

3. MicroConverter. Спецификация ADuC812 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gaw.ru/pdf/AD/rus/aduc812_a_rus.pdf.

4. MicroConverter. Многоканальный 12-битный АЦП со встроенным микропроцессором и Flash ЭРЗПУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://embedded.ifmo.ru/sdk/sdk11/components/mcu_aduc812_rus/aduc812_rus.pdf.

Надійшла 24.9.2012 р.

Статтю представляє: д.т.н. Кондратов В.Т.

УДК 621.01: 620.179.1

А.М. ЛОКОЩЕНКО

НИИ механики МГУ им. Ломоносова, г. Москва

С.А. ПЕТРАЩУК, В.П. РОЙЗМАН

Хмельницкий национальный университет

ОЦЕНКА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СИСТЕМЫ "ЭЛЕКТРОННЫЙ ЭЛЕМЕНТ – КОМПАУНД"

Разработан экспериментальный способ нахождения реального коэффициента запаса прочности по предельным состояниям элементов, воспроизводимым в реальной конструкции. Предложены технологические методы защиты электронных элементов от действия компаунда при термоударах и экспериментально оценена эффективность их применения на основе определения коэффициентов демпфирования ряда защитных покрытий.

Paper represents experimental method for finding real strength safety factor by the ultimate conditions of components, which are reproduced when being in real device. It offers technological methods for protecting electronic components from the force of compound while thermal impacts and has experimentally assessed effectiveness of their use on the basis of finding damping coefficients of the range of protective covers.

Ключевые слова: герметизация, электронный элемент, компаунд, термоудар, прочность, напряжение, идентификация.

Для системы "электронный элемент – компаунд", рассматриваемой в виде сопряженных цилиндров (рис. 1, 2) условие прочности приобретает следующий вид [1]:

$$\sigma_{\text{экр}} = f(\sigma_{r_i}, \sigma_{t_i}, \sigma_{z_i}) \leq [\sigma],$$

где $\sigma_{r_i}, \sigma_{t_i}, \sigma_{z_i}$ – радиальные, окружные и осевые напряжения в материале i -го сопрягаемого цилиндра. Для материалов электронного элемента и компаунда напряжения рассчитываются по формулам (1–6).

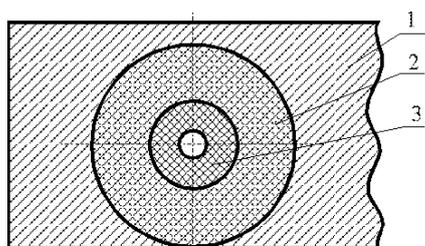


Рис. 1 Образование расчетной схемы (1 – компаунд, 2 – выделенный компаундный цилиндр, 3 – электронный элемент)

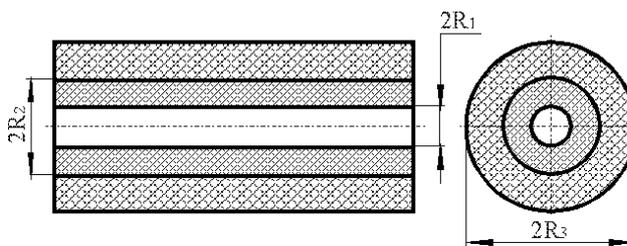


Рис. 2 Схема электронного элемента, окруженного слоем компаунда

$$\sigma_{r_1} = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2}\right), \quad (1) \quad \sigma_{r_2} = -\frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} - 1\right), \quad (2) \quad \sigma_{z_1} = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_{t_1} = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} + 1\right), \quad (4) \quad \sigma_{t_2} = \frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \left(\frac{R_3^2}{R^2} + 1\right), \quad (5) \quad \sigma_{z_2} = \frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2}, \quad (6)$$

где μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов электронного элемента и компаунда соответственно; E_1, E_2 – модули упругости первого рода материалов электронного элемента и компаунда; α_1, α_2 – коэффициенты линейного теплового расширения материалов электронного элемента и компаунда; R_1, R_2 – внутренний и внешний радиусы электронного элемента; R_2, R_3 – внутренний и внешний радиусы выделенного компаундного цилиндра; r, R – переменные радиусы: $R_1 < r < R_2$, $R_2 < R < R_3$; P – контактное давление, возникающее на границе электронный элемент-компаунд при перепаде температур ΔT :

$$P = \frac{[(1+\mu_1)\alpha_1 - (1+\mu_2)\alpha_2]\Delta T}{\frac{(1+\mu_1)R_1^2 + (1-\mu_1)R_2^2}{E_1(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{(1+\mu_2)R_3^2 + (1-\mu_2)R_2^2}{E_2(R_3^2 - R_2^2)}}, \quad (7)$$

