

На правах рукописи

РУСАНОВСКИЙ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
БОРТОВЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ**

Специальность 05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

ТОМСК 2009

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе Научно-производственный центр
«ПОЛЮС»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Шалумов Александр
Славович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Цапко Геннадий Павлович

кандидат технических наук, доцент
Бойченко Иван Валентинович

Ведущее предприятие: Открытое акционерное общество «Информационные
спутниковые системы» имени академика М.Ф.
Решетнева, г. Железногорск

Защита состоится 27 мая 2009 года в 15-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.06 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84/3, институт «Кибернетический центр» ТПУ, ауд. 214

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «___» апреля 2009 года.

Ученый секретарь Совета
к. т. н., доцент

Сонькин М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На многих отечественных предприятиях разработчики бортовых приборов и систем (БПС) затрачивают на проектирование до 3–5 лет. При этом, несмотря на столь значительные сроки создания опытных образцов, освоение их серийного выпуска и первые годы эксплуатации сопровождаются многочисленными доработками, целью которых является устранение различного рода недостатков, дефектов, предпосылок как к простым, так и к системным отказам, а также самих системных отказов (обуславливаются комплексным воздействием дестабилизирующих факторов). Причины этого можно отнести к недостаткам процессов проектирования и отработки создаваемых образцов, связанных, в первую очередь, с недостаточным уровнем развития автоматизированных методов проектирования, базирующихся на комплексном (учет наиболее существенных взаимных связей) математическом моделировании разнородных физических процессов в БПС и интегрирующихся с методологией современных информационных технологий проектирования наукоемкой продукции – *CALS*-технологий (*Continuous Acquisition and Life-cycle Support*), реализующих непрерывную информационную поддержку всего жизненного цикла изделия.

Жесткие условия эксплуатации существенно влияют на работоспособность и надежность БПС. Подавляющее большинство отказов БПС связано с тепловыми и механическими воздействиями, которые приводят к выходам за пределы, установленные нормативно-технической документацией (НТД), механических характеристик конструкций – ускорений, перемещений, напряжений и температур электрорадиоизделий (ЭРИ), что приводит к нарушению прочности и устойчивости работы. Кроме того, к нарушениям прочности БПС часто приводит накопление усталостных повреждений в выводах ЭРИ и их разрушение.

Отказы, связанные с потерей механической и тепловой прочности и устойчивости БПС, выявляются на завершающих этапах разработки и приводят к возможно длительной оптимизации конструкции, что в конечном итоге сказывается на сроках и стоимости выполнения проектных работ. Проектирование современных БПС в заданные сроки и в соответствии с требованиями НТД по механическим и тепловым характеристикам, в общем случае, невозможно без использования информационных технологий. Применение компьютерного моделирования тепловых и механических процессов, протекающих при эксплуатации БПС, позволит сократить количество промежуточных вариантов конструкций и уменьшить себестоимость и время проектирования.

Компьютерное моделирование механических и тепловых процессов в БПС требует взаимного учета целого ряда факторов: геометрической сложности и неоднородности конструкции; наличия в печатных узлах (ПУ) до нескольких тысяч ЭРИ, механические и тепловые характеристики которых надо определить; многообразия видов механических воздействий; одновременного приложения к аппаратуре двух и более видов механических воздействий; комплексного характера приложения механических и тепловых воздействий, приводящих к влиянию тепловых процессов на механические; нелинейности физических характеристик материалов конструкций.

Существующие специализированные программы моделирования механических и тепловых процессов в приборах и системах не учитывают всех выше перечисленных факторов, не достаточно развиты применительно к моделированию несущих конструкций приборов и систем, не позволяют построить всю иерархию конструкций от шкафа до отдельного ЭРИ для передачи воздействий и результатов моделирования между отдельными уровнями иерархии, например, от блока к ПУ.

Для моделирования механических и тепловых процессов в несущих конструкциях приборов и систем применяются следующие универсальные CAE-системы: NASTRAN, COSMOS-M, MARC, ANSYS и т.д.

Как показывает практика, на предприятиях, где это имеет место, моделированием занимаются специалисты в области прочности и тепла, не разбирающиеся в особенностях объекта проектирования. Поэтому им требуется значительное время на построение модели конструкции и ее анализ. В это время разработчик простаивает. Затем возникает множество итераций по согласованию результатов моделирования между расчетчиком и разработчиком. За это время разработчик при наличии удобного инструмента – человеко-машинного интерфейса для моделирования БПС - сможет перебрать множество вариантов, работая в интерактивном режиме. Следовательно, необходимо отказаться от подобной практики и передать вопросы моделирования разработчику. Для этого разработчик БПС помимо пользовательских навыков работы с универсальной CAE-системой должен обладать глубокими теоретическими знаниями в области математики метода конечных элементов и физики протекания механических и тепловых процессов в данных конструкциях. Подготовка разработчика БПС, сочетающего в себе знания конструктора, аналитика-расчетчика и пользователя CAE-системой, требует значительных временных и финансовых затрат, что, учитывая динамику темпов производства и нестабильность кадров в современных условиях трудно достижимая задача. Однако, даже наличие высококвалифицированных разработчиков не решит проблемы моделирования механических и тепловых процессов в конструкциях БПС. Использование компьютерного моделирования требует от разработчика построить расчетную модель несущей конструкции, провести сбор входных данных, осуществить ввод этих данных, подготовить данные для передачи в решатель CAE-системы, провести расчет, обработать результаты и принять решение по полученным результатам. При этом время, затраченное на моделирование изделия, может превышать время, отводимое на проектирование. Следует отметить, что большую часть времени, занимает ввод конструкции БПС в CAE-систему и анализ результатов моделирования.

Выход из сложившегося положения заключается в разработке специализированных средств компьютерной графики, составляющих основу человеко-машинных интерфейсов для моделирования БПС и позволяющих разработчику БПС в минимальные сроки собирать сложную конструкцию из типовых элементов и работать с математическим ядром универсальной CAE-системы посредством понятных ему графических интерфейсов ввода-вывода.

Решением задачи моделирования механических и тепловых процессов в конструкциях приборов и систем занимались такие специалисты как Маквецов Е.Н., Тартаковский А.М., Кофанов Ю.Н., Кожевников А.М., Кришук В.Н., Шалумов А.С., Фадеев О.А. и др. Но они детально не рассматривали вопросы повышения эффективности моделирования конструкций приборов средствами инструментария, сочетающего в себе преимущества универсальных и специализированных программ, обладающего минимальными требованиями по времени и сложности к освоению его теоретической и пользовательской базы, что по сути дела представляет собой человеко-машинные интерфейсы для моделирования БПС.

Таким образом, актуальными являются разработка и применение средств компьютерной графики для синтеза и анализа проектных решений БПС при комплексных тепловых и механических воздействиях, составляющих основу человеко-машинных интерфейсов для моделирования БПС.

