

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ БОРТОВОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА, СТОЙКОГО К УДАРНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

А. А. Куфтин, А. В. Иванов, В. Н. Савин, С. Л. Ильин, Е. Н. Карноухова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Оценка прочностных характеристик разрабатываемого прибора является одной из важных задач на этапе эскизного проектирования радиоэлектронной аппаратуры. Это особенно актуально при разработке бортовых приборов, поскольку к ним, как правило, предъявляются достаточно жесткие требования по механической прочности. В большинстве случаев внешние воздействующие факторы имеют такие уровни, при которых можно обеспечить прочность и устойчивость разрабатываемого прибора традиционными конструктивными методами. Такими методами, направленными на защиту бортовых радиоэлектронных блоков от ударных воздействий, являются: применение материалов несущих элементов конструкции с более высокими прочностными характеристиками, применение средств упругой и пластической амортизации, заполнение внутренних полостей приборов полимерными компаундами и др. Эти методы достаточно хорошо отработаны и могут быть применены для ударозащиты бортовых радиоэлектронных приборов от импульсов ускорений с амплитудой до 1500–2000 g и длительностью до 2–3 мс. В данной работе рассмотрен случай, когда требования по ударопрочности значительно превышают приведенные, что делает применение традиционных средств ударозащиты недостаточным. Кроме того, импульс содержит колебательную составляющую.

Параметры ударного воздействия (рис. 1) следующие: максимальное значение квазистатической составляющей ускорения $A = 5000$ g, максимальная амплитуда колебательной (динамической) составляющей ускорения $A = 5000$ g, длительность фронта ударного ускорения – не более 1 мс, длительность действия ударного ускорения (по уровню 0,1) – не менее 7 мс, количество колебаний ударного ускорения – не менее 5.

Цель работы формулируется следующим образом: спроектировать конструкцию бортового радиоэлектронного блока, отличающуюся повышенной прочностью при ударном воздействии высокой интенсивности и сложной формы.

Задачи, решаемые в данной работе:

- определение критериев оптимизации конструкции бортового прибора для достижения наилучших прочностных характеристик;
- анализ ударного воздействия, прикладываемого к проектируемому прибору, для выбора конструктивных средств снижения динамичности;

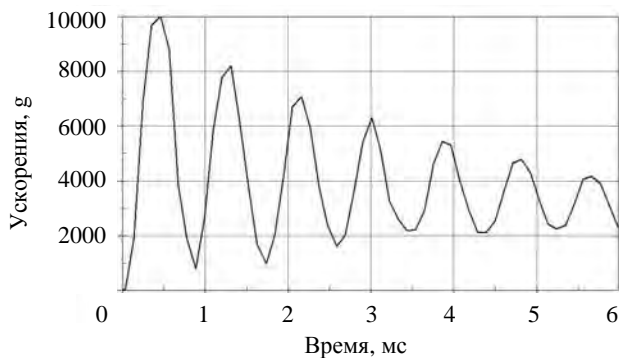


Рис. 1. Вид ударного воздействия высокой интенсивности и сложной формы

- создание виртуальной модели анализируемого прибора в среде конечно-элементного моделирования;
- расчет откликов компоновочных вариантов конструкции на воздействие сложного ударного импульса ускорения;
- верификация конечно-элементной модели путем сравнения результатов расчетов и эксперимента.

Объектом анализа и оптимизации является бортовой радиоэлектронный прибор (далее именуемый «блок»), исходная конструкция которого приведена на рис. 2. Блок представляет собой функциональный модуль (ФМ), установленный внутри корпуса через слой демпфирующего материала. Такой тип конструктивного исполнения прибора, не имеющего жесткого соединения между корпусом и ФМ, получил название «плавающая» конструкция, поскольку корпус и ФМ могут перемещаться относительно друг друга на некоторое расстояние за счет деформации демпфирующей прослойки (материалы с ярко выраженной площадкой текучести) [1]. Крепление блока в изделии осуществляется за фланец с использованием крепежной гайки и шести винтов М4. Масса блока в сборе $m = 1,5$ кг. Внутри ФМ (рис. 3) расположены печатные платы с установленными на них электрорадиоизделиями (ЭРИ).

Внутренние полости ФМ также заполнены демпфирующим материалом. В качестве такого материала могут быть использованы различные полимерные материалы, например, вспененные пенополиуретаны (ППУ-305А [2]), эпоксидные компаунды (жесткий резиноподобный материал на основе каучука [3]) или синтактные пены (представляют собой закрытопористую структуру, ячейки которой созда-

ны с помощью мелких полых микросфер (стеклянных или полимерных).



