденсатора.

**Практичне значення** отриманих у роботі результатів розрахунково-експериментальних досліджень полягає в тому, що запропоновані конструктивно-технологічні рішення з організації вузлів герметизації забезпечують їх герметичність і, таким чином, значно підвищує надійність і довговічність їх роботи та приладів і апаратів радіоелектронної апаратури, в яких вони застосовуються. Деякі результати дисертаційної роботи знайшли безпосереднє використання і впровадження на профільних підприємствах України при розробці заходів щодо підвищення функціональної робото здатності радіоелектронних приладів, що підтверджуються відповідними довідками.

**Оцінка структури, обсягу та змісту роботи.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Дисертація викладена на 168 сторінках, включаючи 52 рисунки та 17 таблиць, Список використаних літературних джерел складає 101 найменування.

**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, наведені відомості про їх апробацію та подано список публікацій автора роботи.

**Перший розділ** присвячено 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. 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 вимагає проведення випробувань з визначення їх механічних характеристик з урахуванням експлуатаційних чинників. За результатами вищезгаданого аналізу

**У другому розділі** наведено основні відомості про плівкові конденсатори і їх конструкції, зокрема конденсатора К78, якому, як показує досвід експлуатації, були притаманні розтріскування компаунда та його відшарування від циліндричного корпусу і виводу. Представлено опис розробленої математичної моделі такого конденсатора, в якій його тонкостінний алюмінієвий корпус (банка) приймається за циліндричну оболонку, навантажену по частині її довжини (або по всій довжині) розподіленим контактним тиском і далі розглядається деформація цієї оболонки.

Аналіз конструкції конденсатора дозволив автору припустити, що наявність текстолітової перегородки утворює додаткову кругову опору, внаслідок чого зменшується довжина оболонки, що контактує з компаундом (приблизно в 8-10 разів), і зростає її жорсткість. Тому було проведено розрахунок прогину оболонки як з перегородкою, так і без неї. Порівняння результатів розрахунків показало, що відмінність в прогинах таких варіантів оболонки суттєва лише на невеликому 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 випливає 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. Крім того, замість текстолітової перегородки може застосовуватися гума, яка дозволяє вільно деформуватися оболонці при дії на неї зусиль з боку компаунда.

**У третьому розділі** представлені результати дослідження впливу надлишкового тиску розігрітого повітря, який знаходиться всередині конденсатора, на його герметичність. Відзначається, що найбільш негативний вплив має місце при температурі 100 °С, яка відповідає не тільки одному з режимів поліме-

ризації компаунда, а й крайньому значенню перепаду температур термоциклів. Було проведено відповідні розрахунки з визначення впливу надлишкового тиску повітря в осьовому і радіальному напрямках, результати яких показали, що його дія при зазначеній температурі у вказаних 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.

Оскільки мали місце виштовхування надлишковим тиском повітря компаунда разом з перегородкою (коли ще не була завершена полімеризація компаунда), були проведені дослідження впливу розмірів розділювальної перегородки і її зигової опори на цей дефект. Аналіз результатів виконаних розрахункових досліджень конденсаторів трьох типорозмірів дозволив 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 °С і відсутності зв'язку компаунда з корпусом, який перешкоджає прогину перегородки, вдасться забезпечити спірання перегородки на зигову опору лише в конструкціях конденсаторів першого типорозміру. Однак у конструкціях конденсаторів другого і третього типорозмірів за рахунок допустимої зміни радіуса перегородки неможливо забезпечити виконання вказаної вимоги.

Результатам досліджень із запобігання відшарування компаунда від стінки корпусу конденсатора присвячено *четвертий розділ* роботи. Для вирішення цієї задачі було запропоновано ряд технічних рішень та проведено обґрунтування їх використання за критеріями міцності.

Щоб значно підвищити гнучкість оболонки корпусу з метою більшої узгодженості її переміщень деформаціям компаунда проводиться розрізання частини оболонки по висоті вузла герметизації по утворюючим на  $n$  секторів, внаслідок чого створюється так звана секторна конструкція. Порівняння результатів розрахунків показало багаторазове зростання гнучкості оболонки такої конструкції по довжині, що контактує з компаундом, в порівнянні з суцільною оболонкою. Крім того, приведена методика розрахункового визначення контактного тиску на границі системи «вивід-компаунд-оболонка» за схемою тришарового товстостінного циліндра, яка дозволяє встановити розподіл напружень в кожній її складовій.

