



Ройзман В. П.
Петрашчук С. А.

Хмельницький
національний
університет

Royzman V. P.
Petrashchuk S. A.

*Khmelnitskyi National
University*

УДК 621.396.6:539.4

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В СПОЛУЧЕНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОННИЙ ЕЛЕМЕНТ-КОМПАУНД

Обґрунтовано вибір математичної моделі і отримані формули для проектного розрахунку вузлів герметизованої радіоапаратури, які дозволяють оцінювати міцність пасивних електронних компонентів, що мають форму тіл обертання (конденсаторів, резисторів, діодів, гермовиводів і т.п.). Виконано розрахунок напружень, які виникають в матеріалах резистора і компаунда в діапазоні температур $\Delta t=130^{\circ}\text{C}$ вздовж радіусів резистора і компаунда.

Ключові слова: гермомодуль, електронний елемент, компаунд, радіальне напруження, колове напруження, контактний тиск.

Постановка проблеми. Широке використання виробів радіоелектроніки в різних областях техніки, ускладнення умов їх експлуатації, а також підвищення технічної і економічної ціни відмов призвели до значного підвищення вимог щодо міцності, надійності та інших параметрів якості. На даний час проблема забезпечення міцності особливо актуальна для електронних елементів, герметизованих органічними полімерними матеріалами.

Герметизуючі полімерні матеріали (компаунди) утворюють із елементами електронної апаратури монолітні сполуки (рис. 1).

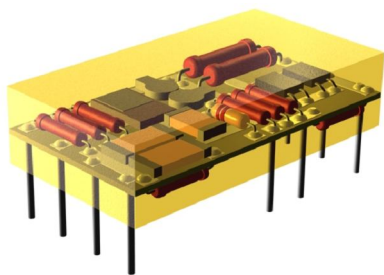


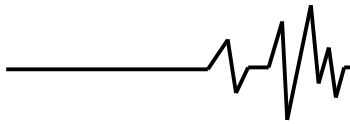
Рис. 1. Модуль, герметизований компаундом

Але при випробуваннях на термоудари (коли вироби з температури $+70^{\circ}\text{C}$ переносяться в температуру -60°C з годинною витримкою при кожній температурі) та при коливаннях температури в експлуатації

внаслідок великої різниці в фізико-механічних характеристиках всіх елементів, що складають таку систему, виникають внутрішні механічні напруження, від яких можуть руйнуватися найслабші ланки. Якщо відбувається розтріскування компаунду, то порушується герметизація виробу з наступним виходом його з ладу, при руйнуванні або деформації електронних елементів настає або обрив електричного кола одразу, або відхилення параметрів від установлених норм, що призводить до їх відмов ще задовго до поломки. Негативність таких дефектів полягає в тому, що неможливо замінити елемент, який вийшов із ладу, і, отже, руйнується весь вузол або прилад.

В зв'язку з цим виникає необхідність з одного боку розробити математичні моделі для розрахунку на міцність електронних компонентів, що герметизуються компаундом, які дозволяють обґрунтовано підбирати контактуючі матеріали, назначати конструктивні розміри, вибирати місця для розташування елементів в об'ємі компаунда; з другого боку - розробити ефективні експериментальні методи, які дозволяють визначати напружений стан електронних елементів.

Утворення розрахункової схеми. Розглянемо найбільш загальний випадок, коли циліндричний електронний елемент (конденсатор, резистор, вивід) оточений нерівномірним шаром компаунда. Подумки виділимо навколо досліджуваного елемента, компаундний циліндр з зовнішнім радіусом,



рівним мінімальній відстані від осі деталі до стінки виробу (рис.2) і розглянемо взаємодію тільки виділеного шару компаунда і резистора.

Тоді, очевидно, розрахункову схему можна звести до осесиметричної задачі контактної взаємодії двох циліндричних тіл (рис. 3).

