

На правах рукописи

БЕЛОВ ДМИТРИЙ ИГОРЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРОЗАЩИЩЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫМИ
КОМПАУНДАМИ КОНСТРУКЦИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Специальность 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2012

Работа выполнена на кафедре конструирования и технологии радиоэлектронных средств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Талицкий Евгений Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники и радиосистем ВлГУ
Поздняков Александр Дмитриевич

кандидат технических наук
начальник сектора открытого акционерного общества «Владимирское конструкторское бюро радиосвязи»
Зеленов Дмитрий Юрьевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования « Пензенский государственный университет » (г. Пенза)

Защита диссертации состоится «20» ноября 2012 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ауд. 301-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Автореферат разослан 12 октября 2012 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу совета университета: 600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ, ученому секретарю диссертационного совета Д212.025.04.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Радиотехнические устройства (РТУ), устанавливаемые на подвижных объектах, во время эксплуатации подвергаются дестабилизирующим механическим воздействиям, к которым относятся вибрация, удары, линейные ускорения и акустические шумы.

Для радиотехнических устройств специального назначения, большую опасность представляют одиночные механические удары, максимальные ускорения которых могут достигать 100000g. Это приводит к нарушению функционирования и отказам аппаратуры за счет механических деформаций и разрушений. Задачей разработчиков при этом является защита конструкции РТУ от механических повреждений и электрорадиоэлементов (ЭРЭ) от перегрузок. Если отказы изделия проявляются во время испытаний, то это приводит к увеличению затрат и времени на разработку изделия, так как приходится выявлять причины отказов и вносить конструктивные изменения в изделие. Поэтому на этапе проектирования целесообразно проводить специальные исследовательские испытания для оценки ударопрочности и удароустойчивости устройств, на основе их динамических характеристик (механических напряжений и ускорений). На основании таких данных могут приниматься решения об использовании мер для ударозащиты устройства.

Работы по теоретическим и практическим исследованиям ударных нагрузок и ударозащите РТУ проводятся в США, Германии, Японии и других странах мира. Наиболее известны в этой области труды таких зарубежных исследователей как Harris С.М., Piersol А.Г. и другие. В России эти вопросы рассматриваются в работах Чаломея В.Н., Ильинского В.С., Батуева Г.С., Федосова А.А., Самсонова Л.М. и других авторов.

Часто используемым способом защиты РТУ от ударных воздействий является заливка его электронных компонентов полимерными компаундами. Однако принципы выбора заливочных материалов в настоящее время недостаточно разработаны. Неправильный выбор полимерного материала может приводить к негативным последствиям (механическое разрушение самого компаунда, увеличению перегрузок, действующих на элементы конструкции). Применяемые компаунды должны обладать стабильностью их механических свойств во всем температурном диапазоне эксплуатации изделия. Подбор заливочных материалов опытным путем требует значительного времени и материальных затрат на изготовление макетов и их испытания. К тому же, при таком подходе остаются невыясненными требования к физико-механическим свойствам компаунда.

Определение динамических характеристик конструкций путем испытаний напрямую зависит от характеристик ударных стендов, которые ограничиваются воспроизведением ударных воздействий лишь типовых форм (полуволна синусоиды, трапеция и пила) и не обеспечивают воспроизведение импульсов необходимой длительности с пиковым ускорением свыше 10000g. В реальных условиях эксплуатации, на РТУ воздействуют ударные импульсы сложных форм, характеристики которых

могут превышать возможности испытательного оборудования. Поэтому для данной задачи целесообразно использовать методы математического моделирования конструкций. Таким образом, исследование конструкций ударозащищенных полимерными компаундами при ударных воздействиях различных форм и характеристик на этапе проектирования составляет одну из важнейших задач для разработчиков РТУ специального назначения.

Системы инженерного анализа можно разделить на универсальные и специализированные. Среди универсальных СИА можно выделить систему конечно – элементного анализа ANSYS. Данная система обладает широкими возможностями в области проведения механических расчетов, однако она не предназначена в явном виде для расчета конструкций РТУ при ударных воздействиях с использованием полимерных материалов. Поэтому для моделирования таких устройств часто применяют специализированные программные средства, обладающие интерфейсом с радиоконструкторской терминологией.

Среди специализированных СИА радиотехнических устройств наиболее известной является АСОНИКА. С её помощью можно рассчитывать поля перемещений, ускорений и напряжений, а также в контрольных точках - графики ускорений и перемещений несущих конструкций устройств от времени. К достоинствам данной системы можно отнести возможность учета при расчетах взаимного влияния тепловых и механических факторов, в наличии единого виртуального макета изделия, импорта его из СИА печатных плат и в возможности анализа конструкций при воздействии одиночных и многократных ударов. Однако в данной системе не предусмотрена возможность моделирования заливки конструкций полимерными компаундами, а также использования нелинейных моделей поведения материалов. Динамические характеристики рассчитываются в контрольных точках, задаваемых на этапе создания модели, что снижает возможности анализа конструкций после проведения расчета. Также нет возможности выводить график изменения механического напряжения конструкций от времени.

Во Владимирском государственном университете на кафедре конструирования и технологии радиоэлектронных средств разработан «Комплекс программ» анализа механических воздействий на радиоэлектронную аппаратуру (далее – «Комплекс программ»). Достоинствами данной системы является удобный интерфейс с радиоконструкторской терминологией, а также то, что расчеты производятся методом конечных элементов с помощью математического решателя ANSYS. Однако «Комплекс программ» не позволяет решать вопросы, связанные с расчетом динамических характеристик конструкций РТУ при ударных воздействиях и определением механических характеристик полимерных компаундов необходимых для ударозащиты.

Таким образом, задача развития методик исследования и защиты радиотехнических устройств, которые подвергаются интенсивным ударным воздействиям в процессе эксплуатации, является актуальной.

Целью настоящей работы является развитие методик конструирования радиотехнических устройств, которые подвергаются интенсивным ударным воздействиям в процессе эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбрать метод расчета конструкций РТУ при воздействии интенсивных ударных нагрузок;

- уточнить методику моделирования конструкций в СКЭА ANSYS, с целью получения возможности проведения их исследований при воздействии ударных импульсов произвольных форм;

- расширить возможности «Комплекса программ» путем создания программной среды моделирования конструкций РТУ при ударных воздействиях, позволяющей рассчитывать конструкции, залитые полимерными компаундами;

- разработать методику определения требований к механическим характеристикам полимерных компаундов, способных обеспечить ударозащиту конструкций РТУ.