Розглянуті можливість забезпечення 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 його товщину, а також оптимізації форми компаунда. Для більш надійного забезпечення герметизації обґрунтовано вставлення в канавку розділювального кільця, яке регулює контактний тиск, з матеріалу, який не адгезує з компаундом. Його основними функціями є такі. При охолодженні гермовузла воно утримує частину компаунда біля корпусу, оскільки коефіцієнт лінійного температурного розширення кільця менший такого для компаунда, внаслідок чого зменшується енергія його відриву від корпусу та виникає можливість частині компаунда навколо виводу вільно, не «чіпляючись»

за корпус, притискатися до виводу. У разі нагрівання гермовузла кільце утримує частину компаунда біля виводу, зменшуючи енергію відриву від нього, і, як наслідок, дає можливість частині компаунда біля корпусу вільно, не «спираючись» у вивід, притискатися до корпусу. В результаті виконаних розрахункових досліджень встановлено, що використання розділювального регулюючого контактний тиск кільця в конструкції вузла захисту від вологи дозволяє підвищити герметичність корпусу плівкового конденсатора, як і іншої ємності, що містить вузол герметизації схожої конструкції.

**В н'ятому розділі** викладені дані експериментальних досліджень з перевірки та підтвердження запропонованих в роботі теоретичних положень, методик і технічних рішень із забезпечення герметичності гермовузлів. Описано випробувальний стенд, з використанням якого проводилась перевірка конденсаторів на герметичність, а також вимірювання деформацій їх оболонки від дії компаунда як вже заполімерізованого, при термоударах  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ...  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , так і на етапі полімеризації. Саме завдяки результатам проведеним експериментам стало можливим запропонувати ряд можливих варіантів організації вузла вологозахисту та альтернативну технологію заливання і полімеризації компаунда.

**Публікації та оприлюднення результатів.** За матеріалами дисертації здобувачем опубліковані 6 статей у спеціалізованих фахових виданнях, затверджених МОН України, та виданнях інших держав, в тому числі включених до міжнародних наукометричних баз.

Матеріали роботи були апробовані на представницьких міжнародних науково-технічних конференціях та семінарах. За результатами доповідей опубліковано 7 праць у збірниках тез доповідей цих наукових форумів.

В опублікованих працях в достатній мірі висвітлені наукові положення, основні висновки і рекомендації дисертаційної роботи.

### **Основні зауваження по роботі.**

1. Ресурс вузлів герметизації в значній мірі залежить від фізико-механічних характеристик компаунда. Однак з тексту дисертаційної роботи не зрозуміло, чи проводились автором дослідження з визначення впливу розкиду значень таких характеристик на роботоздатність об'єктів вивчення

2. Плівкові конденсатори можуть експлуатуватися в умовах дії широкого спектру не тільки статичних, а й динамічних навантажень. З цієї точки зору важливе значення мають дисипативні властивості матеріалів. Автор, ло речі, згадує в роботі про застосування кільця як елемента демпфірування коливань. Але результати таких досліджень не знайшли відображення в роботі..

3. Одним із технічних рішень із забезпечення герметичності гермовузла є створення кільцевої канавки в шарі компаунду між оболонкою і виводом, яка дає можливість регулювати його товщину. Бажано було б навести дані про можливі розміри такої канавки, оскільки не зрозуміло, чи витримає компаунд, якщо зробити таку канавку на половині його товщини. Іншими словами, чи витримає навантаження та частина компаунду, яка залишилась не розрізаною.

4. Автором запропоновано ряд технічних рішень з підвищення надійності та довговічності вузлів вологозахисту плівкових конденсаторів. Однак, нічого не сказано про їх захищеність патентами.

5. На жаль, в тексті роботи не вдалося уникнути граматичних помилок, неоднозначності у використанні окремих термінів та інших редакційних неузгодженостей. Так, наприклад, в авторефераті йде мова про розгляд плівкових конденсаторів трьох типорозмірів, але відсутні їх характеристики. Бажано було б більш узагальнено сформулювати наукову новизну роботи та основні висновки.

### Загальний висновок

Результати проведеного аналізу дисертаційної роботи Возняка Андрія Геннадійовича «Вплив температури і тиску на характеристики напружено-деформованого стану і герметичності вузлів вологозахисту плівкових конденсаторів» дозволяють зробити однозначний висновок, що вона є завершеним науковим дослідженням з розробки методів та засобів забезпечення надійності та довговічності виробів радіоелектронної апаратури і за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Сформульовані зауваження не знижують загальної позитивної оцінки роботи, їх слід розглядати як побажання здобувачу наукового ступеню для подальшої плідної науково-дослідної роботи і вказують на необхідність більш уважного ставлення до оформлення результатів.

Автореферат достатньо відповідає змісту дисертаційної роботи, оформлення дисертації і автореферату в цілому відповідає нормативним вимогам.

Робота задовольняє вимогам п. 9, 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», щодо кандидатських дисертацій, а її автор, А.Г.Возняк, безумовно заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент

Заст. директора Інституту проблем  
міцності імені Г.С.Писаренка

НАН України з наукової роботи,  
завідувач відділу коливань та вібраційної надійності

доктор технічних наук, професор



А.П. Зінковський