

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОНСТРУКЦИЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

А. С. Ваченко, канд. техн. наук  
ОАО "Завсд им. В. А. Дегтярёва", г. Ковров, Московская обл., Россия

Ю. Н. Кофанов, д-р техн. наук  
Московский государственный институт электроники и математики  
(технический университет), Москва, Россия

С. Ю. Сотникова  
АНО "Академия надежности", Москва, Россия

*Рассмотрена проблема моделирования механических процессов в конструкциях радиоэлектронных средств. Предполагается, что основную сложность при моделировании составляет процесс построения конечно-элементных моделей механических процессов. Выполнен обзор существующих технологий построения сборных моделей. Предложена более совершенная схема технологии, эффективность которой показана на практическом примере.*

**Ключевые слова:** конструкции радиоэлектронных средств, моделирование, механическое воздействие, технология построения модели, собственные частоты, гармоническая вибрация, синтез и анализ проектных решений, АСОНИКА, САЕ-система, демпфирование.

Конструкции радиоэлектронных средств (РЭС) в условиях эксплуатации подвержены интенсивным механическим воздействиям, таким как гармоническая и случайная вибрация в широком интервале частот, ударные воздействия, линейные ускорения и акустические шумы. Выявление отказов конструкций РЭС, связанных с механическим воздействием, происходит на завершающих этапах проектирования, и их устранение приводит к доработке конструкции, что вызывает увеличение сроков и затрат на проектирование. Отказы в конструкциях РЭС по механическим воздействиям можно предупредить, если на ранних этапах проектирования применять моделирование механических процессов. Однако конструкции РЭС имеют свою специфику, заключающуюся, прежде всего, в многокомпонентности конструкций РЭС (несколько уровней конструктивной иерархии, тысячи электрорадиоизделий, десятки материалов) и многообразии механических воздействий. По этой причине задача моделирования механических процессов в конструкциях РЭС требует специализированного инструмента анализа.

В радиоэлектронной промышленности и, в частности, на каждом предприятии, связанном с проектированием РЭС, сложился типовой ряд конструкторского исполнения РЭС и их элементов. Поэтому в подавляющем большинстве случаев спроектированная несущая конструкция РЭС представляет собой комбинацию готовых типовых конструкторских решений. При такой процедуре проектирования легко автоматизировать моделирование механических процессов в конструкциях РЭС. Для этого необходимо создать библиотеку наиболее используемых моделей типовых конструктивных решений и предоставить пользователю средства компоновки этих моделей и автоматического соединения их в единое целое с последующим анализом на ме-

ханические воздействия. Это позволит оперативно осуществлять анализ механических процессов в конструкциях РЭС. К сожалению, разработка алгоритма автоматического соединения в рамках известных САЕ-систем представляет собой практически непреодолимую задачу. Это ограничение обусловлено тем, что известные САЕ-системы не ориентированы на построение сборных многокомпонентных моделей в приемлемые для практики проектирования сроки. Вопрос анализа конструкций РЭС рассматривался в [1, 2] в рамках подсистем АСОНИКА-М и АСОНИКА-ТМ. Однако практика использования показала значительные недостатки этих подсистем. АСОНИКА-М является препроцессором и постпроцессором к универсальной САЕ-системе ANSYS, следовательно, имеет существенные ограничения при построении сборных моделей, что сильно снижает эффективность ее применения при проектировании конструкций РЭС.

### Обзор методов решения проблемы

Рассмотрим возможные и существующие технологии построения моделей механических процессов в конструкциях РЭС посредством существующего универсального и специализированного программного обеспечения. Прежде всего, рассмотрим технологию построения в среде универсальной САЕ-системы (рис. 1). Схему этой технологии следует отнести к возможной схеме, так как на практике она не применяется из-за высокой трудоемкости (конструкции РЭС многокомпонентные, имеют в своем составе тысячи электрорадиоизделий и десятки материалов) и необходимости наличия специализированных знаний по физике и математике.