а



б

Рис. 2. Внешний вид (а) и конструкция (б) блока

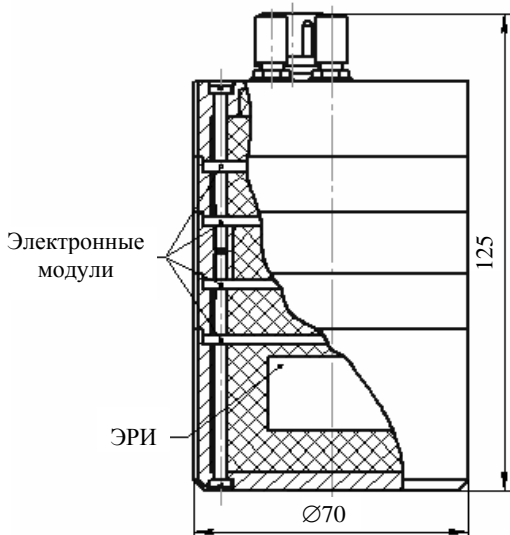


Рис. 3. Конструкция функционального модуля

При создании конечно-элементной модели (КЭМ) бортового прибора последний был разбит на две подмодели. Первая подмодель состоит из внешнего кожуха (алюминиевый сплав Д16), демпфирующей прослойки (пенопласт ППУ-305А или один из вариантов синтактной пены) и габаритно-веса аналога ФМ, представляющего собой сплошной объем, масса которого равна массе ФМ, а механические характеристики (модуль упругости и коэффициент Пуассона) соответствуют недеформируемому телу. По результатам расчета данной модели определяются перегрузки, действующие на вторую подмодель, которая представляет собой детализированный ФМ, состоящий из следующих элементов: несущие кольца (алюминиевый сплав Д16) с защемленными между ними печатными платами (стеклотекстолит СТФ) на металлическом основании (алюминиевый сплав Д16); демпфирующие прослойки (пенопласт ППУ-305А или один из вариантов синтактной пены). По результатам расчета данной модели определяются действующие перегрузки на электрорадиоизделия (ЭРИ).

Сетка – тетрагональная со свободным разбиением по объемам. Взаимодействие между соприкасающимися конструктивными элементами модели блока имитировалось с использованием алгоритмов контактного взаимодействия, реализуемых в выбранном пакете конечно-элементного анализа.

Материалы, применяемые в конструкции, заменялись их конечно-элементными аналогами:

- алюминиевый сплав Д16 – упругопластическая модель (plastic kinematic);
- стеклотекстолит СТФ – линейная эластичная модель, для которой выполняется закон Гука (elastic);
- имитатор ФМ (в модели 1) и имитатор сборки элементов (модель 2) – модель недеформируемого тела (rigid);

- демпфирующий материал – упругопластическая модель с кусочно-линейной аппроксимацией (piecewise linear plasticity).

Для моделей задавалось глобальное демпфирование в виде величины обратной добротности. Принято значение добротности $Q = 10$.

При расчетах подмоделей блока использовались следующие значения коэффициентов трения μ :

- для пары «алюминий-алюминий» и «алюминий-стеклотекстолит» $\mu = 0,2$;
- для пары «демпфирующий материал – алюминиевый сплав» $\mu = 0,4$.

Для описания контактных взаимодействий элементов конструкции блока использовались контакты типа «AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE», описывающие взаимодействие объемов по соприкасающимся поверхностям, при этом по результатам серии методических расчетов опции «Soft constrain option» присвоено значение 0 (формулировка штрафного метода).

При первичном анализе конструкции блока в качестве критерия ударопрочности принимался следующий критерий: обеспечение максимального сни-

жения амплитуды ударного ускорения на ФМ (уменьшение инерционной составляющей на ЭРИ). Однако, как показал анализ ударного воздействия (по энергетическим характеристикам ударного импульса и по результатам серии конечно-элементных расчетов конструкции с использованием различных составов материала заполнения внутренних полостей, с применением крешеров и жестких эпоксидных компаундов), существенное снижение ударных перегрузок невозможно при столь высокой энергетике внешнего воздействия и заданных массогабаритных характеристиках блока (рис. 4). Кроме того, использование в качестве материала демпфирующей прослойки синтактных пен приводит к увеличению ударных перегрузок на ФМ и скорости нарастания фронта импульса (см. таблицу).

На основе анализа данных рис. 4 и таблицы можно сделать следующие выводы:

– ускорение на ФМ растет при уменьшении жесткости демпфирующего материала (уменьшении плотности и предела текучести);

– ни один из рассмотренных материалов демпфирующей прослойки не позволяет обеспечить динамичность конструкции ниже единицы.