Цель работы – повышение эффективности процесса моделирования при проектировании конструкций БПС, отвечающих требованиям нормативной документации по тепловым и механическим характеристикам, сокращение сроков и стоимости их создания за счет применения человеко-машинных интерфейсов для синтеза и анализа проектных решений.

Задачи работы. Для реализации цели данной работы согласно вышеизложенным предложениям необходимо решить следующие задачи.

1. Исследование особенностей несущих конструкций БПС с точки зрения моделирования механических и тепловых процессов.
2. Разработка информационных моделей типовых и нетиповых несущих конструкций.
3. Разработка методики визуализации исходных данных и результатов моделирования конструкций БПС при комплексных тепловых и механических воздействиях.
4. Разработка алгоритмов человеко-машинных интерфейсов для синтеза моделей механических и тепловых процессов типовых и нетиповых конструкций блоков и шкафов БПС.
5. Практическая реализация алгоритмов в виде автоматизированной подсистемы синтеза и анализа проектных решений БПС при комплексных механических и тепловых воздействиях.
6. Разработка справочной базы данных (БД) параметров ЭРИ и материалов конструкций БПС.
7. Разработка методики моделирования комплексных механических и тепловых процессов в бортовых приборах и системах на основе человеко-машинных интерфейсов.
8. Внедрение созданной методики моделирования комплексных механических и тепловых процессов в бортовых приборах и системах на основе человеко-машинных интерфейсов в практику проектирования на промышленных предприятиях и в учебный процесс вузов.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в разработке:

- методики визуализации исходных данных и результатов моделирования БПС при комплексных механических и тепловых воздействиях, отличающейся от известных наличием комплексных информационных, топологических и математических моделей механических и тепловых процессов;
- алгоритмов человеко-машинных графических интерфейсов для синтеза типовых и нетиповых конструкций блоков и шкафов БПС, позволяющих конструктору в короткие сроки собирать сложную модель несущей конструкции БПС из типовых элементов;
- структуры автоматизированной подсистемы синтеза и анализа проектных решений БПС при комплексных механических и тепловых воздействиях, отличающейся от существующих наличием препроцессора и постпроцессора для моделирования механических и тепловых процессов в несущих конструкциях БПС в универсальной САЕ-системе, обеспечивающих удобный проектировщику БПС язык взаимодействия на базе человеко-машинных графических интерфейсов ввода-вывода, возможностью построить всю иерархию конструкций БПС от шкафа до отдельного ЭРИ для передачи воздействий и результатов моделирования между отдельными уровнями иерархии;
- структуры справочной базы данных параметров ЭРИ и материалов конструкций БПС, отличающейся от существующих наличием полных условных записей ЭРИ, наличием моделей вариантов установки ЭРИ, позволяющих значительно сократить время на ввод геометрических, физико-механических, тепловых и др. параметров ЭРИ, возможностью создания новых моделей вариантов установки ЭРИ, наличием необходимых графических параметров, позволяющих придавать реалистичность изображению ЭРИ в пространстве, возможностью создания дополнительных таблиц параметров ЭРИ, содержащих числовые, строковые, функциональные, логические, текстовые и графические данные об ЭРИ;
- методики моделирования комплексных механических и тепловых процессов в бортовых приборах и системах на основе человеко-машинных интерфейсов, отличающейся от существующих наличием доступного разработчику языка взаимодействия на базе человеко-машинных графических интерфейсов автоматизированного синтеза типовых и нетиповых конструкций БПС и универсального графического интерфейса вывода результатов моделирования, позволяющей в минимальные сроки и с минимальными

затратами принимать решение об обеспечении стойкости БПС к комплексным механическим и тепловым воздействиям и о повышении показателей надежности разрабатываемых БПС.

Практическая полезность работы состоит в том, что использование созданных методических и программных средств позволяет повысить эффективность моделирования БПС, обеспечить более высокие показатели надежности разрабатываемой аппаратуры, сократить сроки и стоимость проектных работ БПС с соблюдением требований НТД по механическим и тепловым характеристикам.

Методы исследования основываются на теории системного анализа, прикладной механики, методах вычислительной математики и компьютерной графики.

Реализация и внедрение результатов работы. Исследования автора выполнялись во ОАО «НПЦ «ПОЛЮС».

Разработанные в диссертации алгоритмы, подсистема, база данных, методики внедрены в практику проектирования российских предприятий: ОАО «НПЦ «Полус»(г.Томск), Ракетно-космическая корпорация «Энергия» (г. Королев), Раменское проектное конструкторское бюро (г. Раменское Московской обл.), КБ ИГАС «Волна» (г. Москва), ГНИИ Приборостроения (г. Москва), НИИ автоматической аппаратуры имени академика В.С. Семенихина (г. Москва), Особого конструкторского бюро Ижевского радиозавода (г. Ижевск).

Внедрение результатов подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы. Практическая реализация результатов диссертационной работы в виде автоматизированной подсистемы синтеза и анализа проектных решений БПС при комплексных механических и тепловых воздействиях была представлена на

– V Московском Международном салоне инноваций и инвестиций (г. Москва, 2005 г.)

– IX Международной выставке молодежных научно-технических проектов ЭКСПО-НАУКА 2003, проводившейся под эгидой ЮНЕСКО (г. Москва);

– Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи НТТМ-2004 (г. Москва).

– XVII научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», г. Томск, 2006 г.

Публикации. По материалам диссертационных исследований опубликовано 8 научных работ, в том числе 3 статьи и 1 монография.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения, всего 239 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи настоящей работы, отмечены её научная новизна и практическая ценность.

В первой главе приведен анализ проблем проектирования конструкций БПС с учётом механических и тепловых воздействий; анализ современных методов и подходов, существующих автоматизированных систем и средств компьютерной графики, используемых для моделирования механических и тепловых процессов в конструкциях БПС; рассмотрены механические и тепловые воздействия, которым БПС могут подвергаться в процессе эксплуатации; рассмотрены факторы, которые необходимо учитывать при моделировании механических и тепловых процессов в конструкциях БПС; показано влияние механических характеристик на показатели надежности разрабатываемых БПС.

Рассмотрена существующая схема моделирования механических и тепловых процессов в конструкциях БПС на предприятиях. Но, как показывает практика, в подавляющем большинстве случаев, моделирование БПС не проводится. Исследование данной схемы выявило ее недостатки и показало отсутствие в настоящий момент:

– методики визуализации исходных данных и результатов моделирования БПС при комплексных тепловых и механических воздействиях, позволяющей минимизировать влияние человеческого фактора на адекватность результатов моделирования и позволяющей

в минимальные сроки вводить конструкцию БПС в программу моделирования и анализировать результаты посредством доступных разработчику графических интерфейсов ввода-вывода;

–методики синтеза и анализа проектных решений БПС при комплексных воздействиях на основе средств компьютерной графики, понятных разработчику БПС и требующих минимального времени на освоение.

Проведен анализ программного обеспечения, применяемого для моделирования механических и тепловых процессов в БПС. Рассмотрен перечень применяемых специализированных программ, а также универсальных конечно-элементных CAE-систем для моделирования несущих конструкций БПС.