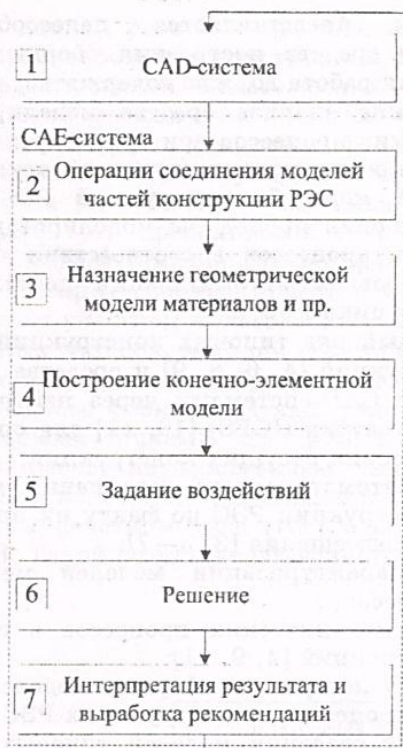


Рис. 1. Схема технологии построения модели в САЕ-системе

Из всех этапов, перечисленных на рис. 1, автоматически выполняются только 4- и 6-й этапы. Самыми трудоемкими являются 2- и 3-й этапы. На 2-м этапе необходимо при помощи логических операций с геометрией обеспечить механическую связь или соединение моделей частей конструкции. 3-й этап требует от пользователя интерактивного назначения каждому элементу геометрии свойств материала, принадлежности тому или иному компоненту и пр., что особенно проблематично и утомительно, учитывая огромное количество деталей в конструкции РЭС. Даже задание воздействия и интерпретация результата в САЕ-системе не автоматизированы применительно к анализу механических процессов. Например, при визуализации результата могут возникнуть сложности при отображении внутренности конструкции, закрытой, например, кожухом.

Далее представлена схема технологии построения модели посредством специализированной программы АСОНИКА-М (рис. 2). В качестве решателя АСОНИКА-М использует САЕ-систему ANSYS и только подготавливает данные для их автоматической обработки. Это значит, что пользователь участвует только в 1-, 2-, 3- и 7-м этапах. Все эти этапы достаточно хорошо автоматизированы с точки зрения специфики конструкций РЭС, поэтому трудоемкость работы на этих этапах сведена к минимуму. Основной и главный недостаток этой схемы заключается в том, что пользователь имеет возможность работы лишь с определенным типом конструкции. Выбрав тип конструкции, пользователь резко ограничен в плане ее редактирова-

ния. Можно менять свойства материалов, определенные толщины, какие-то количественные параметры, однако выполнение каких-либо структурных изменений конструкции не представляется возможным. Как известно, в основе большей части конструкций РЭС используется та или иная типовая конструкция. В остальном индивидуальная конструкция имеет массу отличий, которые не позволяют рассматривать модели механического процесса этой конструкции и типовой лежащей в ее основе как эквивалентные. Поэтому в практике проектирования РЭС АСОНИКА-М подходит только для очень редких частных случаев, что делает эту программу крайне неэффективной.