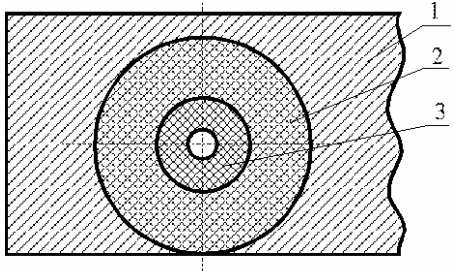


Рис. 2. Утворення розрахункової схеми (1 – компаунд, 2 – виділений компаундний циліндр, 3 – пасивний електронний компонент)

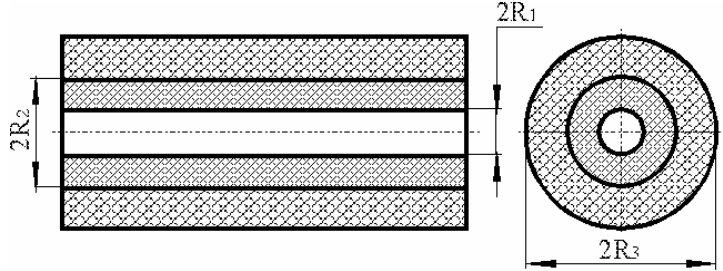


Рис. 3. Пасивний електронний компонент, оточений шаром компаунда

При розв'язанні цієї задачі можна очікувати появу стискуючих і розтягуючих навантажень на межі елемент-компаунд у пасивному електронному елементі і компаунді від контактних тисків, які виникають через різницю коефіцієнтів лінійного теплового розширення та інших фізико-механічних характеристик матеріалів елемента і компаунда при зміні температури. Таким чином, в принципі, для розв'язування можна використати теорію Ляме-Гадоліна розрахунку на міцність (теорію скріплених стволів артилерійських гармат). І хоча природа діючих сил в обох випадках різна: для гармат - це тиск порохівих

газів усередині ствола, а для електронних елементів, що герметизуються, - це контактний тиск на межі компаунда та елемента; основна частина розв'язування зводиться до загальної схеми розрахунку - до осесиметричної задачі.

Оцінка напружень в електронному елементі і компаунді. Розглянемо загальний випадок взаємодії резистора з оточуючим його компаундом, коли резистор навантажений по зовнішній поверхні контактним тиском P , а по внутрішній - атмосферним P_1 , а компаундний циліндр навантажений по внутрішній поверхні контактним P , а по зовнішній тиском P_2 , рівним тиску навколишнього середовища (рис. 4).

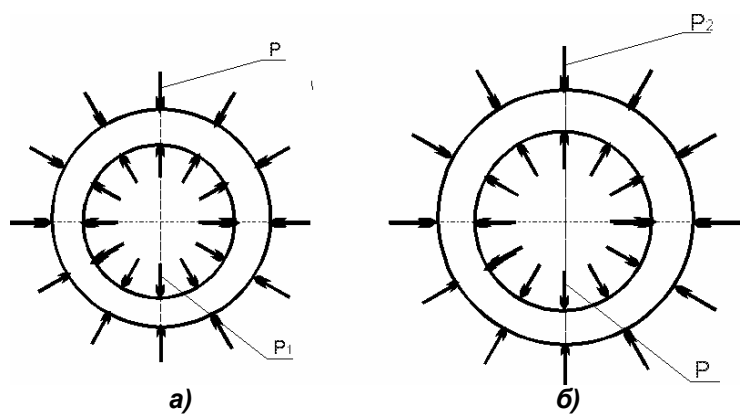
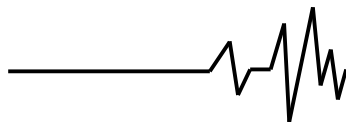


Рис. 4. Схеми навантаження внутрішнього (а) і зовнішнього (б) циліндрі

З огляду на громіздкість виводу приведемо результати застосування теорії товстостінних циліндрів до розглядуваної задачі. У відповідності з [1] запишемо формули для визначення радіальних напружень σ_r ,

окружних напружень σ_t та радіальних переміщень U в матеріалах резистора (1)-(3) та компаунда (4)-(6):

$$\sigma_{r1} = \frac{E_1}{1-\mu_1} \left[-\frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r \alpha_1 \Delta t_1 r dr + \frac{r^2 - R_1^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_1 \Delta t_1 r dr \right] + \frac{P_1 R_1^2 - P R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{(P_1 - P) R_1^2 R_2^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \quad (1)$$



$$\sigma_{t_1} = \frac{E_1}{1-\mu_1} \left[\frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r \alpha_1 \Delta t_1 r dr + \frac{r^2 - R_1^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_1 \Delta t_1 r dr - \alpha_1 \Delta t_1 \right] + \frac{P_1 R_1^2 - P R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{(P_1 - P) R_1^2 R_2^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \quad (2)$$