Исследования процесса проектирования БПС с применением компьютерного моделирования механических и тепловых процессов и существующих универсальных и специализированных программ моделирования, проведенные в диссертации, показали отсутствие в настоящее время необходимого математического, программного и методического обеспечения, позволяющего конструктору БПС в сжатые сроки проводить моделирование и принимать решение об обеспечении стойкости БПС к комплексным механическим и тепловым воздействиям и о повышении показателей надежности разрабатываемой аппаратуры.

Выход из создавшегося положения можно найти в объединении возможностей математического ядра универсальной CAE-системы, (например, ANSYS) с существующими специализированными программами, в частности, с автоматизированной подсистемой комплексного анализа печатных узлов на комплексные механические и тепловые воздействия АСОНИКА-ТМ и подсистемой расчета систем виброизоляции «ВИБРОЗАЩИТА», посредством специальных препроцессора и постпроцессора в рамках общей управляющей программы, позволяющей отследить всю иерархию конструкции БПС от шкафа до отдельного ЭРИ, с целью автоматизированной передачи воздействий и результатов моделирования от высшего уровня иерархии БПС к низшему, например от блока к ПУ. Методика применения программы должна основываться на технологии хранения и управления данными о БПС (*PDM-технология*). В диссертации приведена структура такой PDM-системы.

На основе проведенного анализа предложена схема, моделирования (см. рис.1), согласно которой конструктор БПС взаимодействует со сложной конечно-элементной CAE-системой через препроцессор и постпроцессор, представляющие собой графические интерфейсы ввода-вывода, адаптирующие данную систему применительно к моделированию механических и тепловых процессов в несущих конструкциях БПС. В данной схеме отсутствует аналитик-расчетчик, а также посредничество между конструктором и CAE-системой, что приводит к сокращению итераций отработки конструкции, сроков и затрат на ее проектирование, уменьшению влияния человеческого фактора на адекватность результатов моделирования.

В качестве универсальной конечно-элементной CAE-системы предложена система ANSYS - единственная система, сертифицированная согласно серии стандартов ISO 9000, в виду ее многофункциональности, возможности работать с математическим ядром посредством макросов.

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

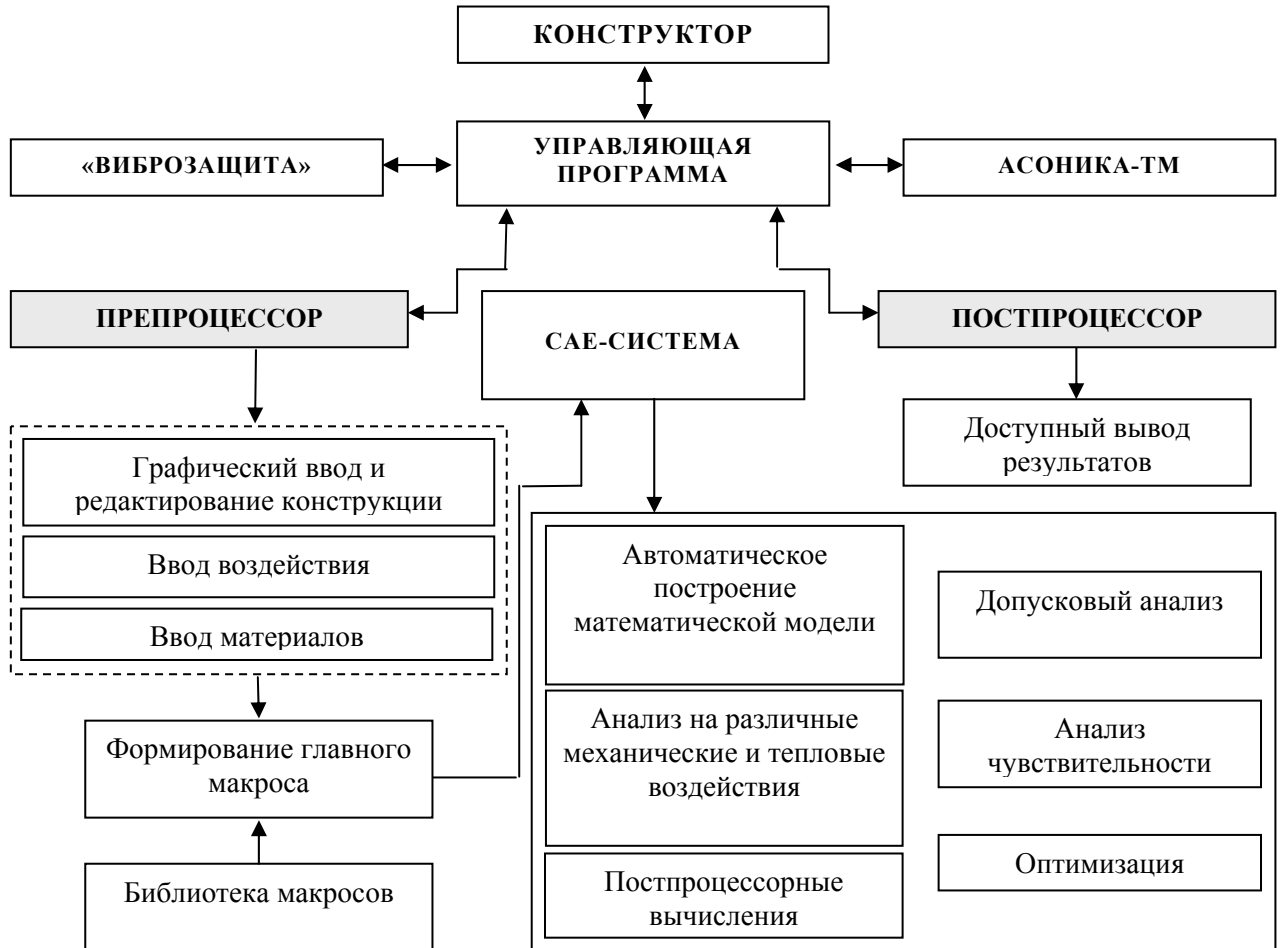


Рис.1. Предлагаемая схема моделирования

Во второй главе проведено исследование наиболее распространенных несущих конструкций БПС и разработка информационных моделей типовых и нетиповых несущих конструкций БПС с точки зрения визуализации исходных данных и результатов моделирования при комплексных механических и тепловых воздействиях. На основе анализа расчетов по хоздоговорным темам сделаны допущения на модели несущих конструкций, выявлен требуемый уровень детализации моделей, необходимый для получения приемлемого на ранних этапах проектирования результата.

Информационная модель несущей конструкции БПС с точки зрения визуализации исходных данных для моделирования механических процессов в соответствии с требуемым уровнем детализации, необходимым для получения приемлемого для ранних этапов проектирования результата, представляется в логико-аналитическом виде выражением:

$$M_x = \langle M_k, K_p, X \rangle,$$

где M_k – составная модель; K_p – модель крепления; X – модель механических воздействий.