То есть применение «плавающей» конструкции при заданных уровнях ударного воздействия и массогабаритных характеристиках нецелесообразно, поэтому от данного варианта конструктивного исполнения следует отказаться.

Данные выводы подтверждаются и проведенными экспериментальными исследованиями:

– применение более «мягких» материалов демпфирующей прослойки (с низким значением предела текучести) приводит к росту перегрузок на ЭРИ и увеличивает напряжения на корпусе блока. В опыте с «мягкой» синтактной пеной (таблица) получило значительные механические повреждения дно корпуса (предел прочности материала корпуса был превышен, и дно оторвалось от блока) (рис. 5), что подтверждается и результатами численного моделирования (предел текучести σ_T в нижней части корпуса превышен) (рис. 6).

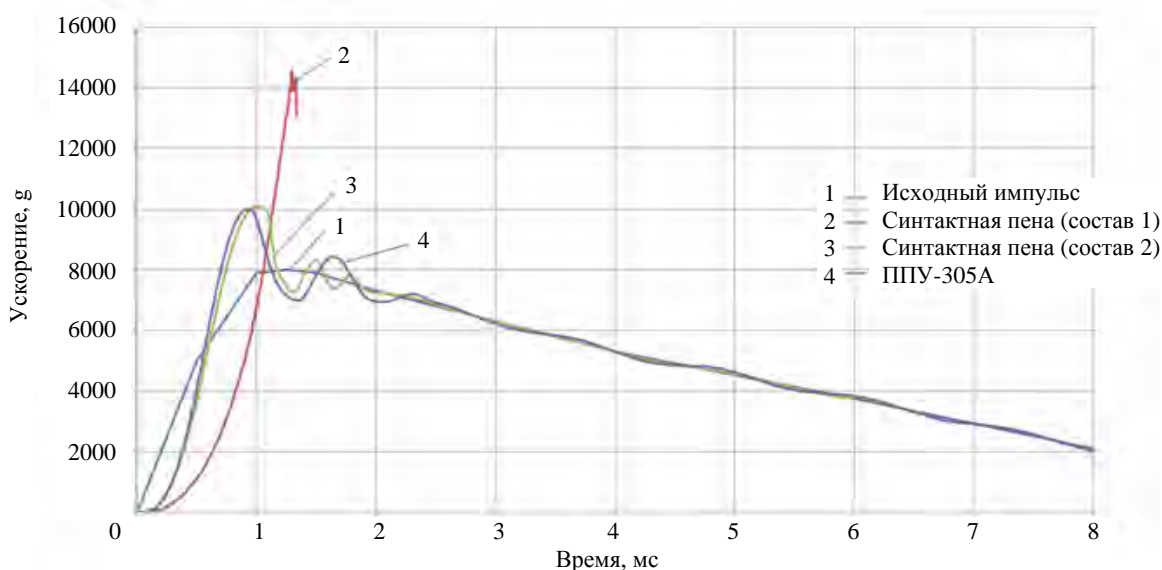


Рис. 4. Результаты расчета блока с различными составами материала заполнения (ударный импульс – квазистатический без колебательной составляющей) состав: 1 – мягкая синтактная пена, состав 2 – жесткая синтактная пена (см. таблицу)

Ускорения на ФМ при приложении ударного импульса амплитудой 8000 g

Параметр	Материал демпфирующей прослойки			
	«мягкая» синтактная пена	«жесткая» синтактная пена	Пенопласт ППУ-305А	компаунд ЭК-34
Ускорение, g	14500	10500	10000	10000
Плотность ρ , кг/м ³	50	150	200	1400
Предел текучести σ_T , МПа	1	2	4	–