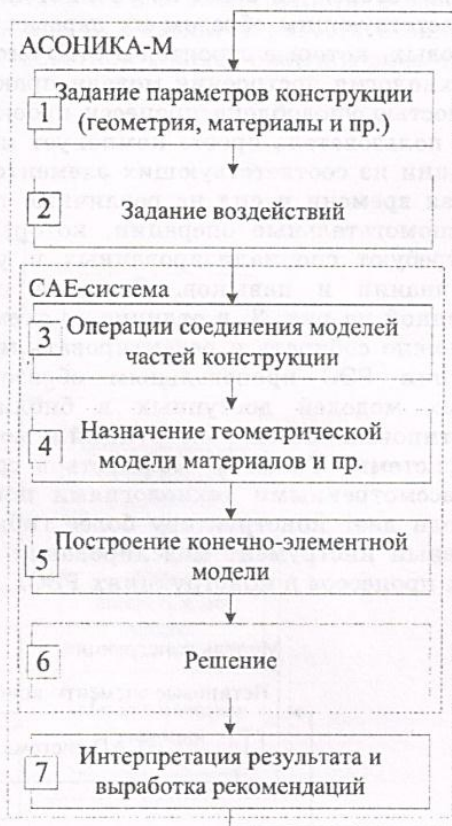


Рис. 2. Схема технологии построения модели в подсистеме АСОНИКА-М

Ограничение по построению модели с привлечением АСОНИКА-М и ANSYS связано с тем, что ANSYS не ориентирован на построение сборных моделей. Модели частей конструкции РЭС необходимо механически соединять между собой, а операции САЕ-систем, используемые для соединения, конфликтуют между собой. Одна операция может удалить результат выполнения другой операции. Эту сложность можно обойти, если точно предопределить геометрическую структуру модели конструкции и заранее продумать и запрограммировать бесконфликтную последовательность вызовов операций соединения элементов этой модели. Если структура модели заранее не предопределена, то реализовать технологию сборки не представля-

ется возможным. Поэтому собирать модель из различных моделей типовых и нетиповых частей конструкций РЭС и произвольным образом ее затем редактировать, а не брать готовую модель типовой конструкции, меняя ограниченное количество параметров модели этой конструкции, по представленной схеме (см. рис. 2) невозможно.

*Предложение своего подхода.* На рис. 3 авторами приведена схема технологии построения модели, которая лишена недостатков предыдущих схем. Основной объем работы пользователя приходится на этапы 1 и 2. Остальные и самые трудоемкие этапы выполняются автоматически. Модель формируется пользователем из типовых элементов, которые он берет из библиотеки, меняя соответствующим образом их параметры, и из нетиповых, которые строятся в CAD-системе. Такая технология построения модели практически полностью уподоблена процессу проектирования — пользователь просто компоует модель конструкции из соответствующих элементов, не затрачивая времени и сил на различные трудоемкие вспомогательные операции, которые зачастую требуют специализированных и углубленных знаний и навыков. Согласно схеме, изображенной на рис. 3, в отличие от схемы на рис. 2, можно собирать и редактировать модель конструкции РЭС произвольным образом из различных моделей доступных в библиотеке моделей типовых частей конструкций и моделей из CAD-системы. Такая возможность в сравнении с рассмотренными технологиями построения модели дает конструктору более гибкий и эффективный инструмент моделирования механических процессов в конструкциях РЭС.

Поэтому представляется целесообразным разработка средств построения сборных моделей. Данная работа должна содержать:

проведение анализа средств моделирования механических процессов при проектировании;

формулировку принципов новой технологии построения моделей конструкций РЭС [3—7] для выполнения процедуры моделирования механических процессов в соответствии с современным уровнем автоматизации деятельности проектировщика РЭС;

модельный ряд типовых конструкций и частей конструкций [4, 6, 8, 9] и средства взаимодействия с CAD-системами через нейтральный формат геометрии (IGES) [10, 11] для оперативного построения несущих конструкций;

метод автоматического соединения моделей частей конструкции РЭС по факту их пространственного размещения [3, 5—7];

метод параметризации моделей механических процессов;

модели механических процессов в соединениях конструкций [4, 9, 11];

методику построения сборных моделей механических процессов в конструкциях РЭС;

методику создания моделей типовых конструкций и частей конструкций [3, 8];

методику моделирования механических процессов в конструкциях РЭС [7, 11];

архитектуру и программную реализацию системы моделирования [3, 4, 6, 8];

методологию проектирования конструкций РЭС на основе моделирования механических процессов в конструкциях РЭС [4, 8, 11, 12];

экспериментальную проверку и внедрение в практику проектирования РЭС на предприятиях и учебный процесс вузов.