Однако оценке прочностной надежности по допускаемым напряжениям присущи существенные недостатки. Величина допускаемого напряжения носит условный характер, так как не отражает характера предполагаемого разрушения, режима нагружения и других факторов, влияющих на надежность. Да и сами теории прочности не всегда правильно отображают реальное напряженное состояние детали. Поэтому в современных инженерных расчетах чаще пользуются расчетом по запасам прочности.

Коэффициент запаса прочности, с каким работают электронные элементы в гермомодуле, равен отношению предельных напряжений (предела прочности σ_B), при которых материал элементов разрушается, к максимальным напряжениям $\sigma_{экс}$, возникающим в условиях эксплуатации, причем и σ_B и $\sigma_{экс}$ относятся к объёмному напряженному состоянию, соответствующему условиям эксплуатации

$$k = \frac{\sigma_B}{\sigma_{экс}}. \quad (8)$$

Определение реального коэффициента запаса прочности. Для определения реального коэффициента запаса прочности k разработан экспериментальный способ его нахождения по предельным состояниям элементов, воспроизводимым в реальной конструкции. Предельным состоянием считалось такое, при котором электронные элементы теряли способность сопротивляться внешним воздействиям или переставали удовлетворять предъявляемым к ним эксплуатационным требованиям. Согласно разработанному способу предельные напряжения определялись именно в таком же объёмном напряженном состоянии электронных элементов, что и при эксплуатации.

Применение разработанного способа для определения k показано на примере резисторов типа С2-29В в составе гермомодулей ЖУ5.760.001 гермоблока Н019.02.

Резисторы одного номинала были препарированы тензодатчиками МПТ-1-100 по схеме, приведенной на рис. 3. Потом их устанавливали в платы гермомодулей и собирали две электрические цепи из 50 последовательно соединенных резисторов в каждой (схема включения приведена на рис. 4). Для определения эксплуатационных напряжений $\sigma_{экс}$ гермомодули одной цепи заливали эксплуатационным компаундом типа ЭЗК-25, а для определения предельных (разрушающих) напряжений σ_B модули другой цепи заливали “жестким” (без пластификатора и наполнителя) компаундом на основе ЭЗК-25, в котором сохранялось почти подобное эксплуатационному объёмное напряженное состояние радиоэлементов и конструкций, но с большими напряжениями.

Гермомодули, заполимеризованные таким образом, подвергали термоударам. При этом одновременно производили измерения показаний тензорезисторов и электрических параметров цепи.

При обрыве цепи или отклонении электрического параметра (сопротивления) за допускаемые пределы ($\pm 1\%$) в “жестком” компаунде фиксировали разрушающее напряжение σ_B . А в гермомодулях, залитых эксплуатационным компаундом, фиксировали максимальное значение эксплуатационного напряжения $\sigma_{экс}$. Затем модуль с вышедшим из строя элементом исключали из электрической цепи и продолжали эксперимент.

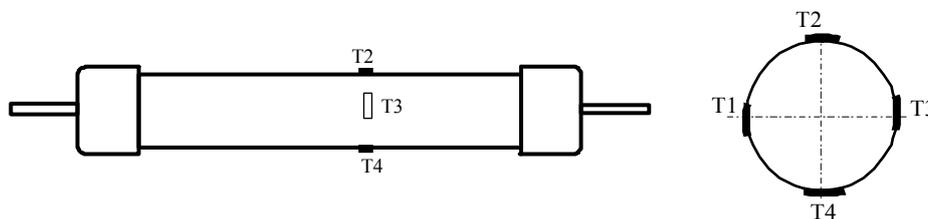


Рис. 3. Схема препарировки резисторов тензодатчиками T1, T2, T3, T4

Следует отметить, что в ряде случаев невозможности восстановления отказу предшествовал так называемый “мерцающий” дефект, когда при отрицательных температурах обнаруживали отказ исследуемой схемы, но спустя некоторое время после переноса модулей в нормальные условия или в термостат отказ исчезал. При появлении “мерцающего” дефекта измеренные в “жестком” компаунде напряжения принимали за разрушающие, поскольку этот дефект равнозначен по своим последствиям разрушению элемента. “Мерцающий” дефект часто имеет место в реальных ситуациях, когда объект с установленным на нем электронным устройством (например, летательный аппарат) эксплуатируется в условиях резко изменяющихся температур и давлений.