Объектом исследования являются конструкции радиотехнических устройств, которые подвергаются интенсивным ударным воздействиям в процессе эксплуатации.

Предметом исследования является развитие методик конструирования радиотехнических устройств.

Методы исследований основаны на методах вычислительной математики и механики, теории алгоритмов и динамической теории полимеров.

Научная новизна работы:

1. Уточнена методика моделирования конструкций в системе конечно-элементного анализа ANSYS, в результате чего становится возможным их исследование при воздействии одиночных ударных импульсов произвольных форм;

2. Разработан алгоритм работы специализированной программной среды моделирования конструкций радиотехнических устройств при ударных воздействиях, отличающийся от существующих возможностью исследования конструкций, залитых полимерными компаундами;

3. Предложена методика определения требований к механическим характеристикам полимерных компаундов, способных обеспечить ударозащиту конструкций РТУ.

Практическая значимость:

1. Предложенные в работе методики и алгоритмы были практически реализованы в виде специализированной программной среды моделирования конструкций РТУ при ударных воздействиях, интегрированной с «Комплексом программ» и СКЭА ANSYS, которая позволяет:

- определять динамические характеристики (ускорения и напряжения) конструкций при воздействии одиночных ударных импульсов различных форм и характеристик;

- определять требования к механическим характеристикам (модуль упругости и коэффициент механических потерь) полимерных компаундов, способных обеспечить ударозащиту изделий.

2. Программная среда моделирования конструкций РТУ при ударных воздействиях может применяться в проектных организациях, занимающихся разработкой устройств специального назначения, используемых в условиях интенсивных ударных нагрузок.

Реализация и внедрения результатов работы.

Результаты диссертационной работы используются в НПП «Дельта» г. Москва, в учебном процессе кафедры «Конструирование и технология радиоэлектронных средств» Владимирского государственного университета, а также при выполнении госбюджетной НИР №427/08 «Исследование методов защиты электронных средств от механических воздействий».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на научных конференциях: «Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике» (Новочеркасск, 2008 и 2009), «Инновационные технологии в проектировании и производстве» (Пенза, 2011), «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (Владимир-Суздаль, 2011). Получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ: №2010612028, 17.03.2010.

Публикации по работе. По материалам диссертационных исследований опубликовано 7 научных работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикаций результатов кандидатских диссертаций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из перечня используемых сокращений, введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и 6 приложений. Общий объем диссертации 150 страниц, в том числе 107 страниц основного текста, иллюстрированных 47 рисунками и 7 таблицами, 12 страниц списка литературы, а также шести приложений на 30 стр.

На защиту выносятся:

- уточненная методика моделирования конструкций при ударном воздействии в СКЭА ANSYS;

- алгоритм работы программной среды моделирования конструкций РТУ при ударных воздействиях;

- методика определения требований к механическим характеристикам полимерных компаундов, способных обеспечить ударозащиту конструкций РТУ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи исследований, научная новизна и практическая значимость результатов диссертации.

В первой главе выбирается метод расчета динамических характеристик (ускорения и механические напряжения) конструкций РТУ при воздействии одиночных ударов с высокой амплитудой ускорения. Рассматривается заливка конструкций РТУ полимерными компаундами как способ их ударозащиты, приводится методика моделирования конструкций при воздействии ударных нагрузок в СКЭА ANSYS, а также уточняются практические аспекты такого моделирования.

Анализ литературы по теме исследования показал, что радиотехнические устройства специального назначения в процессе своей эксплуатации подвергаются одиночным ударным воздействиям, максимальные ускорения которых могут достигать 100000 g.

Механические повреждения в конструкции РТУ происходят вследствие превышения допустимых напряжений конструкционных материалов при ударном воздействии. При этом ударная нагрузка, действующая на ЭРЭ, может увеличиваться по сравнению с нагрузкой, действующей на изделие в целом в результате проявления резонансных явлений. Таким образом, снижение значений ускорений и напряжений в конструкциях РТУ до необходимого уровня (ускорения в конструктивных элементах не должны увеличиваться по сравнению с амплитудой ударного воздействия, а механические напряжения не должны превышать предел прочности соответствующих конструкционных материалов) является главным условием обеспечения их ударозащиты.

Часто используемым способом защиты РТУ от ударных воздействий является заливка электронных компонентов полимерными компаундами. Существующие методики выбора заливочных материалов для конкретных конструкций не достаточно разработаны и часто, конструктор не владеет информацией по необходимым жесткостным и демпфирующим свойствам полимеров. Применяемые материалы также должны обладать стабильностью их механических свойств во всем температурном диапазоне эксплуатации изделия. Подбор необходимого компаунда опытным путем требует значительного времени и материальных затрат на изготовление макетов и их испытания. Поэтому целесообразно разработать методику определения требований к механическим характеристикам полимерных компаундов, способных обеспечить ударозащиту РТУ.

В связи с тем, что сроки разработки радиотехнических устройств могут значительно увеличиваться в случае проявления отказов при контрольных испытаниях, на этапе проектирования целесообразно проводить специальные исследования. Их целью является определение динамических характеристик (ускорений и механических напряжений) разрабатываемых конструкций, на основе которых оценивается ударопрочность, перегрузки, а также принимаются решения по применению мер для ударозащиты. Обзор

характеристик современных ударных стендов показал, что с их помощью нельзя воспроизводить ударные импульсы сложных форм с необходимой длительностью с амплитудой ускорения выше 10000g. Поэтому, для данной цели, было предложено использовать системы инженерного анализа, в которых используются математические методы расчета конструкций под воздействием ударных нагрузок.

Среди специализированных программных средств наиболее известна АСОНИКА, обладающая хорошим интерфейсом и продуманной структурой. Однако в данной системе не предусмотрена возможность моделирования заливки конструкций РТУ полимерными компаундами, а также использования нелинейных моделей поведения материалов. Ускорения и механические напряжения рассчитываются в контрольных точках, задаваемых на этапе создания модели, что снижает возможности анализа конструкций.

