

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ НАДЛИШКОВОГО ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ ПОВІТРЯ НА ГЕРМЕТИЧНІСТЬ БАНКОВИХ КОНДЕНСАТОРІВ

Досліджено вплив надлишкового внутрішнього тиску розігрітого повітря на герметичність плівкових конденсаторів. Створені математичні моделі, що дозволяють розрахувати ступінь впливу надлишкового повітря як в осьовому, так і у радіальному напрямках.

In the presented paper the results of researches influence of hot air inner pressure to the humidity – protective units of film capacitors are given. We created the mathematical pattern, which calculate degree of influence of inner pressure of hot air in radial and axis directions.

Складні вироби електронної техніки складаються з великої кількості типових вузлів – мікросхем, модулів, тригерів та ін., що у свою чергу складаються з радіоелементів: конденсаторів і резисторів, різноманітних конструкцій і типорозмірів. Кількість цих пасивних елементів, що випускаються і споживаються щорічно у різних країнах, обчислюється десятками мільярдів штук. Вони складають основу будь-якої радіоелектронної схеми, вузла, модуля, пристрою. Вони недорогі при виготовленні, але у складних умовах експлуатації недостатньо надійні. Ціна їхніх відмов може бути дуже високою. Відомий випадок, коли вихід із ладу конденсатора вартістю у 3 долара призвів до руйнації ракетної системи вартістю у 120 мільйонів доларів. Можна навести приклади, коли через відмову електронної техніки з причин руйнації недорогого пасивного елемента в умовах експлуатації траплялися катастрофи або аварії літаків, кораблів, атомних електростанцій та інших об'єктів. При цьому втрати склали мільйони доларів, не кажучи вже про людські жертви. Механічні впливи викликають 30-50%, а в авіації і космонавтиці – 80% усіх її відмов. Основну роль при цьому відіграють конденсатори різноманітних типів, питома вага яких відносно інших деталей РЕС найбільш значна і складає від 11,5% у системах автоматичного керування і зв'язку до 61% у приймально-передавальних пристроях [1,2]. Через дефекти конденсаторів, за даними Інституту критичних технологій, відбуваються 61,3% відмов РЕС. Найпоширеніший дефект плівкових (К78-3) і електролітичних (К50-16) конденсаторів – розгерметизація їхніх вузлів вологозахисту через відшарування компаунду від

корпусу і виводу, розтріскування компаунда і його виштовхування з корпусу.

Досліджуючи роботу вузла захисту від вологи цих конденсаторів [3,4], було висунуте припущення, що на герметичність вузла при нагріванні може негативно впливати надлишковий тиск розігрітого повітря, яке знаходиться у середині конденсатора. Цей самий фактор може мати суттєвий вплив при роботі вузлів за умови пониженого тиску навколишнього середовища або у вакуумі.

При дослідженні впливу цього фактора потрібно зазначити, що температура +100°C 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, коли полімеризація вже закінчилась.

Було проведено дослідження впливу надлишкового внутрішнього тиску повітря на герметичність конденсаторів на етапі випробувань (термоциклованні), коли процеси полімеризації компаунда й утворення адгезійних зв'язків між компаундом, виводом і корпусом уже закінчені. При цьому розглядалась дія надлишкового тиску повітря при температурі +100°C в осьовому (на компаундний циліндр) і радіальному (на стінки корпусу конденсатора) напрямках.

1. Вивчення впливу на герметичність надлишкового внутрішнього тиску повітря конденсаторів в осьовому напрямку на етапі випробувань.

Розглянемо можливість розгерметизації вузла вологозахисту плівкового конденсатора на етапі випробувань від дії надлишкового тиску повітря в осьовому напрямку при температурі +100°C.

Будемо вважати, що вказаний тиск повністю передається на компаундний циліндр, нехтуючи тим фактом, що перегородка може запобігати такій дії повітря. Можлива при цьому похибка піде у запас міцності. Оскільки на аналізованому етапі процес утворення адгезійних зв'язків між матеріалом компаунда, виводу і корпусу вже закінчений, то чинити опір виштовхуванню компаундного циліндра з корпусу, яке може відбутися від дії розігрітого надлишкового тиску в осьовому напрямку, будуть сили адгезії між компаундом і виводом K_1 і компаундом і корпусом K_2 .