Дальнейший анализ материалов экспериментов показал, что значения коэффициентов запаса прочности резисторов типа С2-29В в гермомодулях с надежностью $\gamma=0,95$ лежат в интервале $1,09 < k < 1,18$.

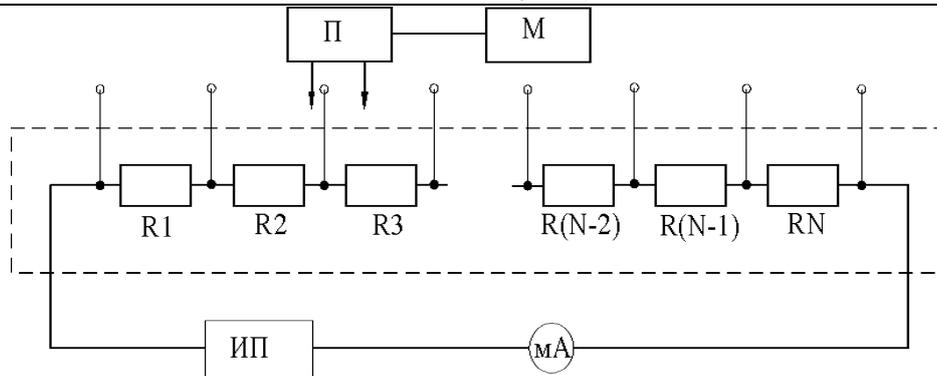


Рис. 4. Схема включения резисторов: П – переключатель; М – измерительный мост; ИП – источник питания; мА – миллиамперметр

При существующем разбросе (до 300 %) физико-механических характеристик для разных партий резисторов и компаунда (табл. 1) возможны такие неблагоприятные сочетания их характеристик и геометрических размеров, при которых k будет меньше 1, т.е. будут происходить разрушения резистора или компаунда. Поэтому было решено произвести расчет возможного k по всему известному диапазону значений физико-механических характеристик резисторов и компаунда. Для упрощения расчетов были взяты крайние значения из диапазона характеристик соединяемых материалов (табл. 1).

В табл. 2 представлены результаты расчета k при различных сочетаниях крайних значений физико-механических характеристик соединяемых материалов и нижнем значении предела прочности σ_B .

Таблица 1

Значения физико-механических характеристик соединяемых материалов

Материал	$E, \text{Н/мм}^2 \cdot 10^4$	μ	$\alpha, 1/\text{град} \cdot 10^{-6}$	$\sigma_B, \text{Н/мм}^2$
Керамика	13,0 – 21	0,28 – 0,33	5,3 – 6,3	93 – 165
Компаунд ЭЗК-25	0,9 – 1,56	0,23 – 0,45	45 – 63	85 – 430

Таблица 2

Результаты расчета коэффициента запаса прочности при крайних сочетаниях физико-механических характеристик резисторов С2-29В и компаунда ЭЗК-25

	Значения физико-механических характеристик материалов			Расчетные максимальные напряжения $\sigma_{\text{экс}}$, Н/мм ²	Коэффициент запаса прочности $k = \frac{(\sigma_B)_{\text{min}}}{(\sigma_{\text{экс}})_{\text{max}}}$	
	Материал	$\alpha, 1/\text{град} \cdot 10^{-6}$	μ			$E, \text{Н/мм}^2 \cdot 10^4$
1	керамика резисторов	5,3	0,28	13,0	122	0,76
	компаунд ЭЗК-25	63	0,45	1,56	113	0,75
2	керамика резисторов	6,3	0,33	21	56	1,66
	компаунд ЭЗК-25	45	0,23	0,9	52	1,63
3	керамика резисторов	6,3	0,33	21	124	0,75
	компаунд ЭЗК-25	63	0,45	1,56	114	0,75
4	керамика резисторов	5,3	0,28	13,0	57	1,63
	компаунд ЭЗК-25	45	0,23	0,9	53	1,6

Анализируя результаты, представленные в таблице, можно сделать вывод, что при благоприятных сочетаниях характеристик материалов резистора и компаунда коэффициент $k > 1$. Следовательно, подбирая значения физико-механических характеристик соединяемых материалов, можно добиться такого их удачного сочетания, при котором бы обеспечивалась прочность резисторов и компаунда при эксплуатации. Поэтому при производстве гермомодулей было рекомендовано ввести входной контроль характеристик материалов резисторов и компаунда и селективный подбор пары резистор – компаунд.