Наиболее подходящей универсальной СИА, для решения поставленных в диссертационной работе задач, является система конечно-элементного анализа (СКЭА) ANSYS. К достоинствам данной системы стоит отнести высокую степень интеграции с другими программными продуктами, участвующими в процессе разработки РТУ, а также наличие алгоритмического языка программирования APDL. С его помощью можно создавать специализированные пользовательские приложения.

При решении динамических задач в данной системе используется общая система движений конструкции:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\},$$

где $F(t)$ – вектор нагрузки, $[M]$ – матрица масс, $[C]$ – матрица сопротивлений, $[K]$ – матрица жесткости системы, $\{u\}$ – вектор узловых перемещений, $\{\dot{u}\}$ – вектор узловых скоростей, $\{\ddot{u}\}$ – вектор узловых ускорений.

К основным недостаткам применения ANSYS в конструировании радиотехнических устройств, следует отнести то, что нет возможности напрямую моделировать ударные импульсы сложных форм, а также отсутствуют базы данных типовых конструкций и материалов, которые часто применяются при разработке и производстве РТУ.

Возможным решением данных проблем является создание специализированной программной среды для математического решателя ANSYS. Это позволит рассчитывать различные конструкции с помощью универсальной системы конечно-элементного анализа, используя сторонний графический интерфейс с радиоконструкторской терминологией.

Примером такого подхода является «Комплекс программ», разрабатываемый во Владимирском Государственном Университете, предназначенный для анализа механических воздействий на радиоэлектронную аппаратуру. Предлагается расширить его возможности, путем создания программной среды моделирования конструкций РТУ при ударных воздействиях.

Для создания такого программного средства была составлена методика

расчета динамических характеристик конструкций при ударном воздействии в СКЭА ANSYS, на основе анализа справочной литературы. Одной из главных сложностей для конструктора, при её практическом применении, является моделирование ударного воздействия. Ударный импульс в технических заданиях на РТУ приводится в виде графика зависимости ускорений от времени, в то время как в ANSYS он определяется в единицах перемещения. Задание импульса в виде функции перемещения позволяет получать решения лишь во временной области, соответствующей длительности удара, в то время как большое значение имеет анализ системы и после прекращения действия нагрузки. Поэтому ударное воздействие необходимо определять в виде дискретных значений импульса перемещения. В случае, когда исходный импульс ускорения имеет произвольную форму, процесс его определения в СКЭА ANSYS “напрямую” становится крайне сложной задачей. Поэтому целесообразно создать специальный программный модуль для моделирования ударных воздействий произвольных форм.

В данной методике были выделены и уточнены практические аспекты моделирования, от которых зависит время и точность проводимого расчета. Предлагается использовать тип конечных элементов Solid95, а конечно-элементную сетку строить методом “свободного разбиения”. Учет демпфирующих свойств материалов осуществляется с помощью специального коэффициента β , который предлагается рассчитывать по формуле:

$$\beta_j = \frac{\eta}{2 \pi f_j},$$

где η - коэффициент механических потерь материала, f - первая собственная частота колебания конструктивного элемента, который выполнен из данного материала. Из сравнения трех возможных методов решения (полный, редуцированный и метод суперпозиций) динамических задач в СКЭА ANSYS был выбран “полный” метод, так как только он обеспечивает учет всех видов нелинейностей.

Сформулированы цель работы и задачи, необходимые для достижения поставленной цели.

Вторая глава посвящена созданию специализированной программной среды, с помощью которой реализуется методика моделирования конструкций РТУ при ударных воздействиях в СКЭА ANSYS. Разрабатывается структура и алгоритм её работы, на основе которых строится программная реализация. Предлагается методика для определения требований к механическим характеристикам полимерных компаундов, способных обеспечить ударозащиту конструкций РТУ.

Для моделирования ударных воздействий произвольных форм и характеристик в СКЭА ANSYS был разработан специальный программный модуль. С его помощью было исследовано влияние величины дискретизации (“точности”) ударного воздействия на результаты расчета типовых

конструкций. Результаты данного исследования показали, что отклик объектов на удар становился неизменным (по форме, амплитуде и периоду колебания) при задании ударного воздействия с помощью 5000 значений перемещений и более. Данную величину дискретизации ударного импульса рекомендуется использовать для моделирования подобных конструкций и использовать в качестве “базовой” для конструкций других форм.

На основании предложений и рекомендаций, изложенных в первой главе, была уточнена методика расчета динамических характеристик конструкций (ускорений и напряжений) при ударном воздействии в СКЭА ANSYS. Схема данной методики представлена на рисунке 1.