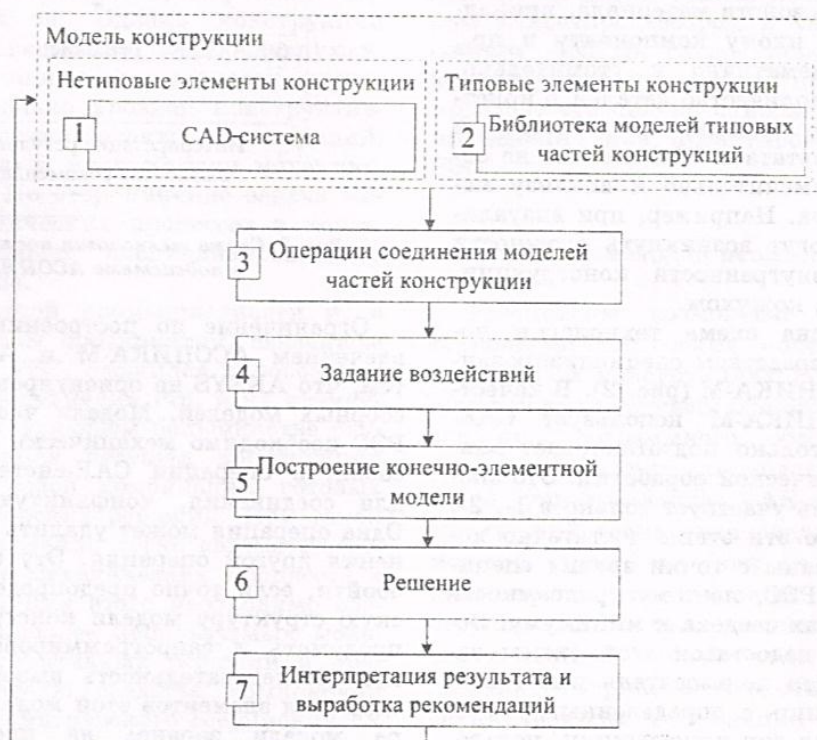


Рис. 3. Предлагаемая схема технологии построения модели

Цель данной работы — реализация методологии проектирования конструкций РЭС на основе моделирования механических процессов. Основой этой методологии является технология построения модели механического процесса в конструкциях РЭС, структура которой представлена на рис. 4. Представленная структура раскрывает суть предлагаемой технологии построения модели (см. рис. 3), которая позволяет строить сложные сборные модели с минимально возможным участием пользователя, за счет разработанных методов, методик и алгоритмов.

*Пример.* На рис. 5 изображена модель конструкции одного блока печатных узлов с пятью контрольными точками. Для этой модели был проведен расчет на собственные частоты. Первая форма колебаний наблюдается на частоте 135 Гц на печатном узле (ПУ) с контрольной точкой 3. Такой результат объясняется тем, что

этот ПУ обладает меньшей жесткостью по сравнению с малыми ПУ и на этом ПУ расположен элемент (в форме параллелепипеда), имеющий массу 80 г. Вторая собственная частота (178 Гц) возникает на ПУ с контрольной точкой 4, четвертая (257 Гц) на ПУ с контрольной точкой 2. Полученные формы колебаний собственных частот свидетельствуют о том, что все составляющие части модели соединены друг с другом и вся модель представляет собой упругий монолит. Это свидетельствует о выполнении требований, предъявленных к алгоритмам автоматического соединения моделей частей конструкций РЭС. В качестве примера проведен гармонический анализ, для этого было задано единичное воздействие на всю конструкцию в виде ускорения по оси Z. Результат расчета в виде амплитудно-частотной характеристики представлен на рис. 6.