Составная модель:

$$M_k = \bigcup_{i=1}^N [LCK \times M_e \times A]_i,$$

где N – количество моделей, образующих составную модель; $LCK = (x, y, z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$ – локальная система координат модели; $x, y, z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ – линейные и угловые смещения локальной системы координат модели относительно глобальной системы координат; M_e – модель типового элемента; A – модель соединения текущей модели с соседними моделями.

При этом

$$M_e = \Gamma \times D_p \times M_m \times T,$$

где Γ – множество, образующее геометрию модели; D_p – средний размер грани дискрета; M_m – множество материалов модели; T – температура.

Информационная модель несущей конструкции БПС с точки зрения визуализации исходных данных формируется посредством специализированного человеко-машинного графического интерфейса, в котором происходит сборка сложной конструкции блока или шкафа из типовых элементов (ПУ, разъем ПУ, шпилька, направляющая, внутренний элемент, ребро жесткости, корпус, лапка, контрольная точка), задаются параметры сетки, параметры материалов и температуры элементов конструкции, условия закрепления несущей конструкции и графики механических воздействий по осям координат.

Информационная модель содержит все необходимые данные для построения макроса САЕ-системы для моделирования механического процесса.

Информационная модель несущей конструкции БПС с точки зрения визуализации результатов моделирования в логико-аналитическом виде представлена выражением:

$$M_y = \langle \Gamma_p, \Gamma_d, \Gamma_{kp}, Y \rangle,$$

где Γ_p – множество узлов конечно-элементной модели; Γ_d – множество дискретов конечно-элементной модели; Γ_{kp} – множество контрольных точек; Y – множество механических характеристик (результатов моделирования несущей конструкции).

При моделировании БПС на гармоническую вибрацию, однократные и многократные ударные воздействия, линейные ускорения и акустические шумы множество механических характеристик представлено выражением:

$$Y = \bigcup_{i=1}^m [ft \times Ax \times Ay \times Az \times Dx \times Dy \times Dz \times S]_i$$

где ft – значение частоты или времени; Ax, Ay, Az – множество ускорений узлов по осям x, y, z соответственно, Dx, Dy, Dz – множество перемещений узлов по осям x, y, z соответственно, S – множество напряжений в узлах конструкции для i -го значения частоты или времени; m – количество рассчитанных значений частоты вибрации или времени удара.

При моделировании БПС на случайную вибрацию множество механических характеристик представлено выражением:

$$Y = Ax \times Ay \times Az \times Dx \times Dy \times Dz \times S,$$

где $Ax, Ay, Az, Dx, Dy, Dz, S$ – среднеквадратические значения ускорений, перемещений и напряжения в узлах по осям x, y, z соответственно.

Информационная модель несущей конструкции с точки зрения визуализации результатов моделирования формируется автоматически непосредственно в САЕ-системе, при помощи специальных макросов.

Данная информационная модель не зависит от типа несущей конструкции. Поэтому был сделан вывод о необходимости разработки универсального графического интерфейса вывода результатов моделирования, доступного разработчику БПС. Данный интерфейс должен позволять отображать деформации конструкции, поля ускорений, перемещений и напряжений в заданный момент времени или частоты, графики зависимости ускорений, перемещений и напряжений в контрольных точках и узлах в зависимости от частоты гармонической вибрации или времени ударного воздействия, содержать допустимые значения напряжений материалов конструкции, на основе которых разработчик может принять проектное решение об обеспечении стойкости несущих конструкций БПС к комплексным тепловым и механическим воздействиям.

Проектное решение принимается на основе ограничения:

$$\sigma_j^{\partial on} - k_j(\sigma_j + \Delta_j) \geq 0, \quad (1)$$

где σ_j – максимальное расчетное значение напряжения, σ_j^{don} – допустимое значение напряжения материала, k_j – коэффициент запаса напряжения, Δ_j – допуск на напряжение j -го элемента конструкции. Значения допустимых напряжений берутся из составной модели M_k . Полученные значения ускорений передаются в подсистему АСОНИКА-ТМ для моделирования ПУ.

При формировании модели несущей конструкции блока или шкафа БПС необходимо учитывать взаимное влияние различных уровней иерархии. При этом необходимо обеспечивать не только совместимость геометрии элементов в составе конструкции БПС, но и учитывать взаимное деформирование элементов конструкции, осуществлять точную передачу механических воздействий от уровня к уровню. Поэтому при моделировании должна рассматриваться вся несущая конструкция БПС в целом (рис. 2).

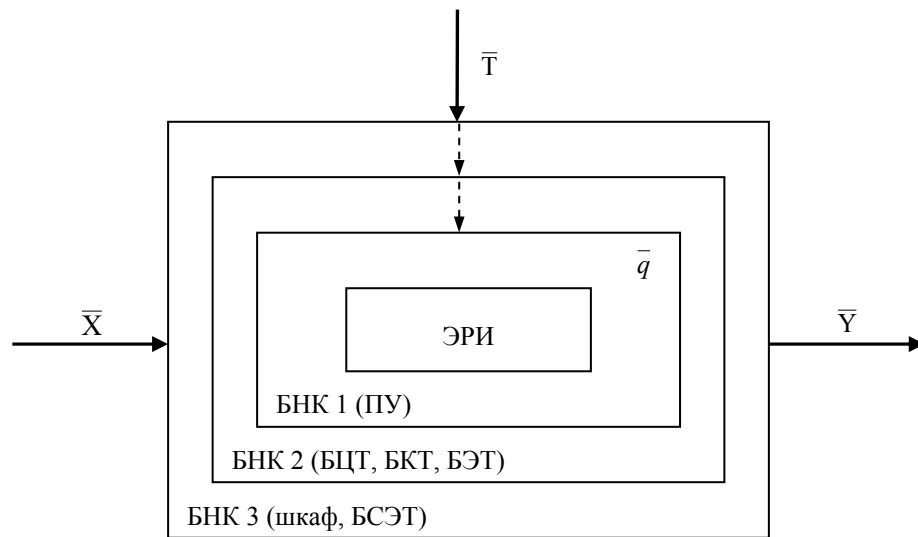


Рис. 2. Системный подход при моделировании несущих конструкций БПС

Описание механического процесса при этом может быть представлено в операторной форме в следующем виде:

$$\bar{W}\{x(\xi), \bar{y}(\xi), \bar{q}(\bar{T})\} = 0.$$

где $\bar{W}$ – операторы моделей, связывающие между собой входное воздействие $x(\xi)$, выходные характеристики $\bar{y}(\xi)$ и внутренние параметры конструкции $\bar{q}(\bar{T})$; $\bar{T}$ – внешнее воздействие в виде массива температур участков конструкции; ξ – независимый аргумент (время, частота).

В соответствии с поставленной целью, разработана методика визуализации исходных данных и результатов моделирования БПС при комплексных механических и тепловых воздействиях, структурная схема которой приведена на рис. 3.