$$U_1 = \frac{1}{r} \frac{1+\mu_1}{1-\mu_1} \int_{R_1}^r \alpha_1 \Delta t_1 r dr + r \left[\frac{(1-2\mu_1)(P_1 R_1^2 - P R_2^2)}{E_1 (R_2^2 - R_1^2)} + \frac{1-3\mu_1}{(1-\mu_1)(R_2^2 - R_1^2)} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_1 \Delta t_1 r dr \right] + \frac{1}{r} \left[\frac{(1+\mu_1)(P_1 - P) R_1^2 R_2^2}{E_1 (R_2^2 - R_1^2)} + \frac{R_1^2 (1+\mu_1)}{(1-\mu_1)(R_2^2 - R_1^2)} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_1 \Delta t_1 r dr \right] \quad (3)$$

$$\sigma_{r_2} = \frac{E_2}{1-\mu_2} \left[-\frac{1}{r^2} \int_{R_2}^r \alpha_2 \Delta t_2 r dr + \frac{R^2 - R_2^2}{r^2 (R_3^2 - R_2^2)} \int_{R_2}^{R_3} \alpha_2 \Delta t_2 r dr \right] + \frac{P R_2^2 - P_2 R_3^2}{R_3^2 - R_2^2} - \frac{(P - P_2) R_2^2 R_3^2}{r^2 (R_3^2 - R_2^2)} \quad (4)$$

$$\sigma_{t_2} = \frac{E_2}{1-\mu_2} \left[\frac{1}{r^2} \int_{R_2}^r \alpha_2 \Delta t_2 r dr + \frac{R^2 - R_2^2}{r^2 (R_3^2 - R_2^2)} \int_{R_2}^{R_3} \alpha_2 \Delta t_2 r dr - \alpha_2 \Delta t_2 \right] + \frac{P R_2^2 - P_2 R_3^2}{R_3^2 - R_2^2} + \frac{(P - P_1) R_2^2 R_3^2}{r^2 (R_3^2 - R_2^2)} \quad (5)$$

$$U_2 = \frac{1}{r} \frac{1+\mu_2}{1-\mu_2} \int_{R_2}^r \alpha_2 \Delta t_2 r dr + r \left[\frac{(1-2\mu_2)(P R_2^2 - P_2 R_3^2)}{E_2 (R_3^2 - R_2^2)} + \frac{1-3\mu_2}{(1-\mu_2)(R_3^2 - R_2^2)} \int_{R_2}^{R_3} \alpha_2 \Delta t_2 r dr \right] + \frac{1}{r} \left[\frac{(1+2\mu_2)(P - P_2) R_2^2 R_3^2}{E_2 (R_3^2 - R_2^2)} + \frac{R_2^2 (1+\mu_2)}{(1-\mu_2)(R_3^2 - R_2^2)} \int_{R_2}^{R_3} \alpha_2 \Delta t_2 r dr \right] \quad (6)$$

де μ_1, μ_2 – коефіцієнти Пуасона матеріалів резистора і компаунда відповідно;

E_1, E_2 – модулі пружності першого роду матеріалів резистора і компаунда;

α_1, α_2 – коефіцієнти лінійного теплового розширення матеріалів резистора і компаунда;

R_1, R_2 – внутрішній і зовнішній радіуси електронного елемента; R_2, R_3 – внутрішній і зовнішній радіуси виділеного компаундного циліндра;

r, R – змінні радіуси: $R_1 \leq r \leq R_2, R_2 \leq R \leq R_3$ (рис. 3);

$\int_{R_1}^r \alpha_1 \cdot \Delta t_1 \cdot r dr, \int_{R_1}^{R_2} \alpha_1 \cdot \Delta t_1 \cdot r dr, \int_{R_2}^r \alpha_2 \cdot \Delta t_2 \cdot r dr, \int_{R_2}^{R_3} \alpha_2 \cdot \Delta t_2 \cdot r dr$ – температурні інтеграли.