Вирази для цих сил мають вигляд:

$$K_1 = \pi \cdot d_1 \cdot l_2 \cdot \tau_{1\text{адг}}^{\text{зс}}, \quad (1)$$

$$K_2 = \pi \cdot d_2 \cdot l_2 \cdot \tau_{2\text{адг}}^{\text{зс}}, \quad (2)$$

де $l_2=0,5$ см – висота поверхні контакту компаунда із виводом і корпусом, $d_1=0,1$ см – діаметр виводу, $d_2=5,4$ см – діаметр внутрішньої поверхні корпусу, $\tau_{1\text{адг}}^{\text{зс}}=150$ кГ/см² – зсувне граничне напруження, яке руйнує адгезійні сили між матеріалами виводу і компаунда, $\tau_{2\text{адг}}^{\text{зс}}=125$ кГ/см² – зсувне граничне напруження, яке руйнує адгезійні сили між матеріалами корпусу і компаунда.

Отже, умова, за якої сили адгезії перешкоджають дії надлишкового внутрішнього тиску повітря при температурі $+100^\circ\text{C}$, може бути записана у вигляді

$$K < K_1 + K_2, \quad (3)$$

де $K = 0,25\pi(d_2^2 - d_1^2)P_{\text{над}}$ – сила надлишкового тиску повітря, $P_{\text{над}}$ – надлишковий тиск повітря при температурі 100°C .

$$P_{\text{над}} = P_2 - P_1 = \frac{t_2}{t_1} P_1 - P_1 = \frac{273+100}{273+18} \cdot 1 - 1 = 0,23 \text{ кГ/см}^2,$$

де P_1, P_2 – тиск повітря при нормальній температурі навколишнього середовища t_1 і при температурі полімеризації компаунду t_2 за Кельвіном.

Підставляючи відповідні значення параметрів у формули, отримуємо:

$$K = 3,14 \cdot (5,4^2 - 0,1^2) / 4 \cdot 0,237 = 6,25 \text{ кГ},$$

$$K_1 = \pi \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 150 = 23,56 \text{ кГ},$$

$$K_2 = \pi \cdot 5,4 \cdot 0,5 \cdot 125 = 1060 \text{ кГ}.$$

Тобто дійсно умова (3) виконується з великим запасом і дія надлишкового тиску повітря в осьовому напрямку при температурі 100°C на етапі

випробувань на може стати причиною розгерметизації вузла вологозахисту.

2. Вивчення впливу на герметичність надлишкового внутрішнього тиску повітря конденсаторів у радіальному напрямку на етапі випробувань.

2.1. Вибір розрахункової схеми і обґрунтування методики розрахунків.

Для визначення можливості відриву стінки конденсатора від компаунда був проведений розрахунок конденсатора як циліндричної оболонки під дією надлишкового внутрішнього тиску $P_{\text{над}}$. Нехай R – серединний радіус оболонки, h – товщина стінки, решта розмірів вказані на рис.1.

Спочатку розглянемо деформацію частини корпусу, що знаходиться під перегородкою. Для цього умовно виріжмо з циліндричної оболонки балку – смужку, проводячи через геометричну вісь циліндра дві площини, що утворюють кут $d\theta$, як показано на рис.2.

Нехай T_1 – осьове зусилля, зумовлене присутністю дна в оболонці, T_2 – окружне зусилля. Оскільки $dS=Rd\theta$, то прийнявши $dS=1$, отримаємо $d\theta=1/R$. Тоді рівнодіюча зусиль T_2 чисельно дорівнює $T_2 \cdot d\theta = T_2 / R$.