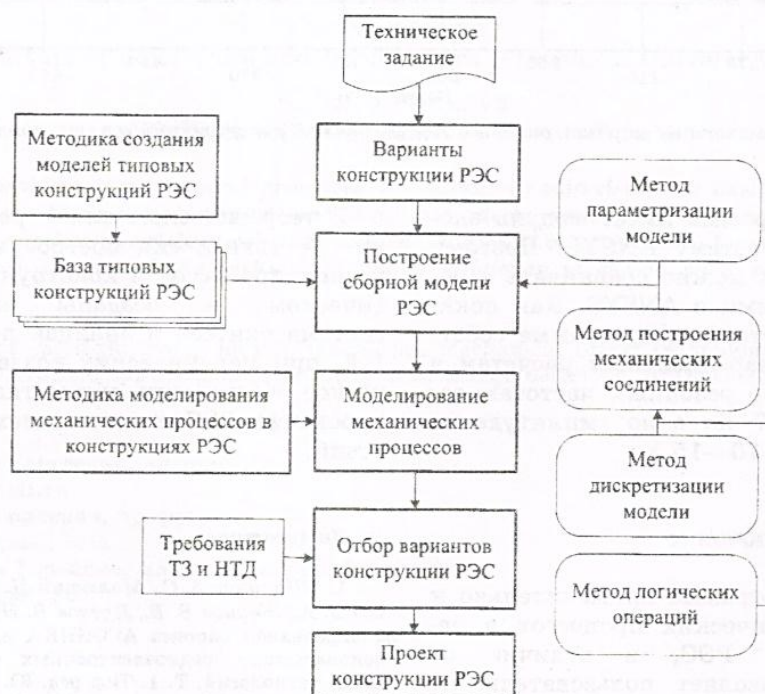


Рис. 4. Структура технологии построения модели механических процессов в конструкциях РЭС