Основу разработанной методики составляет информационная модель несущей конструкции БПС с точки зрения визуализации исходных данных, формируемая специализированным графическим интерфейсом. На основе информационной модели автоматически формируется топологическая модель конструкции БПС, которая в свою очередь, обеспечивает автоматическое создание математической модели в универсальной САЕ-системе. В этом случае процесс моделирования можно представить как процесс автоматизированного преобразования описания конструкции через информационную модель к топологической модели и далее к математической:

**Конструкция → Информационная модель →
Топологическая модель → Математическая модель**

Таким образом, разработанная методика призвана упростить формирование математической модели, а также вывод результатов и принятие решений на их основе при моделировании несущих конструкций БПС. Алгоритм методики представлен на рис. 4.

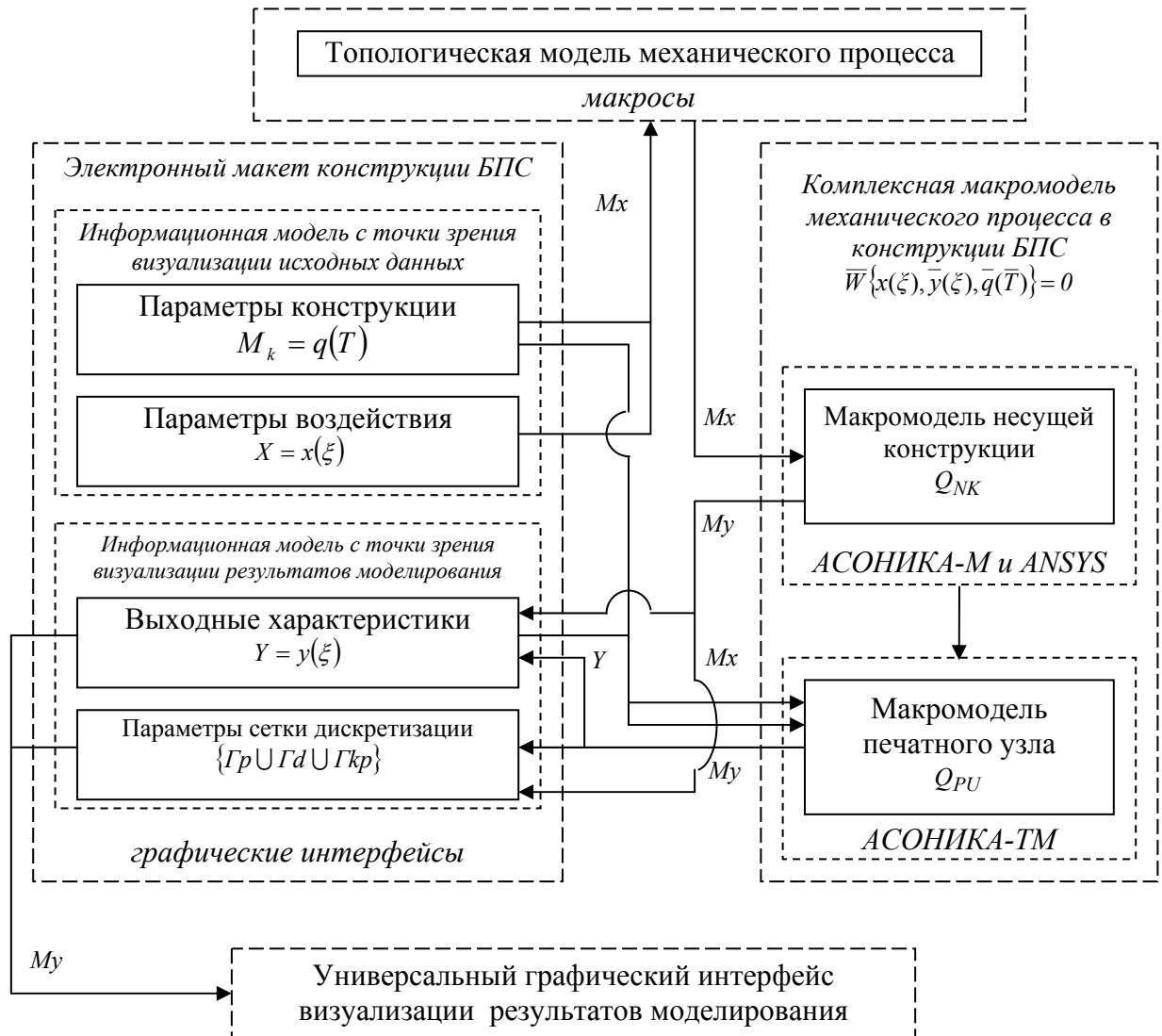


Рис. 3. Принцип визуализации исходных данных и результатов моделирования БПС

Методика включает в себя анализ технического задания на разработку конструкции БПС и выделение основных воздействующих факторов; алгоритмы и программные средства (ПС) автоматизированного синтеза моделей несущих конструкций БПС и чтения их параметров из базы данных, ПС для задания воздействий; алгоритмы и ПС для вывода результатов; рекомендации по выбору сетки разбиения; алгоритмы и ПС идентификации неизвестных параметров. Предусмотрено использование в рамках данной методики специализированной программы «ВИБРОЗАЩИТА», которая позволяет моделировать шкафы и блоки на виброизоляторах, что является очень эффективным средством защиты БПС, когда невозможно улучшение без изменения конструкции. После принятия решения об обеспечении стойкости несущей конструкции БПС к механическим воздействиям результаты моделирования передаются в подсистему АСОНИКА-ТМ для моделирования ПУ.