Для реализации входного контроля предложено использовать метод идентификации, описанный в [2]. Далее по идентифицированным характеристикам было рекомендовано производить расчет напряжений

(по формулам 1– 7), которые будут возникать в резисторах и в компаунде при термоударах, и расчет коэффициента запаса прочности. Значение коэффициента является критерием условия прочности и селективного подбора.

Однако обеспечение прочности с помощью таких мероприятий имеет ряд недостатков, таких как увеличение материальных затрат, связанных с изготовлением приспособлений для входного контроля и подготовку высококвалифицированного персонала, увеличение времени технологического процесса изготовления гермомодулей (добавляется время на входной контроль и селективный подбор). Иногда на производстве просто нет возможности обеспечить селективную сборку, так как нет подходящих партий резисторов и компаунда.

Поэтому в тяжелых современных экономических условиях необходимо было разработать такие методы защиты электронных элементов, которые бы не приводили к дополнительным материальным затратам, были просты в применении, не требовали бы специального оборудования и персонала и обеспечивали бы условие прочности при любых партиях резисторов и компаунда.

В качестве технологических мероприятий, направленных на снижение напряжений до безопасного уровня, было предложено применить демпфирующие защитные покрытия. Был отобран ряд защитных покрытий: КЛТ-30, КЛТ-30 МФ, "Силтан-Д", КЛТ-30 + (NH₄)₂ CO₃, ЦИАТИМ-201, КЛТ-30 + ЦИАТИМ-201.

Для примера опишем эксперимент, направленный на определение эффективности применения защитного покрытия КЛТ-30. Для этого было взято двадцать гермомодулей, содержащих по шесть резисторов С2-29В. Резисторы гермомодулей препарировали малобазными тензодатчиками типа МПТ. Платы с препарированными резисторами дважды помещались в термостат с температурой +70°С и в климатическую камеру с температурой -60°С, чтобы в последующем выделить действие только компаунда на исследуемые резисторы. После этого резисторы в десяти гермомодулях покрывали слоем исследуемого демпфирующего покрытия. Затем все двадцать модулей герметизировали компаундом типа ЭЗК-25. Спустя 3– 4 суток производились измерения деформаций при термоударах. При этом все 20 гермомодулей одновременно находились в термостате с температурой +70°С или в климатической камере с температурой -60°С с выдержкой при каждой температуре не менее 30 мин. При этом регистрировали показания всех тензорезисторов.

Для определения деформаций резисторов только от действия компаунда при крайних значениях допустимых температур эксплуатации из полученных показаний тензорезисторов в герметизированных модулях отнимали показания тензорезисторов, найденные в модулях до герметизации при этих же значениях температур.

В таблице 3 представлены средние значения деформаций, каждое из которых было получено по показаниям десяти тензорезисторов, установленных в одном и том же месте в десяти микромодулях с защитным покрытием и без него.

Из табл. 3 видно, что слой демпфирующего покрытия существенно снижает деформации в резисторах от действия заливочного компаунда при термоударах, что, однако не исключает случаев поломок резисторов при неблагоприятных сочетаниях физико-механических характеристик и геометрических размеров сопрягаемых материалов.

Таблица 3

**Деформации резисторов С2-29В, герметизированных компаундом ЭЗК-25
без защитного покрытия и защищенных слоем КЛТ-30**

№ тензометра	$\varepsilon \times 10^{-3}$ без защитного покрытия	$\varepsilon \times 10^{-3}$ с защитным покрытием КЛТ-30
1	2,400	1,454
2	3,970	2,684
3	3,074	1,537
4	3,620	2,481
5	2,097	1,364
6	4,612	2,589

Для выбора наиболее эффективного защитного покрытия аналогичные эксперименты проводились для всего ряда отобранных покрытий.