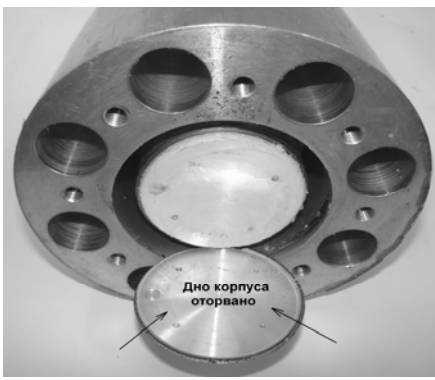


Рис. 5. Повреждения блока после эксперимента

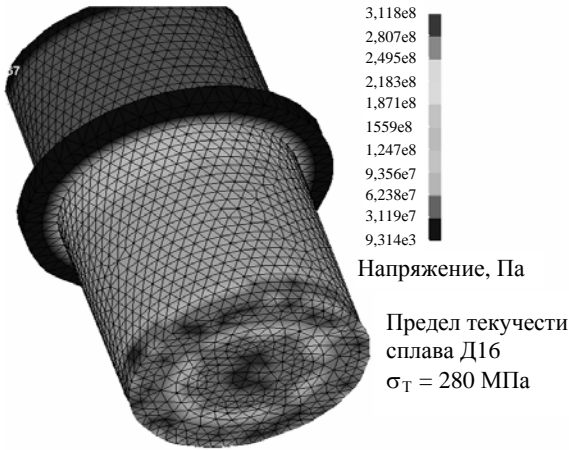


Рис. 6. Напряжения на корпусе блока

По результатам серии расчетов блока с различными материалами заполнения и по результатам анализа экспериментальных данных был предложен следующий критерий оптимизации:

– обеспечение максимальной жесткости крепления ФМ в изделии. Выполнение данного условия позволит при ударном нагружении обеспечить динамичность конструкции, близкую к единице.

Проведенный анализ показал, что наилучших динамических характеристик можно достичь при жестком креплении ФМ в изделии без использования внешнего контейнера и демпфирующей прослойки. При этом ЭРИ должны максимально жестко крепиться к корпусу и печатным платам ФМ.

Результаты расчета оптимизированной конструкции (рис. 7) приведены на рис. 8.

Как показал проведенный расчет, ускорения на ЭРИ не превышают значения 10000 g, что свидетельствует о низкой динамичности конструкции в целом. Добиться такого результата позволили следующие меры:

– отказ от использования демпфирующей прокладки между корпусом блока и ФМ;