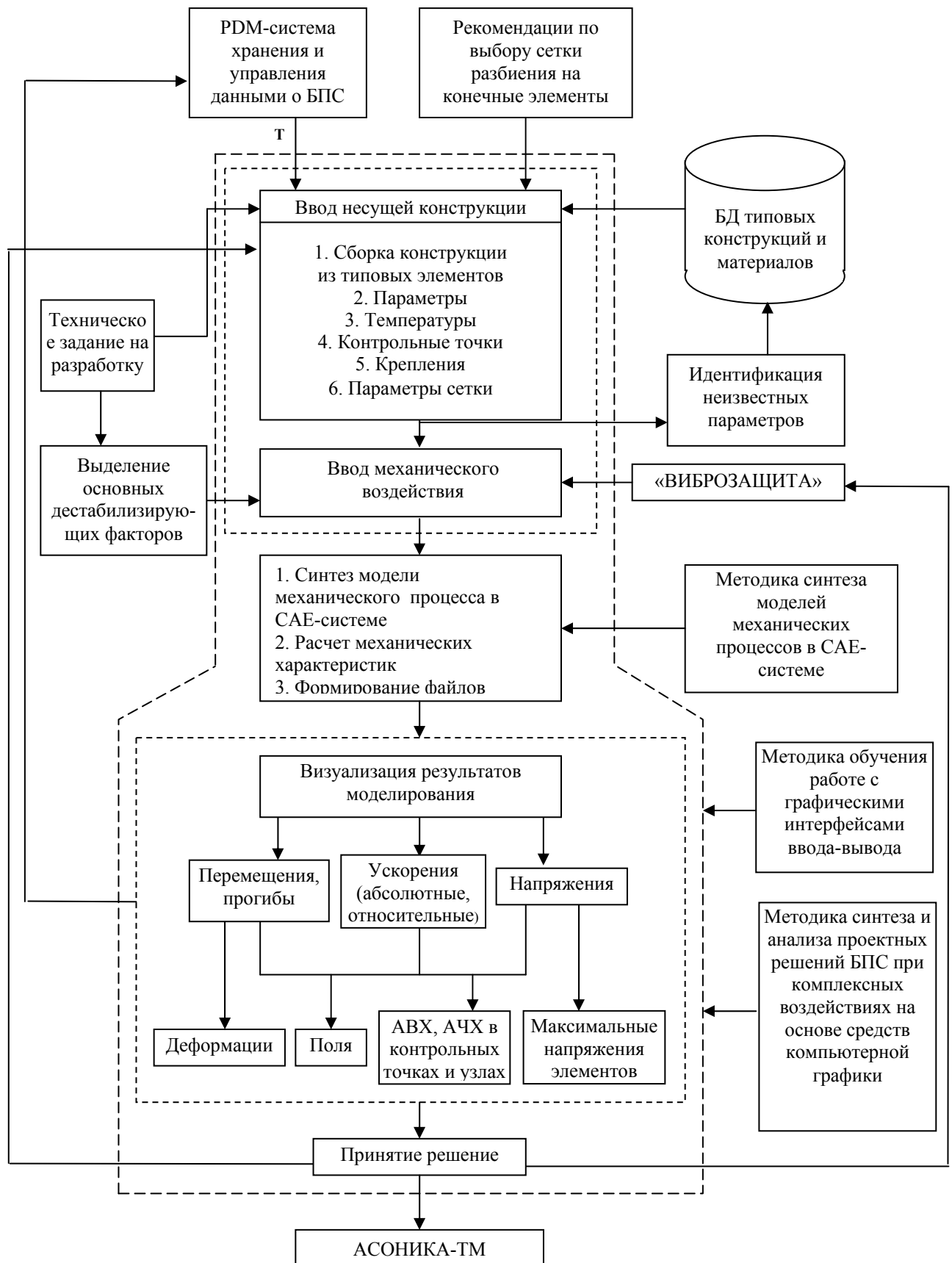


Рис. 4. Алгоритм методики визуализации исходных данных и результатов моделирования при комплексных воздействиях

В третьей главе, согласно предложенной схеме моделирования и разработанной методике визуализации исходных данных и результатов моделирования конструкций БПС,

разработана структура автоматизированной подсистемы синтеза и анализа проектных решений БПС при комплексных тепловых и механических воздействиях (рис. 5). Разработанная подсистема имеет в своем составе проблемно-ориентированные подсистемы: автоматизированную подсистему моделирования несущих конструкций БПС на комплексные тепловые и механические воздействия АСОНИКА-М и автоматизированную подсистему моделирования печатных узлов БПС на комплексные тепловые и механические воздействия АСОНИКА-ТМ, а также базу данных параметров ЭРИ и материалов конструкций БПС.

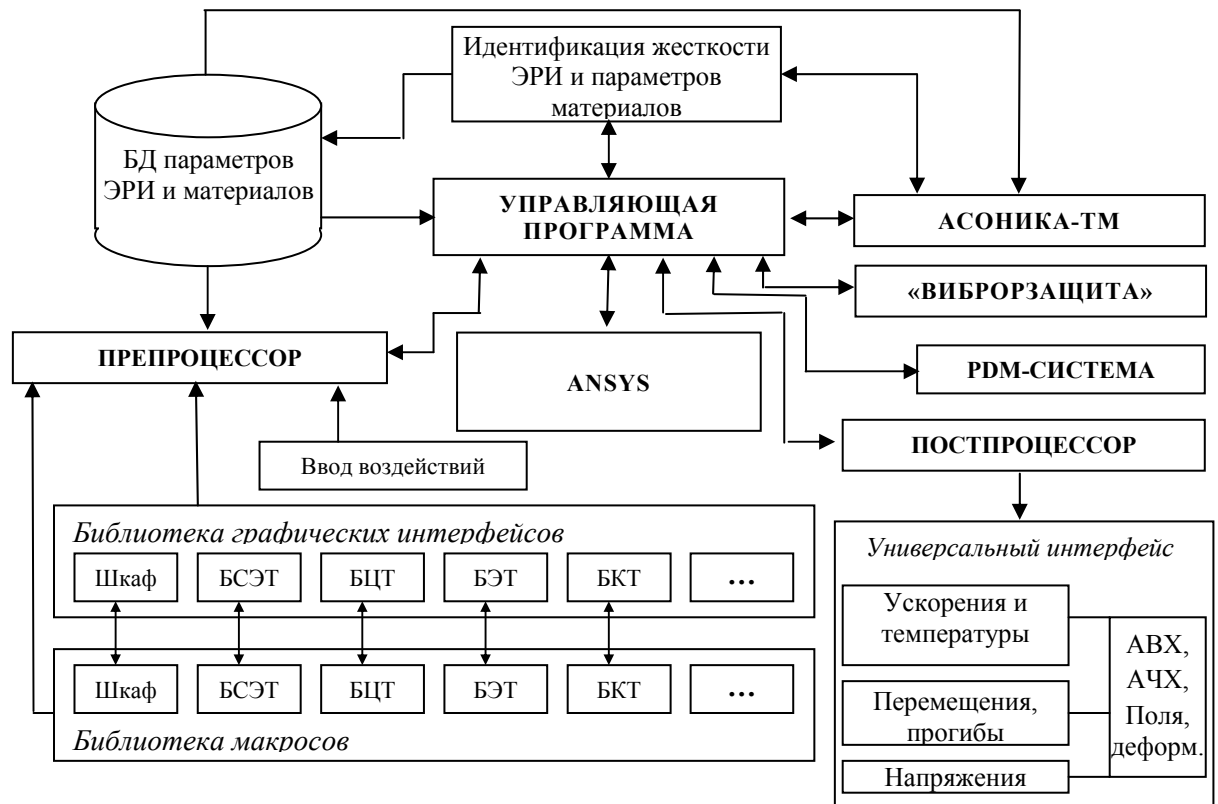


Рис. 5. Структура автоматизированной подсистемы синтеза и анализа проектных решений БПС при комплексных тепловых и механических воздействиях