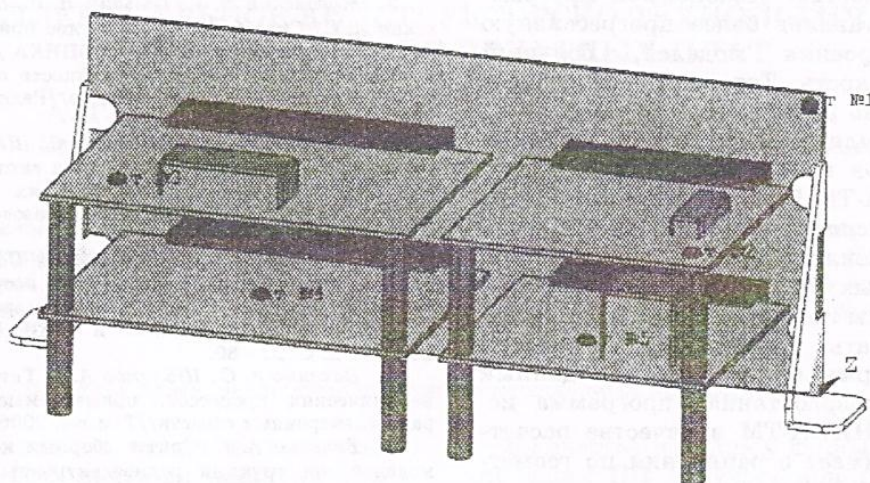


Рис. 5. Модель конструкции блока на печатных узлах

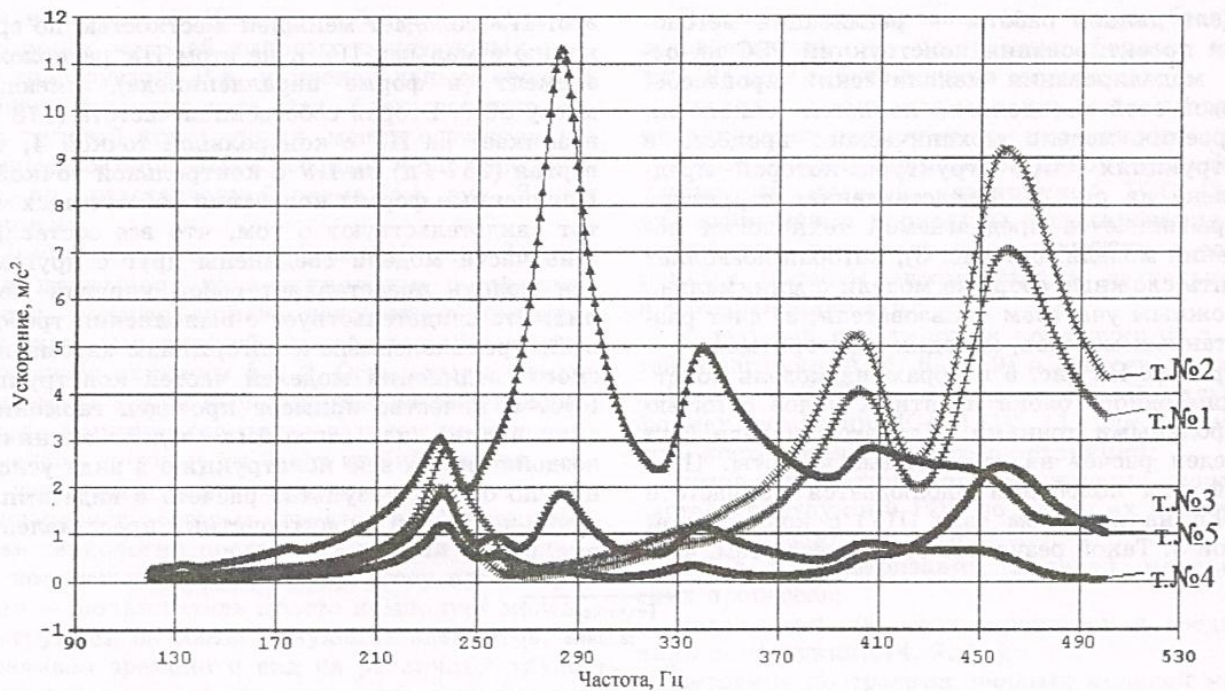


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики моделируемой конструкции в пяти контрольных точках

Разработанная программа имеет модуль экспорта модели в САЕ-систему ANSYS. Поэтому все результаты расчета можно сравнивать с результатами, полученными в ANSYS. Как показывает практика расчетов, на программе собственной разработки и параллельным расчетам в ANSYS расхождение по резонансным частотам составляет не более 5–7 %, а по амплитуде на резонансах — не более 10–15 %.

### Заключение

Представленная программа применительно к моделированию механических процессов в несущих конструкциях РЭС, в отличие от АСОНИКА-М [1], позволяет пользователю не только не зависеть от САЕ-системы ANSYS, так как является полностью независимой программой, но и предоставляет более прогрессивную технологию построения моделей, больший функционал и гибкость. Тот же вывод следует распространить и на подсистему АСОНИКА-ТМ, предназначенную для анализа механических и тепловых процессов в печатных узлах. В подсистеме АСОНИКА-ТМ [2] в качестве математического метода использован метод конечных разностей, что накладывает ограничение на геометрию печатных узлов. В первых версиях данной подсистемы предоставлялась возможность анализировать печатные узлы только прямоугольной формы без вырезов. На данный момент времени разработанная программа используется в АСОНИКА-ТМ в качестве расчетного ядра, что снимает ограничения по геометрической форме печатных узлов.

В теоретическом плане результат исследования — технология построения модели механических процессов в конструкциях РЭС, в практическом — созданы автоматизированная система синтеза и анализа проектных решений РЭС при механических воздействиях и методическое обеспечение автоматизированного проектирования РЭС с учетом механических воздействий.

### Литература

1. Шалумов А. С., Малютин Н. В., Кофанов Ю. Н., Способ Д. А., Жаднов В. В., Носков В. Н., Ваченко А. С. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. Т. 1./Под ред. Ю. Н. Кофанова, Н. В. Малютина, А. С. Шалумова. — М.: Энергоатомиздат, 2007. — 368 с.
2. Журавский В. Г., Гольдин В. В., Шалумов А. С., Ваченко А. С., Способ Д. А. Совместное применение автоматизированных систем ANSYS и АСОНИКА для моделирования и обеспечения механической стойкости сложных конструкций радиоэлектронных средств//Радиопромышленность. 2003. № 3. С. 41–69.
3. Балябкин А. А., Ваченко А. С., Шалумов А. С. Разработка языка макросов как средства синтеза моделей механических процессов в конструкциях радиоэлектронных средств//Качество. Инновации. Образование. 2007. № 9. С. 56–60.
4. Русановский С. А., Шалумов А. С., Ваченко А. С. Моделирование типовых и нетиповых несущих конструкций бортовых приборов и систем с точки зрения визуализации исходных данных//Качество и ИПИ (CALS)-технологии. 2007. № 2. С. 22–30.
5. Ваченко А. С., Шалумов А. С. Типы синтеза моделей механических процессов, применяемые в конструкциях радиоэлектронных средств//Там же. 2006. № 3. С. 10–16.
6. Ваченко А. С. Синтез сборных конечно-элементных моделей конструкций радиоэлектронных средств//Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 1. С. 19–24.