Сумарна інтенсивність навантаження на балку:

$$P_1 = P_{\text{над}} - T_2 / R. \quad (4)$$

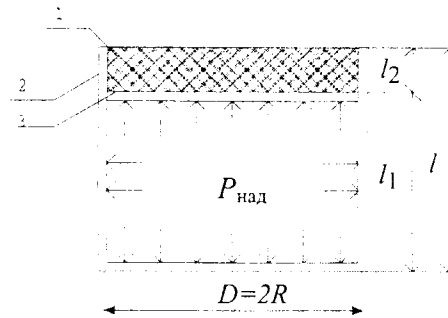


Рис.1. Схема для розрахунку на міцність від дії надлишкового тиску: 1 - компаунд, 2 - оболонка, 3 - перегородка.

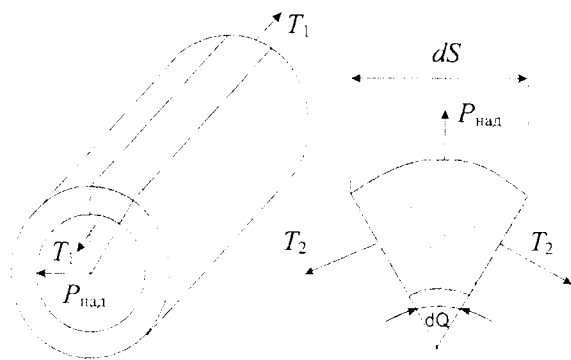


Рис.2. Елемент циліндра.

Зобразимо розрахункову схему балки-смужки під дією навантажень P_1 і T_1 (рис.3).

З умови прогину балки-смужки отримаємо диференціальне рівняння прогину:

$$D \cdot \frac{d^4 W}{dx^4} + T_1 \cdot \frac{d^2 W}{dx^2} = P_1, \quad (5)$$

де вісь Ox співпадає з геометричною віссю корпусу і має початок у центрі нижнього перерізу компаундного циліндра, W – деформація середньої поверхні оболонки.

Із врахуванням (4):

$$D \frac{d^4 W}{dx^4} + T_1 \frac{d^2 W}{dx^2} = P_{\text{над}} - \frac{T_1}{R}. \quad (6)$$

При цьому $T_1 = \sigma_1 h$, $T_2 = \sigma_2 h$, де σ_1 , σ_2 – нормальні напруження у поперечному і меридіональному перерізах оболонки на рівні середньої поверхні.

Лінійна відносна деформація середньої поверхні оболонки по напрямку дотичної до кола її поперечного перерізу дорівнює:

$$\epsilon_2^0 = \frac{2\pi(R+W) - 2\pi R}{2\pi R} = \frac{W}{R}. \quad (7)$$

Скориставшись законом Гука, отримаємо:

$$\epsilon_2^0 = \frac{1}{Eh} (T_2 - \mu T_1). \quad (8)$$

Підставляючи (7) і (8), одержимо:

$$\frac{W}{R} = \frac{1}{Eh} (T_2 - \mu T_1).$$

Звідси:

$$T_2 = \frac{W}{R} Eh + \mu T_1.$$

Підставляючи цей вираз у рівняння (6), дістаємо:

$$D \frac{d^4 W}{dx^4} + T_1 \frac{d^2 W}{dx^2} = P_{\text{над}} - \frac{W}{R^2} Eh - \mu \frac{T_1}{R}.$$

Останнє рівняння можна переписати так:

$$D \frac{d^4 W}{dx^4} + T_1 \frac{d^2 W}{dx^2} + \frac{W}{R^2} Eh + \mu \frac{T_1}{R} = P_{\text{над}}, \quad (9)$$

$$\text{де } T_1 = \frac{\pi R^2 P_{\text{над}}}{2\pi R} = \frac{R P_{\text{над}}}{2}.$$

Тоді:

$$D \frac{d^4 W}{dx^4} + \frac{PR}{2} \frac{d^2 W}{dx^2} + \frac{W}{R^2} Eh = P_{\text{над}} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) \quad (10)$$

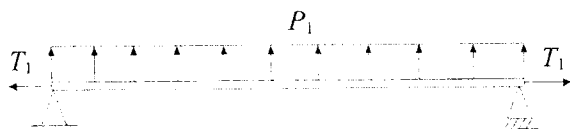


Рис.3. Розрахункова схема балки-смужки.