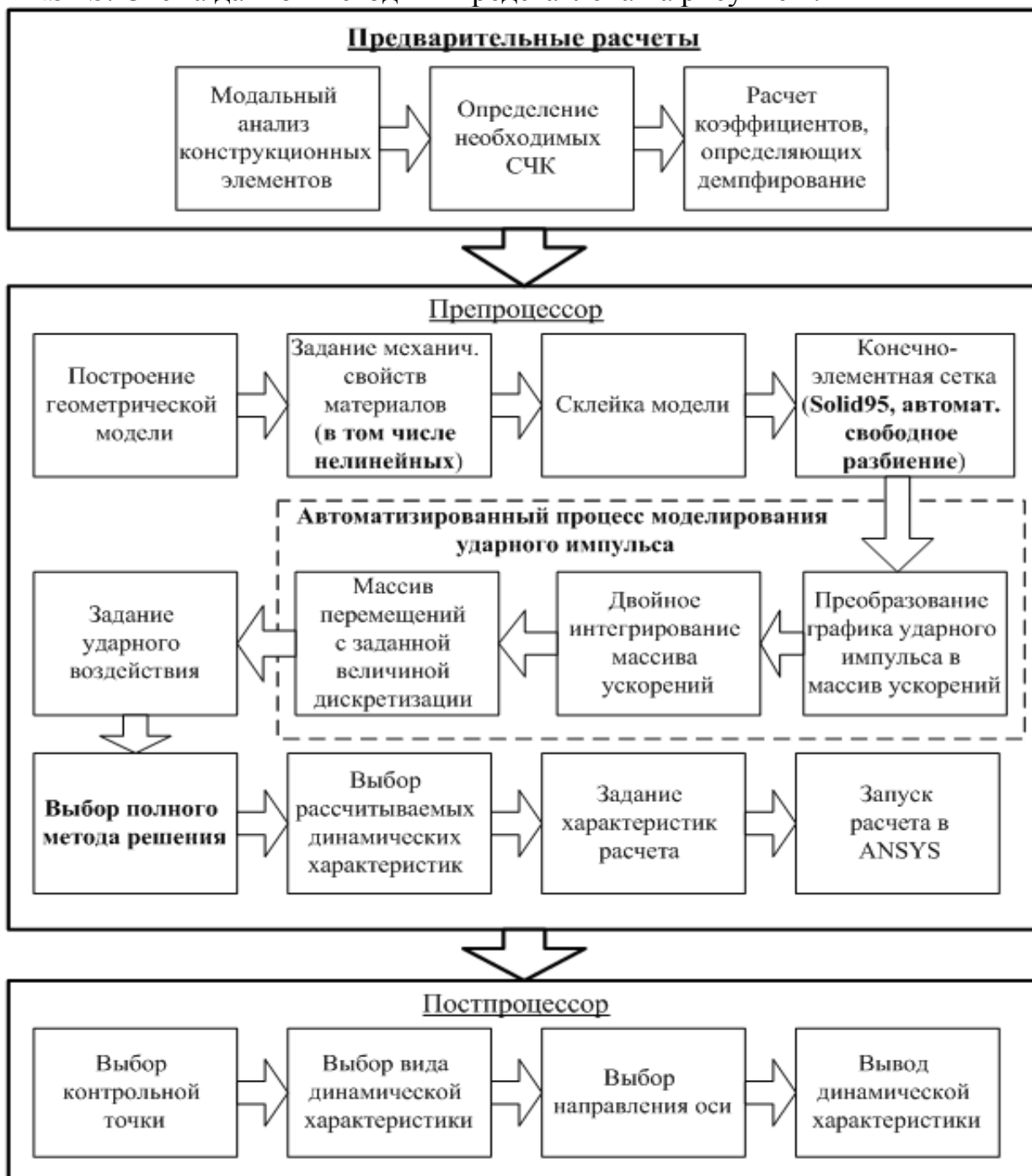


Рис. 1. Методика расчета динамических характеристик конструкций при ударном воздействии в СКЭА ANSYS.

В приведенной схеме присутствует блок предварительных расчетов, с помощью которых определяются коэффициенты демпфирования конструктивных элементов РТУ и количество шагов расчета. Моделирование осуществляется с использованием конечных элементов типа Solid95, а сетку конечных элементов предлагается строить с помощью функции автоматического свободного разбиения модели. Полностью автоматизируется процесс моделирования ударного воздействия с определенным уровнем дискретизации импульса ускорения.

Оценка результатов, получаемых при моделировании согласно предлагаемой методике, проверялась на основе расчета простейшей системы, состоящей из упругого и инерционного элемента, при воздействии удара в форме полуволны синусоиды, для которой известна аналитическая модель. Выражение для определения максимального отклика системы на удар:

$$A_{\max} = \left[\frac{A\omega p}{(p^2 - \omega^2)} \right] \sqrt{2(1 + \cos \omega t_u)},$$

где A_{\max} - максимальное ускорение системы, A - амплитуда ускорения ударного импульса, t_u - длительность импульса, $p = \frac{\pi}{t_u}$, $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (k - жесткость системы, m - масса системы).

Расхождение результатов моделирования с результатами аналитического расчета составило не более 9%, что показывает применимость предложенной методики. Её основное отличие от существующих методик заключается в возможности исследования конструкций при воздействии ударных импульсов произвольных форм.

Структура работы программной среды моделирования конструкций РТУ при ударных воздействиях, интегрированной с «Комплексом программ» и СКЭА ANSYS, представлена на рисунке 2. Для её практической реализации были созданы:

- графический интерфейс, осуществляющий функции препроцессора и постпроцессора;
- командные файлы на алгоритмическом языке *APDL* построения конечно-элементных моделей, задания граничных условий, расчета и вывода результатов;
- программный модуль для моделирования ударных импульсов произвольных форм;
- базы данных моделей типовых конструкций РТУ и материалов.

Исходными данными, необходимыми для начала работы с программой являются геометрические параметры исследуемой конструкции, механические параметры используемых материалов, а также параметры ударного воздействия. В диалоговом окне «Ввод импульса» происходит моделирование ударного импульса произвольной формы и характеристик. В диалоговом окне «Динамический анализ» пользователь работает с созданной базой типовых конструкций. Запуск ANSYS производится в пакетном, фоновом режиме с командным файлом, формируемым программой.

Полученные в результате расчета динамические характеристики конструкции (ускорения и напряжения) выводятся пользователю в собственном графическом интерфейсе, либо в программе *Microsoft Office Excel*.

