

## **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. КОЭФФИЦИЕНТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ**

*А.С. Шалумов, Генеральный директор ООО  
«НИИ «АСОНИКА», профессор, доктор технических наук  
als@asonika-online.ru*

Проектирование конструкций радиоэлектронных средств (РЭС) с учетом механических воздействий на сегодняшний день усложняется следующими факторами: 1) наличием в РЭС тысяч радиоэлементов (РЭ), механические характеристики которых надо определить; 2) постоянным ростом интенсивности механических воздействий из-за увеличения скоростей подвижных объектов; 3) многообразием видов механических воздействий - вибрации, удары, линейные ускорения, акустические шумы; 4) одновременным приложением к аппаратуре двух и более видов механических воздействий, в связи с чем в пособии введено понятие «сложное механическое воздействие»; 5) комплексным характером приложения тепловых и механических воздействий, приводящим к влиянию тепловых процессов на механические; 6) ограничениями по массе; 7) случайным характером разброса параметров. Рассмотрим более подробно влияние указанных факторов на процесс проектирования конструкций РЭС.

Механические воздействия вызывают от 30 до 50% отказов РЭС. Подавляющее большинство отказов РЭС из-за механических воздействий связано с выходом за пределы, установленные нормативно-технической документацией (НТД), механических характеристик конструкций РЭС - ускорений, перемещений, напряжений, что приводит к нарушению прочности и устойчивости работы аппаратуры. При этом важно отметить, что ускорение на каждом РЭ не должно превышать допустимое по техническим условиям (ТУ) значение. Кроме того, к нарушениям прочности РЭС часто приводит накопление усталостных повреждений в выводах РЭ и их разрушение. В связи с этим время до усталостного разрушения выводов РЭ, которое не должно быть меньше суммарной длительности механических воздействий на аппаратуру в условиях эксплуатации, также отнесено в пособии к механическим характеристикам.

Конструкции бортовых РЭС обычно подвержены вибрационным воздействиям с параметрами: диапазон вибраций 20...2000 Гц, уровень ускорений гармонической вибрации и среднеквадратических ускорений случайной вибрации до 50 g, - которые имеют тенденцию дальнейшего роста; температура участков конструкций бортовой аппаратуры достигает +85 °С. В этих условиях часто не удается избавиться от резонансов в конструкции, что приводит к превышению допустимых ускорений РЭ, перемещений и напряжений в элементах конструкций. При вибрационных воздействиях в выводах РЭ возникают знакопеременные механические напряжения. Это приводит к накоплению усталостных повреждений в материалах выводов и при длительном воздействии вибрации может привести к обрыву выводов, то есть к потере работоспособности РЭ. Анализ приблизительно 400 отчетов, собранных за 8 лет по результатам механических испытаний приборов и их комплектующих, показал, что усталость является причиной 80% отказов электронных элементов. В полной мере эти данные относятся к испытаниям на воздействие широкополосной случайной вибрации.

Кроме вибрации, аппаратура может подвергаться ударным воздействиям, возникающим при транспортировке, монтаже или эксплуатации, при действии ударной волны и т.д. В процессе удара нагрузки к элементам аппаратуры прикладываются в течение короткого промежутка времени. Вследствие этого возникающие ускорения, перемещения и напряжения элементов аппаратуры могут достигать больших значений и вызывать различные повреждения. Интенсивность ударного воздействия зависит от формы, амплитуды

и длительности ударного импульса. При периодическом приложении ударных импульсов блок РЭС на упругих опорах приходит в колебательное движение. Таким образом, возникает необходимость одновременной защиты от ударов и вибраций.