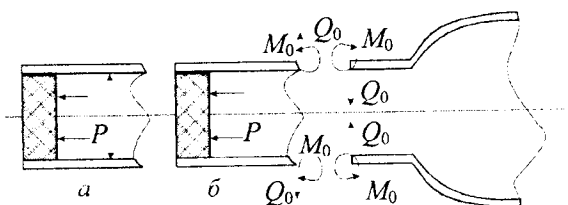


Рис.4. Схема зусиль, що діють на стик корпусу і компаунда.

Вплив осевого зусилля, що враховується другим членом у (10), відносно невеликий. Відкинувши його, ми значно спростимо розрахунки.

Перепишемо рівняння у вигляді:

$$D \frac{d^4 W}{dx^4} + \frac{W}{R^2} Eh = P_{\text{над}} (1 - \mu/2),$$

де D – циліндрична жорсткість оболонки:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu)}. \quad (11)$$

Оскільки для типорозмірів оболонок, що розглядаються, $\beta l > 3$, де

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E \cdot h}{4R^2 D}} = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{Rh}}, \quad (12)$$

то ці оболонки можна вважати довгими. Тому при розрахунках будемо враховувати умови закріплення тільки з одного кінця.

Тепер розрахуємо зусилля, діючі на стик корпусу з компаундом (рис.4).

Розв'язок рівняння (6) подамо у вигляді:

$$W(x) = \frac{P_{\text{над}} R^2}{Eh} + e^{-\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x)$$

Оскільки при $x=0$, $W=0$, $W'=0$, то

$$C_1 = C_2 = -\frac{P_{\text{над}} R^2}{Eh}.$$

Отже:

$$W(x) = \frac{P_{\text{над}} R^2}{Eh} [1 - e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)], \quad (13)$$

$$W''(x) = 2\beta^2 e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) \frac{P_{\text{над}} R^2}{Eh}. \quad (14)$$

Нехай $M(x)$ згинаючий момент у перерізі з координатою x . Тоді:

$$M(x) = 2\beta^2 \frac{P_{\text{над}} R^2}{Eh} e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) D. \quad (15)$$

Оскільки

$$M(0) = 2\beta \frac{P_{\text{над}} R^2}{Eh} D, \quad (16)$$

то вираз згинаючого моменту буде:

$$M(x) = \frac{P_{\text{над}}}{2 \cdot \beta^2} e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x). \quad (17)$$

Перерізуюча сила $Q(x) = \frac{dM(x)}{dx}$, тобто

$$\begin{aligned} Q(x) &= \frac{P_{\text{над}}}{2\beta^2} (-2\beta \cos \beta x) e^{-\beta x} = \\ &= -\frac{P_{\text{над}}}{\beta} e^{-\beta x} \cos \beta x. \end{aligned} \quad (18)$$

Звідси

$$Q(0) = -P_{\text{над}} / \beta. \quad (19)$$

Тепер розглянемо кільце, по якому корпус контактує з компаундом.

Як розрахункову схему розглядаємо циліндричне кільце довжиною l_2 , умовно вирізане з корпусу (рис.5). Кільце знаходиться під дією радіальних зусиль інтенсивністю Q_0 і згинаючого моменту інтенсивністю M_0 . Під дією цих зусиль у кільці буде відбуватися радіальне переміщення W і поворот на кут ϕ навколо центра ваги осьового перерізу стінки корпусу.

З рис.5 видно, що

$$W = W_0 + y \operatorname{tg} \phi \approx W_0 + y\phi, \quad (20)$$

де y – відстань від центра повороту до перерізу кільця, що розглядається, взяте зі знаком "+", якщо переріз знаходиться нижче від перерізу, проведеного через центр повороту і зі знаком "-" – якщо вище.