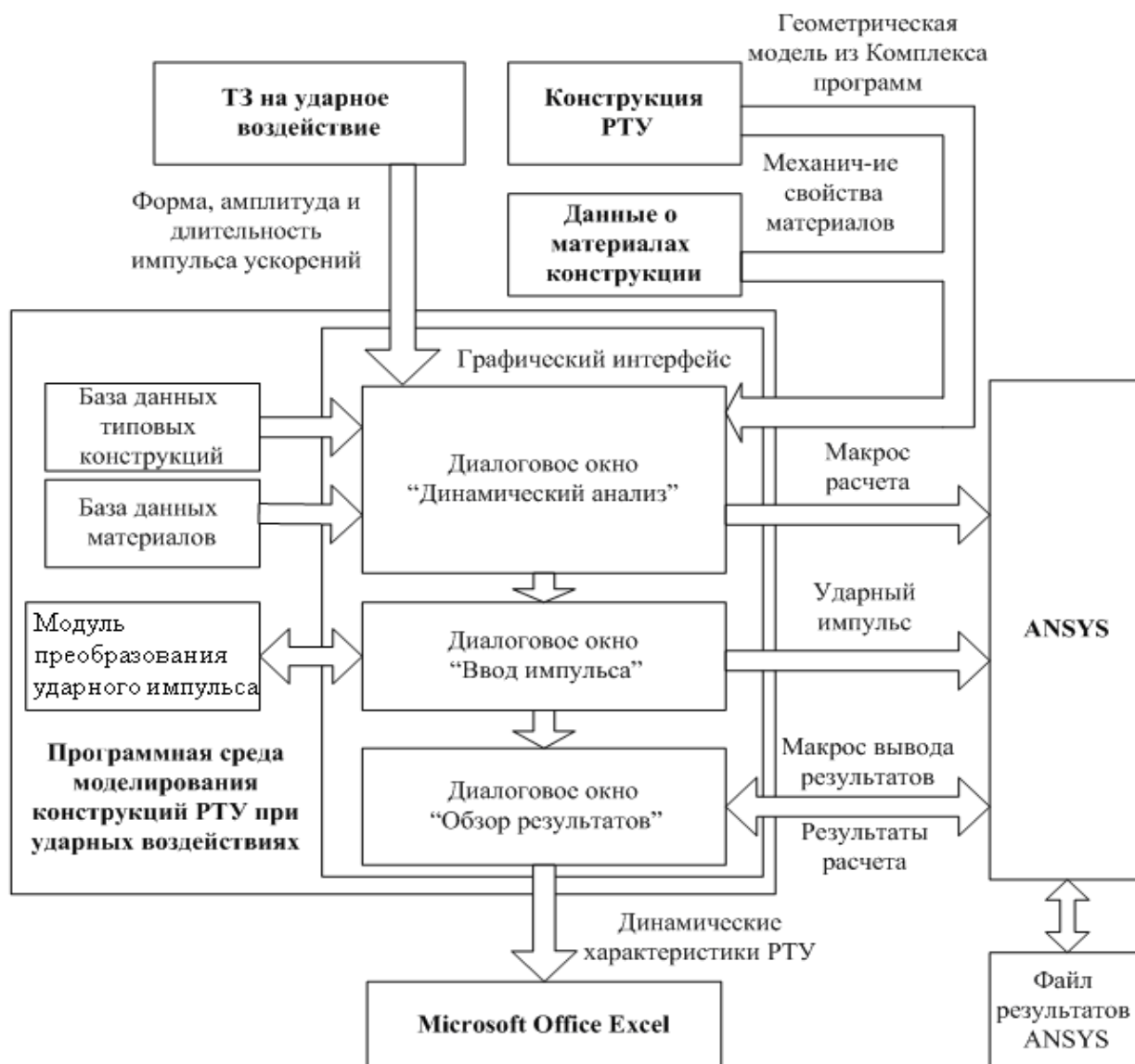


Рис. 2. Структура программной среды моделирования конструкций РТУ при ударных воздействиях.

В качестве типовых конструкций, в программной среде используются шесть видов блоков (этажерочные, цилиндрические и кассетные с произвольным количеством печатных плат и мест креплений). Так же есть возможность моделировать ячейки РТУ, формируемые в графическом дизайнера «Комплекса программ». В случае, когда необходимо исследовать конструкцию более сложной формы, моделирование необходимо осуществлять непосредственно в СКЭА ANSYS, согласно уточненной методике. При этом моделирование ударного воздействия рекомендуется проводить в разработанном программном модуле.

Алгоритм работы специализированной программной среды моделирования конструкций РТУ при ударных воздействиях представлен на рисунке 3. Формирование виртуальной модели исследуемой РТУ происходит

на основе информации введенной конструктором. Это вид (типовой блок из базы данных, либо узел РТУ, сформированный посредством графического дизайнера «Комплекса программ»), а также геометрические параметры конструкции (блок 1-3). Далее, конструктор решает вопрос о применении средств ударозащиты (блок 4-7). Заливка конструкции полимерным компаундом (блок 6) представляет собой заполнение свободного пространства внутри модели материалом с заданными свойствами. Данная процедура осуществляется с помощью специально разработанного алгоритма. В блоках 8-10 задаются параметры конструкционных материалов, включая параметры их нелинейных свойств. После этого создается сетка конечных элементов (блок 11, 12). Далее, на основе данных об ударном воздействии выполняется расчет эффективного частотного спектра (блок 12, 13). С помощью полученной информации находятся необходимые СЧК конструкционных элементов модели и вычисляются их демпфирующие свойства (блок 15-17). Следующим этапом работы программы является задание граничных условий, то есть приложение ударного воздействия к исследуемой конструкции (блок 18). После этого, на основе всех полученных данных формируется командный файл (блок 19), который загружается в СКЭА ANSYS (блок 20). На данном этапе работы программы – это командный файл расчета исследуемой модели РТУ с заданными граничными условиями. После завершения расчета в СКЭА ANSYS, вводятся данные об анализируемой динамической характеристике конструкции (блоки 24). Это координаты контрольной точки, вид динамической характеристики, а также направление данной характеристики. Далее формируются соответствующие командные файлы для получения запрошенной пользователем информации, который загружается в ANSYS (блок 19). В результате ANSYS формирует массив данных на основании, которого создается график динамической характеристики в контрольной точке конструкции РТУ (блок 23). После этого, пользователь может завершить работу либо произвести следующий расчет (блок 25).

Программная реализация графической оболочки произведена на языке FreePascal с использованием среды разработки программного обеспечения Lazarus, командные файлы для проведения расчетов составлены на функциональном языке APDL (ANSYS версий 8.0, 8.1, 10.0, 11.0).