Основу подсистемы составляет управляющая программа, в которой формируется иерархия конструкции БПС. Управляющая программа осуществляет автоматизированную передачу данных между конструктивными уровнями иерархии. В препроцессоре при помощи графических интерфейсов автоматизированного синтеза моделей типовых и нетиповых конструкций блоков и шкафов БПС и графического интерфейса ввода механических воздействий (гармонической и случайной вибраций, однократного и многократного удара, линейного ускорения) формируется информационная модель несущей конструкции с точки зрения исходных данных. При этом температуры элементов конструкции либо вводятся вручную, либо передаются из PDM-системы в виде специального файла. Температуры ПУ рассчитываются в подсистеме АСОНИКА-ТМ. Необходимые параметры материалов можно выбрать из БД, а в случае необходимости – идентифицировать. На основе информационной модели и библиотеки макросов формируется модель механического процесса, топология которой также описывается в виде макроса. Затем управляющая программа осуществляет запуск ANSYS в пакетном режиме и после завершения расчета формирует информационную модель несущей конструкции с точки зрения визуализации результатов. В постпроцессоре результаты моделирования

отображаются в виде полей при выбранном значении частоты или времени или полей среднеквадратических величин, амплитудно-временных и амплитудно-частотных характеристик результатов в контрольных точках или узлах модели, в виде деформаций, на основе которых разработчик может принять проектное решение. В случае превышения расчетных напряжений участков конструкции над допустимыми возможно осуществить подбор виброизоляторов в программе «ВИБРОЗАЩИТА». Ускорения в местах крепления ПУ к несущей конструкции, полученные при моделировании, являются входными воздействиями при моделировании механических процессов в ПУ и передаются в подсистему АСОНИКА-ТМ. Все исходные данные и результаты моделирования сохраняются в PDM-системе.

Разработан общий алгоритм графического интерфейса синтеза конструкции БПС из типовых элементов, представленный в виде графа «и-или» на рис 6.



Рис. 6. Дерево графа синтеза нетиповой конструкции БПС из типовых элементов

На основе представленного алгоритма разработаны алгоритмы человеко-машинных графических интерфейсов синтеза моделей типовых и нетиповых конструкций блоков цилиндрического, этажерочного, кассетного, сложного этажерочного типов и шкафов БПС. На рис. 7 изображена несущая конструкция БПС – блок сложного этажерочного типа.

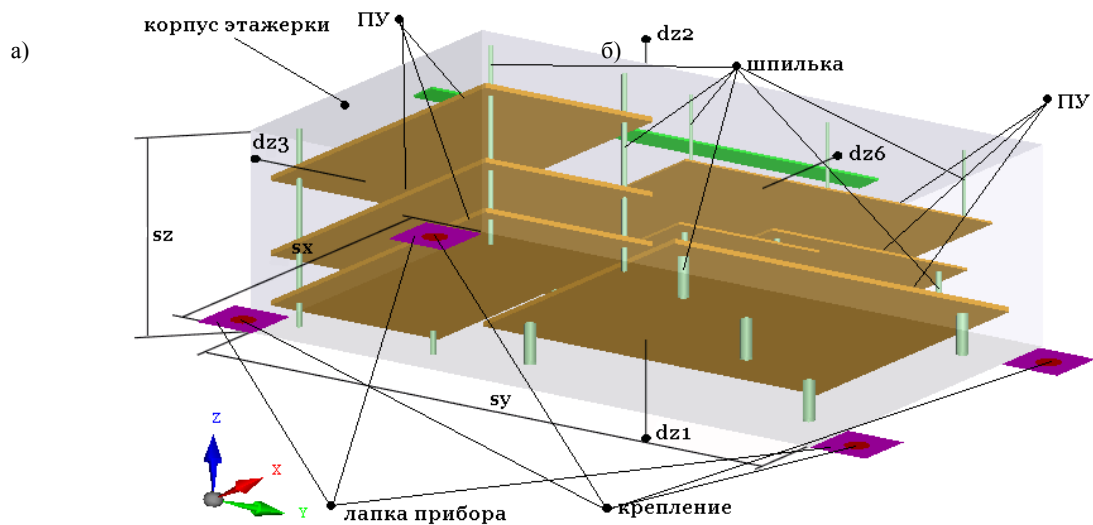


Рис. 7. Внешний вид несущей конструкции блок сложного этажерочного типа (а – вид спереди, б – вид сзади)

Разработана структура справочной БД по параметрам ЭРИ и материалам (рис. 8). Данная структура позволяет формировать полную условную запись ЭРИ в зависимости от шаблона записи и параметров, входящих в обозначение ЭРИ, содержит модели вариантов установки ЭРИ, а также возможность создания новых моделей, что значительно сокращает время на ввод ЭРИ в БД. Возможно создание дополнительных таблиц по числовым, функциональным, строковым, логическим, текстовым и графическим параметрам ЭРИ без участия программиста. Разработанная структура содержит необходимые средства, позволяющие придавать реалистичность изображению ЭРИ в пространстве, что значительно БД значительно доступной разработчику.

В четвёртой главе разработана методика моделирования комплексных механических и тепловых процессов в БПС на основе человеко-машинных интерфейсов, которая, в отличие от существующих, позволяет передавать механическое и тепловое воздействие по всем уровням иерархии конструкций БПС, что влияет на адекватность результатов моделирования и на выполнение требований технических условий (ТУ) на ЭРИ по механическим и тепловым характеристикам.

Методика позволяет уменьшить трудоемкость операций ввода и редактирования конструкций БПС и анализа результатов моделирования. Сокращение времени при этом, по сравнению с использованием универсальной САЕ-системы, составляет до 95% на ввод конструкции и до 80% на анализ результатов в зависимости от опыта пользователя.

Разработанная методика уменьшает влияние человеческого фактора на адекватность моделирования, что приводит к повышению показателей надежности разрабатываемой аппаратуры.

16

Основные положения разработанной методики:

1. Согласно требованиям ТЗ формируется первоначальная информация о проекте: основные конструктивные решения, применяемый материал, эскиз конструкции, тип и параметры механического и теплового воздействия, используемые типовые элементы конструкции БПС.

2. Синтез геометрии несущей конструкции, задание параметров материалов элементов конструкции с допустимыми значениями напряжений, температур элементов, параметров сетки разбиения конструкции на конечные элементы, задание параметров закрепления конструкции на объекте при помощи специализированных человеко-машинных графических интерфейсов ввода.

3. Задание механических и тепловых воздействий по осям координат.

4. Выбор вида теплового и механического воздействия и проведение расчета.

5. Анализ полученных результатов с применением универсального графического интерфейса вывода и их сохранение в PDM-системе.

6. Принятие решения об обеспечении стойкости несущей конструкции к тепловым и механическим воздействиям.

7. В случае превышения расчетных напряжений над допустимыми проводится редактирование геометрии конструкции, параметров материалов или применение программы «ВИБРОЗАЩИТА».

8. В случае корректировки несущей конструкции повторение расчета и анализ результатов моделирования. Корректировка конструкции продолжается до тех пор, пока не будут обеспечены требования к стойкости конструкции БПС к внешним тепловым и механическим воздействиям.

9. Формирование отчета, его сохранение в PDM-системе хранения и управления данными о БПС.

10. Моделирование печатных узлов конструкции БПС:

а) ввод или редактирование ПУ с заданием допустимых ускорений ЭРИ;

б) моделирование ПУ на воздействие комплексных тепловых механических воздействий.