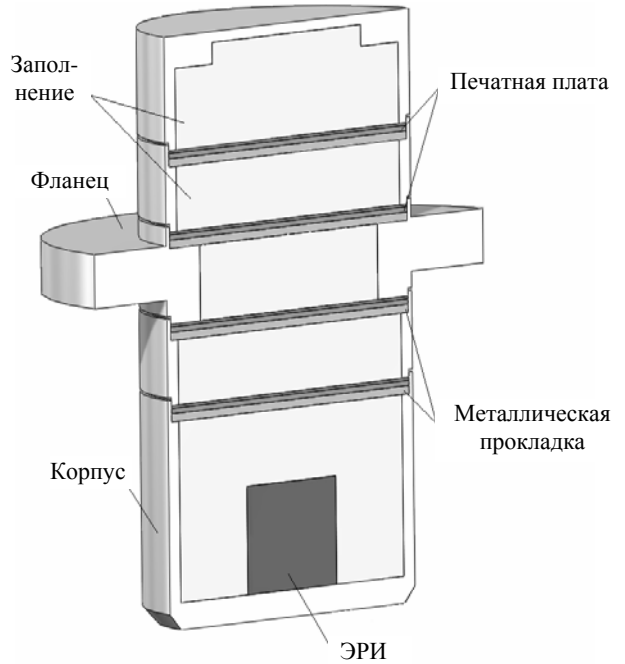


Рис. 7. Внешний вид оптимизированной конструкции блока

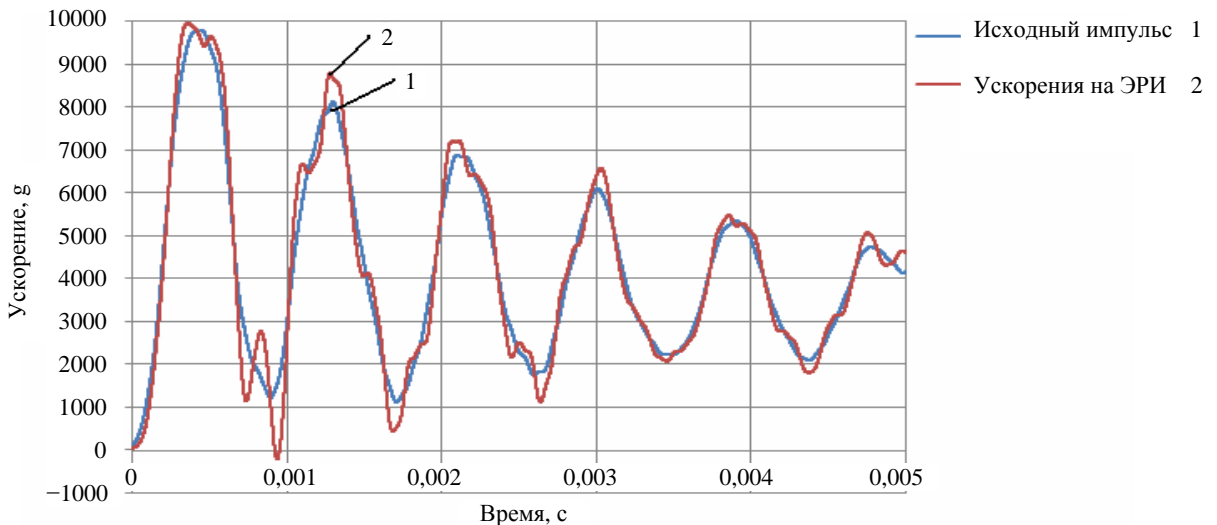


Рис. 8. Расчетные ускорения в осевом направлении

– использование в качестве материала заполнения ФМ пенопласта ППУ-305А, имеющего повышенную жесткость по сравнению с различными составами синтактичных пен (использование более жесткого компаунда ЭК-34 нецелесообразно, поскольку данный материал не технологичен при заполнении ФМ целиком и способен при полимеризации вызвать значительные напряжения элементов конструкции, что особенно опасно для ЭРИ);

– установка наиболее чувствительных к механическим нагрузкам ЭРИ на основание ФМ (обеспечивает большую жесткость крепления, чем установка на одну из печатных плат).

Принятые меры можно считать рекомендациями при проектировании бортовых приборов, эксплуатирующихся в условиях воздействия ударного импульса высокой интенсивности и сложной формы.

Таким образом, в работе решены следующие задачи:

– проанализировано ударное воздействие с целью выбора оптимальных конструктивных средств снижения динамичности конструкции. Определены требования к проектированию ударозащиты блока (отказ от использования «плавающей» конструкции, повышение жесткости крепления ЭРИ в приборе);

– определен критерий оптимизации конструкции бортового прибора для достижения наилучших прочностных характеристик;

– создана виртуальная модель анализируемого прибора в среде конечно-элементного моделирования (с возможностью оптимизации массогабаритных характеристик и возможностью задания любых нагрузок и ограничений);

– рассчитаны отклики различных компоновочных вариантов блока при воздействии сложного ударного импульса (вплоть до уровня ЭРИ). Результаты расчетов показали, что конструкционная прочность блока обеспечена, хотя и с малым значением коэффициента запаса.

Следует отметить, что предложения по доработке конструкции, выработанные по результатам оптимизации конструкции блока, подтвердили свою корректность при проведении опыта на взрывном удар-

ном стенде. Прибор сохранил свою работоспособность после проведения испытаний, конструкционная прочность обеспечена (рис. 9). Как видно из рисунков, механическая целостность корпуса сохранена и конструкционная прочность обеспечена.

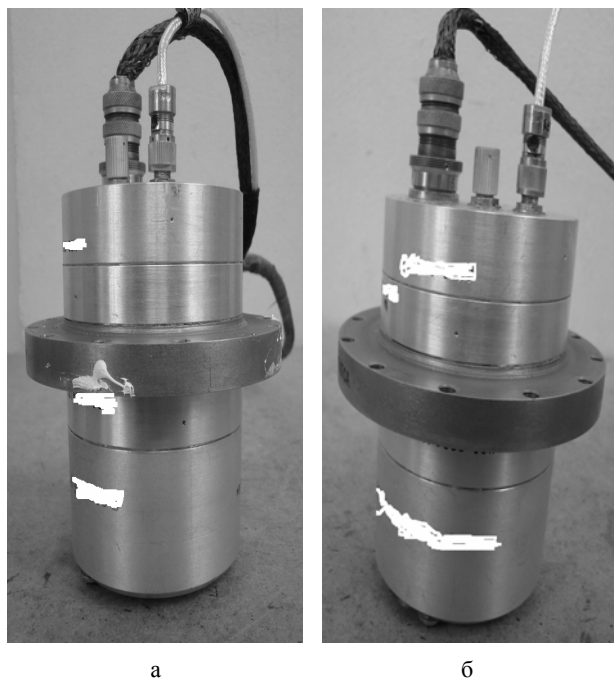


Рис. 9. Результаты испытаний «оптимизированного» прибора: а – до испытаний; б – после испытаний

Литература

1. А. с. № 1609431 РФ МПК H05 K5/00, 5/06. Радиоэлектронный блок / В. С. Сысоев, Ю. С. Румянцев, В. Е. Костюков, Р. И. Ковалев. Заявлено 29.04.1988. Опубликовано 10.01.1996.
2. ОСТ В95 2376-83. Пенопласт ППУ-305А. Типовой технологический процесс заливки.
3. ОСТ В95 2371-83. Компаунд эпоксидный ЭК-34. Типовой технологический процесс заливки и обволакивания.