Перепади температур $\Delta t_1, \Delta t_2$, які входять у формули температурних інтегралів

(і напружень σ_{t_1} і σ_{t_2}), визначаються як

$\Delta t_1 = t_{el}(r, \tau) - t_0, \Delta t_2 = t_{ком}(r, \tau) - t_0$, де

$t(r, \tau)$ – температура циліндричної поверхні

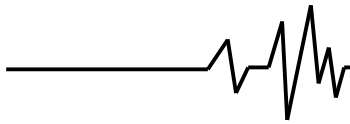
радіуса r в момент часу τ , який відрховується з моменту перенесення виробу із середовища із

сталю температурою t_0 у середовище з

температурою t_1 . У розрахунках t_0

приймається за початкову температуру тіла.

Вище наведені формули значно спрощуються, якщо нехтуються малі тиски навколишнього середовища P_1 і P_2 в порівнянні з набагато більшим контактним тиском P .



Для усталеного перепаду температур Δt , коли температура всього виробу досягає температури t_1 , формули (1-6) для визначення напружень і контактної тиску набувають вигляду: напруження та переміщення в матеріалі резистора

$$\sigma_{r_1} = \frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} - 1 \right), \quad (7)$$

$$\sigma_{t_1} = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} + 1 \right), \quad (8)$$

$$U_1 = -\frac{PR_2^2}{E_1(R_2^2 - R_1^2)} \left[r(1 - 2\mu_1) - \frac{1 + \mu_1}{r} R_1^2 \right], \quad (9)$$

напруження та переміщення в матеріалі компаунда

$$\sigma_{r_2} = -\frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \left(\frac{R_3^2}{R^2} - 1 \right), \quad (10)$$

$$\sigma_{t_2} = -\frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \left(\frac{R_3^2}{R^2} + 1 \right), \quad (11)$$

$$U_2 = \frac{PR_2^2}{E_2(R_3^2 - R_2^2)} \left[r(1 - 2\mu_2) + \frac{(1 + \mu_2)R_3^2}{r} \right], \quad (12)$$

Епюри розподілення напружень в резисторі і компаунді зображені на рис. 5:

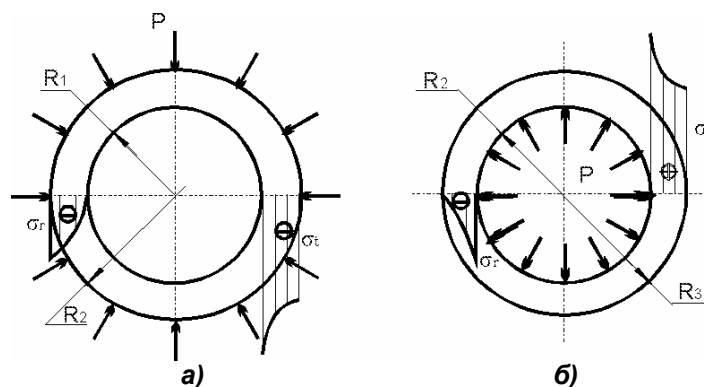


Рис. 5. Епюри окружних і радіальних напружень в матеріалах внутрішнього (а) і зовнішнього (б) циліндрів

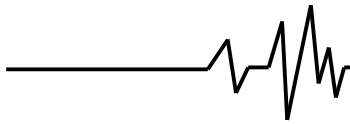
Із формул (1-12) видно, що при радіусі компаунда, який в чотири рази перевершує зовнішній радіус резистора, напруження в компаунді складають 1/16 від максимальних. Отже в таких випадках, задовольняючись 5-6% точністю розрахунків, можна сказати, що компаундний циліндр має нескінченну товщину. Це дозволяє розраховувати на міцність резистор, заполімеризований в компаунді будь-якої форми, по формулам (1-12) тільки б товщина компаунда була в 4 рази більша зовнішнього радіуса резистора. Також видно, що при зазначених співвідношеннях товщин компаунда і зовнішнього радіуса резистора можна обмежитись вивченням осесиметричної задачі, так як збільшення тиску від компаунда, розташованого за зоною виділеного циліндра, буде несуттєвим порівняно з максимальними, знайденими шляхом розв'язування симетричної задачі, і в інженерних розрахунках може не враховуватись.