в) анализ полученных результатов с применением универсального графического интерфейса вывода результатов моделирования ПУ и их сохранение в PDM-системе.

11. Принятие решения об обеспечении стойкости ПУ и ЭРИ к тепловым и механическим воздействиям. Проектное решение принимается на основе ограничений (1) и (2).

$$t_{ЭРИi}^{don} - k_i(t_{ЭРИi} + \Delta_i) \geq 0, \quad a_{ЭРИi}^{don} - k_i(a_{ЭРИi} + \Delta_i) \geq 0, \quad (2)$$

где $a_{ЭРИi}$ – максимальное расчетное значение ускорения ЭРИ; $t_{ЭРИi}$ – максимальное расчетное значение температуры ЭРИ; $a_{ЭРИi}^{don}$ – допустимое значение ускорения ЭРИ для заданного типа воздействия; $t_{ЭРИi}^{don}$ – допустимое значение температуры ЭРИ; k_i – коэффициент запаса ускорения или температуры; Δ_i – допуск на ускорение или температуру i -го ЭРИ.

12. В случае превышения расчетных напряжений участков ПУ или расчетных ускорений и значений температуры ЭРИ над допустимыми значениями – редактирование ПУ или редактирование несущей конструкции БПС и повторение расчета.

13. Сохранение исходных данных и результатов в PDM-системе.

14. Формирование карт тепловых и механических режимов работы ЭРИ и их сохранение в PDM-системе.

15. Формирование отчета и его сохранение в PDM-системе.

Рассмотрены примеры применения разработанной методики для БПС. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в практику проектирования ряда предприятий и в учебный процесс высших учебных заведений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Главным результатом работы является повышение эффективности процесса моделирования при проектировании конструкций БПС, отвечающих требованиям НД по тепловым и механическим характеристикам, повышение показателей надежности разрабатываемых БПС, сокращение сроков и стоимости их создания за счет применения человеко-машинных интерфейсов для синтеза и анализа проектных решений.

Основные научные теоретические и практические результаты работы состоят в следующем.

1. Исследованы особенности конструкций БПС с точки зрения моделирования механических и тепловых процессов.

2. Разработаны информационные модели типовых конструкций БПС, таких как ПУ, разъем ПУ, шпилька, направляющая, внутренний элемент, ребро жесткости, корпус, лапка корпуса, контрольная точка, а также несущих конструкций (блок цилиндрического, кассетного, этажерочного и сложного этажерочного типов, шкаф) с точки зрения визуализации исходных данных и результатов моделирования конструкций БПС при комплексных тепловых и механических воздействиях.

3. Разработаны алгоритмы человеко-машинных графических интерфейсов синтеза типовых и нетиповых конструкций блоков и шкафов БПС, позволяющих конструктору в короткие сроки собирать сложную модель несущей конструкции БПС из типовых элементов.

4. Разработана методика визуализации исходных данных и результатов моделирования конструкций БПС при комплексных тепловых и механических воздействиях, отличающаяся от известных наличием комплексных информационных, топологических и математических моделей механических и тепловых процессов, позволяющая уменьшить влияние человеческого фактора на адекватность результатов моделирования механических и тепловых процессов в конструкциях БПС.

5. Разработана и реализована структура автоматизированной подсистемы синтеза и анализа проектных решений БПС при комплексных тепловых и механических воздействиях, отличающаяся от существующих наличием препроцессора и постпроцессора для моделирования механических процессов в несущих конструкциях БПС в универсальной САЕ-системе, обеспечивающая удобный проектировщику БПС язык взаимодействия на базе человеко-машинных графических интерфейсов ввода-вывода, возможностью построить всю иерархию конструкций БПС от шкафа до отдельного ЭРИ для передачи воздействий и результатов моделирования между отдельными уровнями иерархии.

6. Разработана и реализована структура справочной базы данных параметров ЭРИ и материалов конструкций, позволяющая значительно сократить время на ввод геометрических, физико-механических, тепловых и др. параметров ЭРИ за счет создания моделей вариантов установки ЭРИ, обеспечивающая реалистичное представление ЭРИ, что делает работу с БД более доступной, и позволяющая создавать дополнительные таблицы параметров ЭРИ без участия программиста.

7. Разработана методика синтеза и анализа проектных решений БПС при комплексных воздействиях на основе человеко-машинных интерфейсов, позволяющая в минимальные сроки и с минимальными затратами принимать решение об обеспечении стойкости БПС к комплексным тепловым и механическим воздействиям и о повышении показателей надежности разрабатываемых БПС.

Разработанная автоматизированная подсистема моделирования печатных узлов БПС на комплексные тепловые и механические воздействия АСОНИКА-ТМ используется в рамках Министерства обороны РФ для проведения контроля за правильностью применения изделий электронной техники в аппаратуре специального назначения, рекомендуется комплексом стандартов "МОРОЗ-6" для применения в процессе проектирования и замены испытаний на ранних этапах проектирования согласно РДВ 319.01.05-94, ред.2-2000.

Внедрено созданное методическое и программное обеспечение в практику ведущих Российских предприятий при проектировании БПС таких объектов как, подводные лодки,

крылатые ракеты, системы бортовой телеметрии, спутниковые навигационные системы и системы космической связи.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Русановский С.А., Шалумов А.С. Математическое и программное обеспечение человеко-машинных интерфейсов для моделирования бортовых приборов и систем./Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий. М.: РАН, 2007. 168с.
2. Русановский С.А. Применение человеко-машинных интерфейсов в обучении студентов моделированию систем. Повышение качества непрерывного профессионального образования//Материалы Всерос. научн.-методич. конф. «Повышение качества непрерывного профессионального образования» с международным участием в 2 ч. Красноярск. ИПЦ КГТУ. 2006 Ч.2-С.210-211
3. Русановский С.А., Шалумов А.С.,// Моделирование конструкций с применением человеко-машинных интерфейсов. Электронные и электромеханические системы и устройства: Тезисы докладов XVII научно-технической конференции. Г. Томск:ФГУП «НПЦ «Полус», 2006 . С. 244-247
4. Русановский С.А., Шалумов А.С. //Интерфейс для моделирования сложных конструкций печатных узлов приборов и систем. Электронные и электромеханические системы и устройства: Тезисы докладов XVII научно-технической конференции. Г. Томск:ФГУП «НПЦ «Полус», 2006 . С. 247-248
5. Русановский С.А., Шалумов А.С., Организация обмена данными при моделировании тепловых и механических процессов в приборах и системах. //Электронные и электромеханические системы и устройства: Тезисы докладов XVII научно-технической конференции. Г. Томск:ФГУП «НПЦ «Полус», 2006 . С. 248-250
6. Сонькин М.А., Слядников Е.Е., Русановский С.А. Информационная технология интеграции компонентов многоуровневых систем с пакетной передачей данных.// Известия Томского политехнического университета, Т 309, № 6, 2006. С.158-164
7. 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(14). С. 22-26