Відносний розтяг в окружному напрямку дорівнює:

$$\epsilon = \frac{W}{R} = \frac{W_0}{R} + y \frac{\phi}{R}. \quad (21)$$

Розглянемо деформацію кільця (рис.6,7), що знаходиться під дією тільки Q_0 і M_0 .

Із $\sum P_y = 0$ отримуємо, що внутрішня сила

$$N_Q = Q_0 R. \quad (22)$$

Проведемо вісь Ox_1 через кінці півкільця. З умови рівноваги $\sum M_{x_1} = 0$ отримуємо:

$$\begin{aligned} 2M_{x_1} - \int_0^\pi M_0 dS \sin \phi d\phi &= 0, \\ 2M_{x_1} - M_0 R \int_0^\pi \sin \phi d\phi &= 0, \\ 2M_{x_1} &= 2M_0 R, \\ M_{x_1} &= M_0 R, \end{aligned} \quad (23)$$

де M_{x_1} – згинаючий момент, діючий у поперечному перерізі кільця.

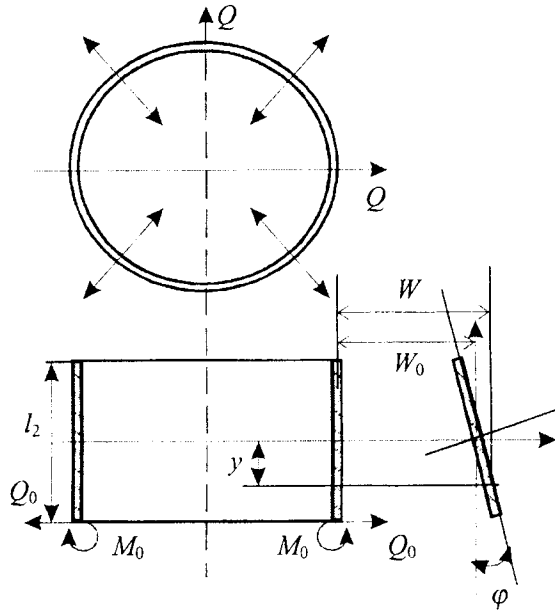


Рис.5. Схема деформації кільця.

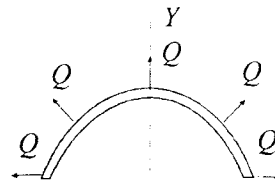


Рис.6. Схема деформації кільця.

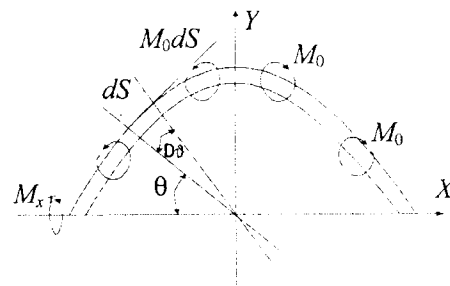


Рис.7. Схема деформації кільця.

Відносний розтяг в окружному напрямку від навантаження по зовнішньому контакту:

$$\epsilon = \frac{N_Q}{EF} + \frac{M_x}{EI_x} y, \quad (24)$$

де F – площа поперечного перерізу кільця, I – осьовий момент інерції кільця.

Відповідна деформація від контактних зусиль дорівнює:

$$\epsilon = \frac{N_Q}{EF} = \frac{q_k R}{EF}. \quad (25)$$

Грунтуючись на умові сумісності деформацій, запишемо $\epsilon = \epsilon_k$.

Приврівнюючи праві частини (24) і (25) і враховуючи, що $N_Q = Q_0 R$, $M_x = M_0 R$, отримаємо

$$q_k = \frac{P_{\text{над}}}{\beta} \left(1 + \frac{6y}{\beta l_2^2} \right) \frac{\text{кГ}}{\text{см}}, \quad (26)$$

$$P_k = \frac{q_k}{l_2} \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}. \quad (27)$$

Формула (26) надає можливість провести оцінку міцності на відрив стінки конденсатора від компаунда під дією внутрішнього надлишкового тиску повітря, встановити ступінь впливу q_k у порівнянні з іншими факторами.