Визначення контактної тиску. Всі раніше наведені формули для знаходження напружень та переміщень резистора і компаунда є функцією контактної тиску P. Для його знаходження розглянемо умову спільної деформації резистора і компаунда. В конструкції резистор-компаунд при достатньо хорошій адгезії матеріалів резистора і компаунда вони зв'язані і можуть переміщуватись тільки разом. Умова спільності деформацій має вигляд:

$$U_{1/r=R_2} = U_{2/R=R_2}. \quad (13)$$

Підставляючи в цю формулу значення переміщень резистора і компаунда на межі резистор-компаунд з формул (9) і (12) і розв'язуючи рівняння відносно контактної тиску (тисками P_1 і P_2 нехтуємо). В результаті отримуємо рівняння

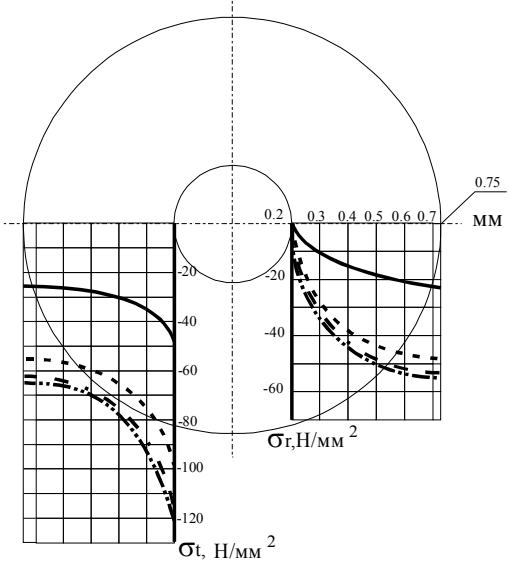
$$P = \frac{[(1 + \mu_1)\alpha_1 - (1 + \mu_2)\alpha_2]l}{\frac{(1 + \mu_1)[R_2^2(1 - 2\mu_1) + R_1^2]}{E_1(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{(1 + \mu_2)[R_2^2(1 - 2\mu_2) + R_3^2]}{E_2(R_3^2 - R_2^2)}}. \quad (14)$$



Розрахунок напружень в резисторі ОМЛТ-0,125, герметизованому компаундом марки ЕЗК-25, в складі гермомодуля ЖУ5.760.001 при усталеному перепаді температур. Проведемо розрахунок на міцність резисторів ОМЛТ-0,125, компаундованих компаундом типу ЕЗК -25 на основі вище наданих формул в діапазоні температур $\Delta t=130^{\circ}\text{C}$ (від $+70^{\circ}\text{C}$ до -60°C) вздовж радіусів резистора і компаунда. Розрахунок проводимо при рівномірній товщині шару компаунда та ряді фіксованих, взятих із практики, значень товщини компаунда. Це найбільш несприятливі (з точки зору міцності) умови, коли конструкція перенесена з одних температурних умов в інші. Тому, якщо

конструкція виявляється достатньо міцною в екстремальних умовах, то її працездатність в нормальних умовах можна гарантувати. Для розрахунку використовуємо наступні дані, отримані при лабораторних випробуваннях: резистор - $\mu=0,292$; $E=13,1 \cdot 10^{10}$ Н/м²; $\alpha=6 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹; $R_1=0,2$ мм; $R_2=0,75$ мм; компаунд $\mu=0,3$; $E=1,21 \cdot 10^{10}$ Н/м²; $\alpha=45 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹; $R_2=0,75$ мм; $R_3=1-10$ мм.

Результати розрахунку показані на графіках (рис. 6-7), де по осі абсцис відкладені значення радіусів, а по осі ординат - значення окружних, радіальних напружень матеріалу резистора чи компаунда.



— $R_3=1$ мм, - - - $R_3=2$ мм, ····· $R_3=3$ мм, - · - · $R_3=10$ мм.