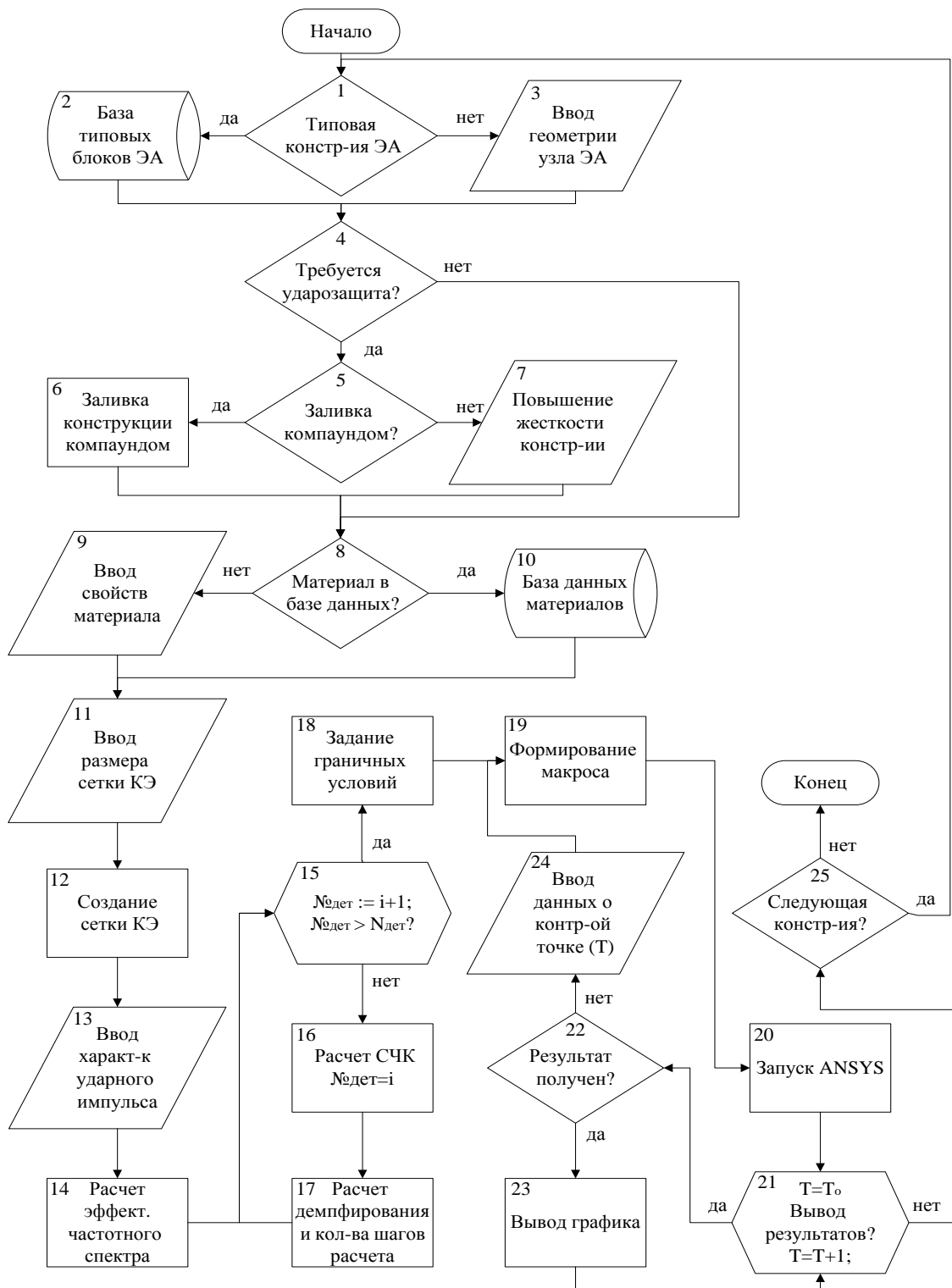


Рис. 3. Алгоритм работы специализированной программной среды моделирования конструкций РТУ при ударных воздействиях.

Автоматическое определение требований к механическим характеристикам (модуль упругости и КМП) полимерных компаундов, способных обеспечить ударозащиту конструкций РТУ, предлагается осуществлять по методике, представленном на рисунке 4.