По величине фиксируемых деформаций судили о действии демпфирующих покрытий путем введения количественной оценки – коэффициента демпфирования, равного отношению деформаций (напряжений) элемента, герметизированного без применения покрытия, к деформациям (напряжениям) элемента, защищенного покрытием. Очевидно, что лучшими демпфирующими свойствами обладают те покрытия, которые имеют большие коэффициенты демпфирования. Расчет, проведенный с учетом этого коэффициента, позволяет более точно оценить на этапе проектирования прочность создаваемой конструкции.

Средние значения коэффициентов демпфирования, полученные при герметизации компаундом типа ЭЗК-25 резисторов, защищенных различными покрытиями, приведены в табл. 4.

Значення коефіцієнта демпфирования

Покрытие	Коефіцієнти демпфирования
КЛТ-30	1,65
КЛТ-30МФ	2,3
КЛТ-30 + (NH ₄) ₂ CO ₃	1,55
Силтан -Д	1,32
ЦИАТИМ-201	3,0
КЛТ-30 + ЦИАТИМ-201	3,5

Для резисторов оптимальной оказалась защита покрытием КЛТ-30 МФ, поверх которого наносился слой силиконовой смазки ЦИАТИМ-201, толщиной примерно 0,1 мм. При этом элементы испытывали наименьшие относительные деформации. Такой эффект достигается не только демпфирующими свойствами КЛТ-30 МФ и силиконовой смазки ЦИАТИМ-201, но и тем, что слой смазки ликвидирует непосредственную контактную связь между КЛТ-30 МФ и компаундом и препятствует передаче нагрузок на КЛТ-30 МФ и далее на резистор при деформации компаунда за счет его адгезии к КЛТ-30 МФ. То есть происходит эффект усиления демпфирующих и антиадгезионных качеств обоих покрытий. Сам процесс нанесения ЦИАТИМ-201 на слой КЛТ-30 МФ более технологичен, чем на резистор. Однако из-за возможности возникновения коррозии или других повреждений от соприкосновения с ЦИАТИМ-201 на протяжении всего срока эксплуатации, было решено исследовать другие способы защиты электронных элементов от воздействия компаунда при термоударах.

Следующим этапом разработки защитных мероприятий было исследование эффективности применения в качестве демпфирующих средств колпачков, изготовленных из полиэтилена (АД-1М-03), и полихлорвиниловых термоусадочных трубок (ДМГ.975.016ТУ). Как и в случае исследования демпфирующих свойств защитных покрытий, резисторы в двух партиях гермомодулей (по 10 шт. в каждой) препарировались тензодатчиками. Затем на резисторы одной партии надевались полиэтиленовые колпачки, а на резисторы другой – защитные термоусадочные трубки, предварительно разрезанные по образующей. Значения коэффициентов демпфирования, полученные в результате измерений, проведенных в процессе полимеризации герметика и при термоударах, равны: 3,3 при защите колпачками, 3,4 при защите трубками.

Выводы. Среди рассмотренных средств защиты можно выделить наиболее эффективные, имеющие коэффициенты демпфирования в 2– 2,5 раза больше остальных: покрытие КЛТ-30 МФ + ЦИАТИМ-201, защитные колпачки и термоусадочные трубки. В ряде случаев трубки бывают более технологичными по сравнению с покрытием и колпачками и более дешевыми, хотя они и не всегда применимы в производстве, как, например, при защите элементов прямоугольной формы. В настоящее время защита резисторов трубками внедрена на государственном предприятии "Новатор".

Литература

1. Соппротивление материалов / [Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л. и др.]; под ред. Г.С. Писаренко. – К.: Техника, 1987. – 790 с.
2. Ройзман В. Определение физико-механических характеристик полимерных материалов методом идентификации / В. Ройзман, С.А. Петрашук, И.И. Ковтун // Підвищення якості, надійності та довговічності технічних систем і технологічних процесів: зб. наук. праць за матеріалами міжнар. наук. – техн. конф. (м. Хургада, Єгипет, 2– 9 грудня 2007 р.) / Хмельницький національний університет, 2007. – С. 100– 108.

Надійшла 6.9.2012 р.
Статтю представляє: д.т.н. Ройзман В.П.