Рис. 6. Розподілення напружень по радіусу резистора при різних товщинах компаундного циліндра R_3

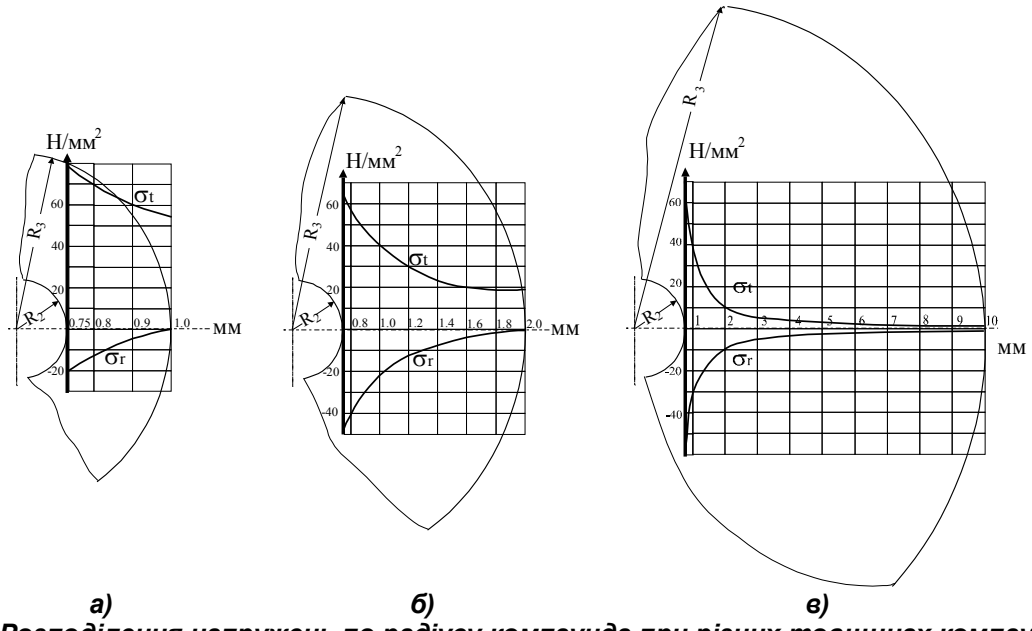
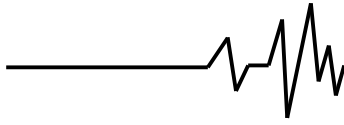


Рис. 7. Розподілення напружень по радіусу компаунда при різних товщинах компаундного циліндра((а) – $R_3=1,0$, (б) – $R_3=2,0$, (в) – $R_3=10,0$)



Висновки. Так як матеріали резистора і компаунда знаходяться в складному напруженому стані, то висновок про їх міцність належить давати із застосуванням теорій міцності, а ще надійніше - порівнюючи експериментально виміряні напруження в компаунді і резисторі з граничними, тобто руйнуючими, які виміряні в умовах напруженого стану, подібного експлуатаційному. Однак, це зауваження виходить за межі статті і буде дано в подальшому.

Список використаних джерел

1. Сопротивление материалов / Писаренко Г. С., Агарев В. А., Квитка А. Л. и др. / Под ред. Г. С. Писаренко. – К. : Техника, 1988. – 790 с.

Список джерел в транслітерації

1. Soprotivleniye materialov / Pisarenko G. S., Agarev V. A., Kvitka A. L. i dr. / Pod red. G. S. Pisarenko. – K. : Tekhnika, 1988. – 790 s.

РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СОПРЯЖЕННОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЭЛЕМЕНТ-КОМПАУД

Аннотация. Обоснован выбор математической модели и получены формулы для проектного расчета герметизированных

узлов радиоаппаратуры, позволяющие оценивать прочность пассивных электронных компонентов, имеющих форму тел вращения (конденсаторов, резисторов, диодов, гермовыводов и т.п.). Выполнен расчет напряжений, возникающих в материалах резистора и компаунда в диапазоне температур $\Delta t=130^{\circ}\text{C}$ вдоль радиусов резистора и компаунда.

Ключевые слова: гермомодуль, электронный элемент, компаунд, радиальные напряжения, тангенциальные напряжения, контактное давление.

CALCULATION OF MECHANICAL STRESSES IN ADJOINT SYSTEM OF ELECTRONIC COMPONENT AND COMPOUND

Annotation. The paper represents mathematical model and formulas developed for project calculations which are applied to sealed electronic units and provide assessing strength of passive electronic components having revolution shape (capacitors, resistors, diodes, pins, etc.). The stress calculation has been produced for materials of resistor and compound in the temperature interval (from -60 deg C to $+70$ deg C) along the radius of resistor and compound.

Key words: sealed electronic unit, electronic component, compound, radial stress, tangential stress, contact pressure.