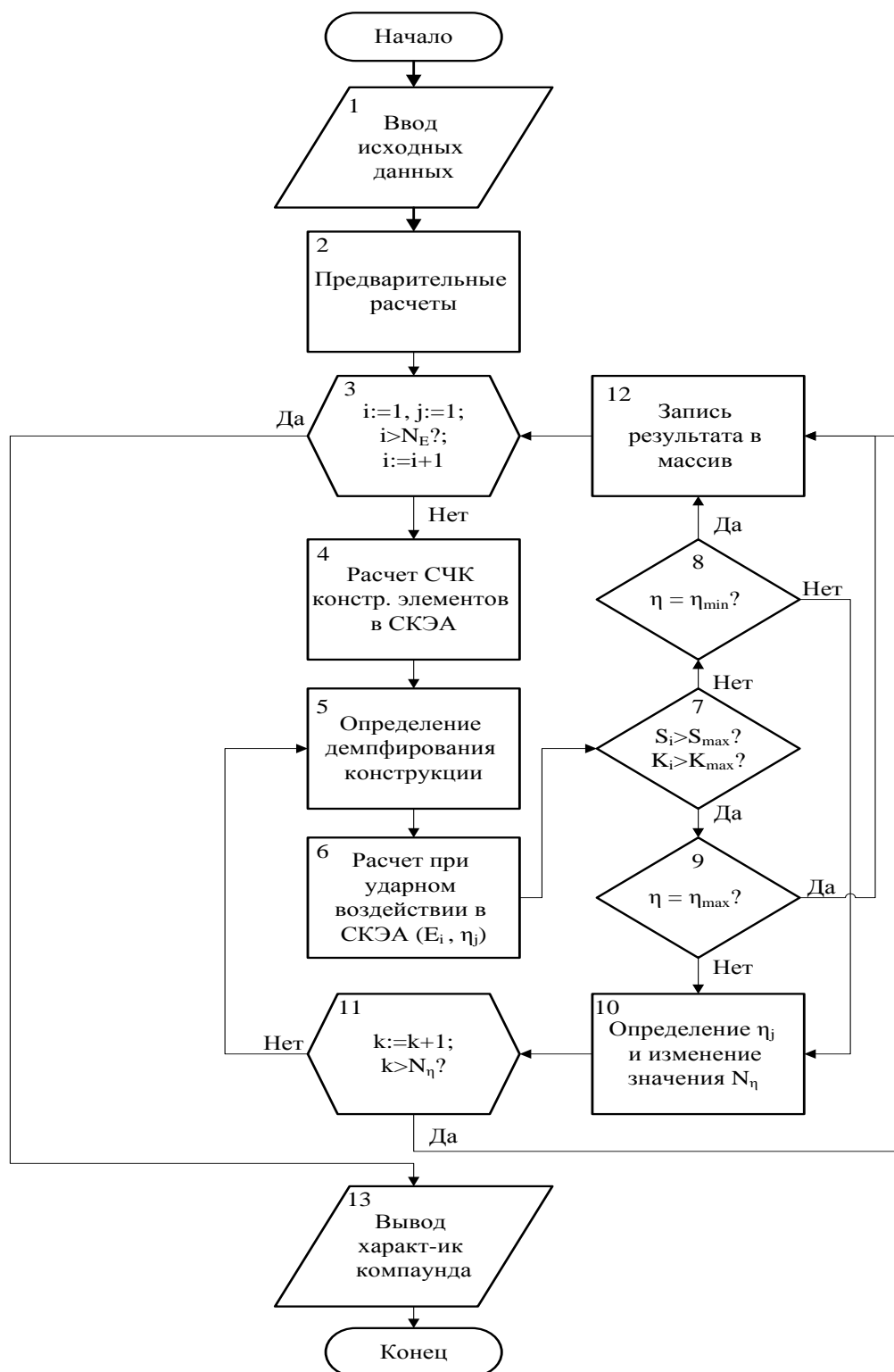


Рис. 4. Методика определения механических характеристик полимерных компаундов, способных обеспечить ударозащиту конструкции РТУ.

Данная методика основана на итерационном вычислении конструкций в СКЭА ANSYS. Условием защиты от удара является получение заданного коэффициента передачи конструкции при ударе (K) и допустимого механического напряжения. Коэффициент передачи определяется как отношение максимального значения ускорения в конструкции к амплитуде

ускорения ударного импульса.

Расчеты происходят в два этапа: при изменении модуля упругости компаунда и при изменении его КМП. Благодаря тому, что часть промежуточных вычислений (расчет демпфирующих свойств конструктивных элементов) автоматизирована и применению метода последовательного приближения, уменьшается общее число итераций.

Данная методика позволяет конструктору определить жесткостные и демпфирующие свойства полимерных компаундов, необходимых для ударозащиты РТУ, или принять решение об изменении конструкции изделия.

Таким образом, разработанная программная среда моделирования позволяет определять динамические характеристики конструкций РТУ при ударных воздействиях произвольных форм и характеристик. На основании результатов проводимых в ней расчетов разработчик РТУ получает возможность определять механические характеристики полимерных компаундов, необходимых для ударозащиты устройства.

В третьей главе проводится тестирование разработанной программной среды моделирования конструкций РТУ при ударных воздействиях на основе экспериментальных исследований типового блока. Исследуется влияние механических характеристик полимерных компаундов на динамические характеристики конструкций РТУ, а также зависимость отклика конструкции от формы ударного импульса. Проводится исследование влияния температуры на модуль упругости и коэффициент механических потерь опытного полимерного материала.

Тестирование разработанной программы проводилось на примере блока, представленного на рисунке 5. Для этого был проведен ряд натурных испытаний данной конструкции при воздействии одиночных ударных импульсов, результаты которых сравнивались с результатами расчетов в разработанной программной среде моделирования.

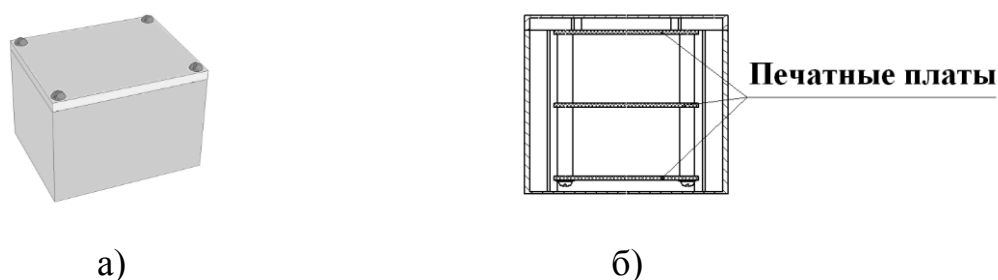


Рис. 5. Анализируемый блок: а) внешний вид; б) схема конструкции.

В результате были получены отклики исследуемого блока на удар в виде зависимостей ускорения от времени, полученные экспериментально и с помощью конечно-элементного моделирования. При этом, реакцией конструкции на внешнее воздействие в обоих случаях было затухающее колебание с приблизительно одинаковой частотой и скоростью затухания. Амплитуды данных колебаний различались не более чем на 16%.

Далее, с помощью предложенной во второй главе методики, были определены механические характеристики полимерных компаундов (модуль упругости и коэффициент механических потерь), необходимые для

ударозащиты приведенной выше конструкции блока. Условием ударозащиты являлось получение коэффициента передачи конструкции равного 1.25, при этом максимально возможное механическое напряжение было определено как $4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$.

В результате серии проведенных расчетов было определено, что указанное условие ударозащиты выполняется при использовании компаунда с модулем упругости от $8 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ до 10^9 Н/м^2 и КМП от 0.1 и выше. На рисунке 6 представлены результаты всех приведенных в данном исследовании расчетов в виде графика зависимости максимального ускорения (A) в печатной плате от модуля упругости (E) полимерного компаунда.

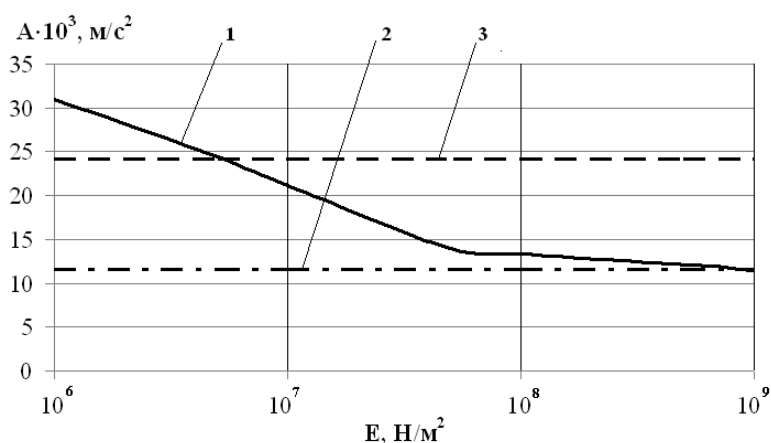


Рис. 6. Изменение амплитуды ускорения конструкции при ударном воздействии: 1 – при заливке конструкции компаундами с различными модулями упругости; 2 – амплитуда исходного ударного импульса; 3 – амплитуда ускорения конструкции без компаунда.