7. Русановский С. А., Шалумов А. С., Ваченко А. С. Методика синтеза и анализа проектных решений бортовых приборов и систем на основе человеко-машинных интерфейсов // Качество. Инновации. Образование. 2007. № 8. С. 62—67.

8. Ваченко А. С., Шалумов А. С. Моделирование механических процессов в блоках радиоэлектронных средств на основе метода взаимодействия "проектировщик—система" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2003. № 3. С. 57—63.

9. Ваченко А. С. Синтез сборных конечно-элементных моделей конструкций радиоэлектронных средств // Виртуализация проектирования и испытаний электронной аппаратуры / Тр. ОАО "Научно-исследовательский центр электронной вычислительной техники" / Под ред. О. Ю. Мар-

тынова, А. С. Шалумова, Н. В. Малютина, Ю. Н. Кофанова. — М.: Изд-во "Радиотехника", 2011. С. 19—24.

10. Елизаров А. Г., Ваченко А. С., Шалумов А. С. Интерфейсы с САД-системами как средства синтеза моделей механических процессов в конструкциях радиоэлектронных средств // Качество. Инновации. Образование. 2008. № 1. С. 44—48.

11. Ваченко А. С., Шалумов А. С. Обзор возможных схем синтеза моделей механических процессов в конструкциях радиоэлектронных средств посредством САД- и САЕ-систем // Там же. 2010. № 3. С. 70—77.

12. Ваченко А. С., Фадеев О. А. Автоматизация прочностного анализа сложных конструкций радиоэлектронных средств // Техника машиностроения. 2002. № 3. С. 22—29.

## TECHNOLOGY OF BUILDING OF MODELS OF MECHANICAL PROCESSES IN RADIO-ELECTRONIC DESIGNS

A. S. Vachenko

Joint Stock Company "V. A. Degtyaryov Plant", Kovrov, Moscow region, Russia

Yu. N. Kofanov

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics" (Technical University), Moscow, Russia

S. Yu. Sotnikova

ANO "Reliability Academy", Moscow, Russia

*In article the problem of mechanical processes modelling of radio-electronic designs is considered. It is supposed, that the basic complexity at modelling is made by process of construction of mechanical process model. The review of existing schemes of technologies of construction of modular models is executed. More perfect scheme of the technology which efficiency is shown on a practical example is offered.*

*Keywords:* designs of radio-electronic means, modelling, mechanical loads, technology of model construction, frequencies, harmonic vibration, synthesis and the analysis of design decisions, ASONIKA, CAE-system, damping.

Ваченко Александр Сергеевич, инженер.

E-mail: vachenko@mail.ru

Кофанов Юрий Николаевич, профессор.

E-mail: y.kofanov@gmail.com

Сотникова Светлана Юрьевна, младший научный сотрудник.

E-mail: sveta1708@mail.ru



## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

А. Г. Аветисов; Р. М.-Ф. Салихджанова, д-р техн. наук

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА), Москва, Россия

*Рассмотрены вопросы разработки экспертной системы для конструкторско-технологического проектирования печатных плат (ПП). Проведен анализ материалов ПП и современной элементной базы и технологий изготовления ПП. Показана необходимость автоматизации процесса проектирования радиоэлектронных средств (РЭС) путем интеллектуализации проектирования ПП.*

*Ключевые слова:* печатная плата, экспертная система, искусственный интеллект.

Одним из важных и ответственных этапов проектирования РЭС является конструкторско-технологическое проектирование ПП.

В качестве исходных данных инженер-проектировщик ПП получает конструктив из отдела конструкторов, проектирующих саму конструк-