2.2. Результати розрахунків на відрив компаунда від стінки корпусу конденсатора.

Результати розрахунків величин q_k і P_k отриманих за формулами (26) і (27) для трьох типорозмірів конденсаторів, наведені у таблиці 1. При розрахунках використовувались такі числові значення постійних величин: $h=0,05$ см, $l_2=0,5$ см, $\mu=0,32$. Порівняння величин максимальних зусиль на відрив стінки корпусу конденсатора від компаунда ($P_{k|y=0,5l_2}$), що виникають внаслідок дії надлишкового внутрішнього тиску повітря і їх

порівняння з величинами адгезійних напружень ($\sigma_{\text{адг}}=125$ Кг/см²) і контактних тисків на границі компаунд-корпус (величина P_{2k} має порядок 10² Кг/см²), дозволяє зробити висновок про несуттєву дію цього зусилля на герметичність вузла вологозахисту плівкових конденсаторів. Отже, дія надлишкового внутрішнього тиску повітря на етапі випробувань при температурі +100°С як в осьовому, так і в радіальному напрямках не може бути причиною розгерметизації вузла вологозахисту плівкових конденсаторів, якщо закінчилося утворення адгезійних зв'язків між компаундом і стінками корпусу, а також між компаундом і виводом.

Рекомендації

Із викладеного вище видно, що після полімеризації надлишковий внутрішній тиск не може спричинити розгерметизацію. Але у процесі герметизації, коли адгезійні сили ще слабкі, така можливість існує. Тому рекомендується у процесі герметизації компенсувати внутрішній тиск розігрітого повітря притискаючим вантажем 6,5кГ, або проводити герметизацію у термобароклаві. Також була розроблена технологія полімеризації компаунду, направлена на утворення адгезійних зв'язків при відсутності надлишкового тиску.

Таблиця 1. Результати розрахунків, отриманих за формулами (26) і (27) для трьох типорозмірів конденсаторів.

Типорозміри конденсаторів		1	2	3
R	см	1,675	2,205	2,725
$\beta = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{R \cdot h}}$	1/см	4,42648	3,857995	3,470424
$q_{k y=\frac{l_2}{2}} = \frac{P_{\text{над}}}{\beta} \cdot \left(1 + \frac{3}{\beta \cdot l_2} \right)$	кГ/см	0,1452724	0,1808122	0,2146678
$P_{k y=\frac{l_2}{2}} = \frac{P_{\text{над}}}{\beta \cdot l_2} \cdot \left(1 + \frac{3}{\beta \cdot l_2} \right)$	кГ/см ²	0,2905449	0,3616244	0,4293356
$q_{k y=-\frac{l_2}{2}} = \frac{P_{\text{над}}}{\beta} \cdot \left(1 + \frac{3}{\beta \cdot l_2} \right)$	кГ/см	-0,0219239	-0,03928798	-0,05733835
$P_{k y=-\frac{l_2}{2}} = \frac{P_{\text{над}}}{\beta \cdot l_2} \cdot \left(1 + \frac{3}{\beta \cdot l_2} \right)$	кГ/см ²	-0,0438478	-0,7857596	-0,1146767

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Трифонов В.В. Надійність пристроїв промислової електроніки. - Київ: Либідь, 1993.
2. Ленков С.В. Обеспечение надёжности РЕА. - Киев: ФАЛПУ, 1997.
3. Ройзман В.П., Лебідь А.В. Розробка вузлів захисту від вологи плівкових та електролітичних конденсаторів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. - 2001. - № 415.
4. Ройзман В.П., Лебідь А.В. Розрахунок контактного тиску, що виникає у вузлах захисту від вологи плівкових конденсаторів // Вісник Технологічного університету Поділля. Ч 1. Технічні науки. - 2001. - № 3.
5. Ройзман В.П., Лебідь А.В. Вивчення міцності та герметичності тонкоплівкових та електролітичних конденсаторів методом електротензометрії / Збірник наукових праць. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах - 2001. - №8.