Аналогичное исследование конструкции сложной формы также показало, что возникающие в результате одиночного удара перегрузки можно снижать, применяя заливку полимерным компаундом. При этом моделирование конструкции проводилось с использованием ударных импульсов как типовых (полуволна синусоиды, трапеция), так и произвольных форм.

Было выполнено моделирование ячейки РТУ при воздействии ударного импульса сложной формы (рис.7). Его результаты показали, что поле распределения ускорений и механических напряжений напрямую зависит от варианта крепления конструкции. Такого рода исследования показывают, какие ЭРЭ оказываются в зоне наибольших механических нагрузок. На основании таких данных может производиться компоновка элементов на электромонтажной плате или приниматься решения об их заливке полимерными материалами.

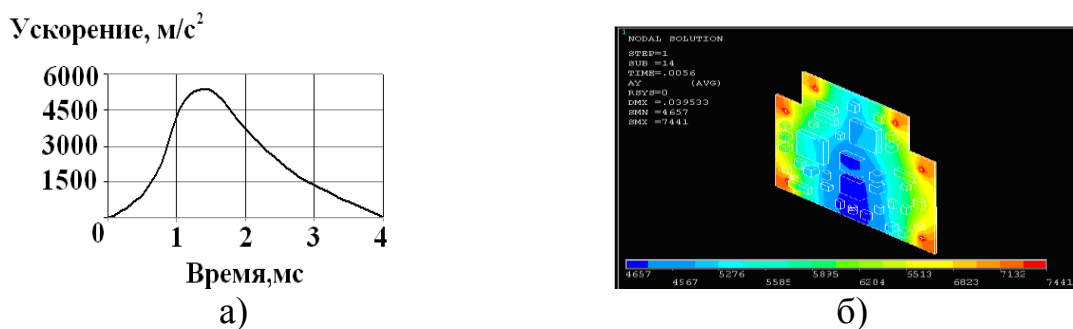


Рис.7. Исследование ячейки РТУ: а) ударный импульс; б) поле распределения ускорений.

Были проведены испытания опытного материала на основе пенополиуретана, в результате которых определялись зависимости его модуля упругости и коэффициента механических потерь от температуры. Испытания проводились методом резонансных колебаний. Результаты показали, что опытный материал имеет модуль упругости, необходимый для защиты ранее исследованного блока от ударных воздействий, в диапазоне температур от $-25^{\circ}C$ до $+30^{\circ}C$. Это определяет необходимость дальнейшей разработки полимерных материалов для ударозащиты РТУ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Результаты диссертационной работы:

1. Рассмотрены методы расчета динамических характеристик (ускорений и напряжений) конструкций радиотехнических устройств при ударных воздействиях и системы инженерного анализа на их основе. Показана необходимость расширения функциональных возможностей «Комплекса программ» для решения поставленных задач.

2. Уточнена методика моделирования конструкций в СКЭА ANSYS, в результате чего появилась возможность проведения их исследований при воздействии ударных импульсов произвольных форм;

3. Расширены возможности «Комплекса программ» путем создания специализированной программной среды моделирования конструкций радиотехнических устройств при ударных воздействиях. Она позволяет:

- рассчитывать динамические характеристики конструкций радиотехнических устройств при ударных воздействиях различных форм и характеристик;

- автоматически определять механические характеристики полимерных компаундов необходимые для ударозащиты конструкций радиотехнических устройств;

«Комплекс программ» внедрен в НИИ «Дельта» г. Москва, а также в учебный процесс кафедры «Конструирование и технология радиоэлектронных средств» Владимирского государственного университета.

Использование разработанной специализированной программной среды моделирования конструкций радиотехнических устройств при ударных воздействиях, позволяет сократить количество натуральных испытаний изделий.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях по перечню ВАК:

1. Белов Д.И. Иванов А.В., Кузин В.Н., Куфтин А.А., Шашкин А.Н. Моделирование ударных процессов в электронной аппаратуре с помощью системы конечно-элементного анализа ANSYS // Всероссийский НТЖ «Проектирование и технология электронных средств». – 2009. – №1. (соискатель – 50%).

2. Белов Д.И., Шумарин С.В., Талицкий Е.Н. Программа моделирования электронной аппаратуры при ударных воздействиях // Международный журнал «Программные продукты и системы». – 2011. - №3 . (соискатель – 50%).

Публикации в остальных изданиях:

3. Евграфов В.В., Шумарин С.В., Белов Д.И. Моделирование воздействия импульса ускорения в системах конечно-элементного анализа // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: Международная научно-практическая конференция. – Новочеркасск, 2008.

4. Белов Д.И. Динамический анализ конструкций электронной аппаратуры в системе конечно-элементного анализа “Ansys” // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: Международная научно-практическая конференция. – Новочеркасск, 2009.

5. Белов Д.И. Моделирование электронной аппаратуры в условиях интенсивных ударных воздействий в системе конечно-элементного анализа ANSYS // Тезисы докладов 2-ой международной конференции / молодежной школы-семинара «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства», 2010.

6. Белов Д.И. Защита электронной аппаратуры от интенсивных ударных воздействий // Надежность и качество 2011: научный симпозиум. - Пенза, 2011.

7. Белов Д.И. Защита электронной аппаратуры от интенсивных ударных воздействий с помощью полимерных компаундов // Перспективные технологии в средствах передачи информации: международная научно-техническая конференция. – Владимир, 2011.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

8. Белов Д.И., Талицкий Е.Н., Шумарин С.В. Программа моделирования ударопрочности и удароустойчивости конструкций электронной аппаратуры // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2010612028, 17.03.2010. (соискатель – 30%).

Подписано в печать 10.10.2012
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз.

Издательство
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.