Линейные ускорения характерны для всех объектов, движущихся с переменной скоростью (например, при разгоне, торможении). Влияние линейных ускорений на детали конструкций и РЭ обусловлено инерционными силами, которые могут достигать и во много раз превышать силы тяготения. При движении объекта по криволинейной траектории, например по дуге окружности, элементы конструкции аппарата будут испытывать центробежное ускорение. Трудность борьбы с влиянием линейных перегрузок заключается в том, что они практически не поддаются ослаблению. Только в случае кратковременного действия линейных перегрузок могут быть использованы некоторые конструктивные меры защиты. Во всех же остальных случаях обеспечение требований НТД по механическим характеристикам элементов конструкции может быть достигнуто только за счет увеличения их жесткости, что ведет к увеличению массы.

Воздействие акустического шума приводит к механическому возбуждению деталей и узлов конструкций РЭС, а также различных РЭ. Отличие данного вида возбуждения от вызванного механической вибрацией заключается в распределенном воздействии усилий, зависящих не только от уровня звукового давления, но и от площади изделия. При чисто механических воздействиях вибрация передается изделиям, главным образом, через точки крепления. В технических заданиях на разработку бортовых РЭС звуковое давление, создаваемое акустическим шумом, задается до 175 дБ в диапазоне частот от 10 до 10000 Гц. Давление в столь широком диапазоне частот может привести к существенным поломкам в аппаратуре, в том числе к усталостным, из-за резонансных колебаний.

Кроме того, в условиях эксплуатации на аппаратуру могут одновременно действовать несколько видов механических воздействий, например, вибрации, удары и акустический шум; линейное ускорение и акустический шум и т.д. Игнорирование этого факта может привести к тому, что реально механические воздействия окажутся более жесткими, чем предполагалось при проектировании. Поэтому в пособии вводится понятие «сложное механическое воздействие», что означает одновременное приложение к аппаратуре двух и более видов механических воздействий.

Наличие тепловыделяющих элементов в составе конструкций РЭС в сочетании с широким диапазоном температур окружающей среды приводит к появлению паразитного теплового фактора, оказывающего существенное влияние на механические процессы, в том числе за счет появления температурных напряжений. При этом от температуры зависят такие физико-механические параметры, как модуль упругости, коэффициент механических потерь (логарифмический декремент затухания колебаний (ЛДЗК)), предел усталости. В литературе представлены данные зависимости для отдельных материалов конструкций, применяемых в РЭС. Квалификационные испытания цифровых блоков РЭС показали, что около 30% отказов отдельных элементов, которые были зафиксированы при воздействии низкой и высокой температур, в действительности обусловлены повреждением этих элементов в процессе комплексного воздействия вибраций и температуры. Таким образом, необходим учет комплексности воздействия механических факторов и температуры для адекватного принятия мер по обеспечению требований НТД по механическим характеристикам.

Силы сопротивления, вызывающие затухание колебаний, играют существенную роль в динамических процессах, протекающих в конструкциях РЭС при механических воздействиях. Многочисленные исследования показывают, что на механические потери в материале конструкции при колебаниях оказывает влияние ряд факторов, воздействие каждого из которых при различных условиях циклического деформирования может оказаться неодинаковым. Механические потери в материалах конструкций РЭС, в отличие от дерева, бетона и других строительных материалов, в значительной мере и обычно не ли-

нейно зависят от амплитуды циклических напряжений и практически не зависят от частоты в достаточно широком диапазоне ее изменения (рис. 1).

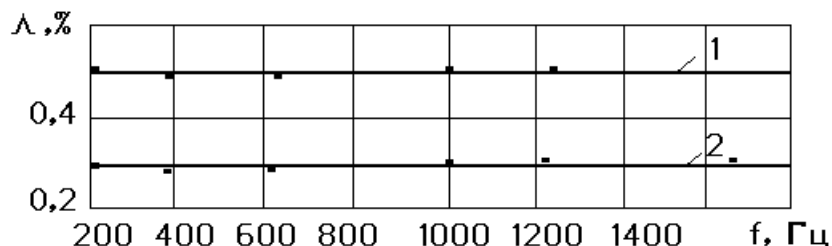


Рис. 1. Зависимости ЛДЗК от частоты продольных (1) и изгибных (2) колебаний для стали Ст.2 при напряжениях 100 и 50 МПа соответственно

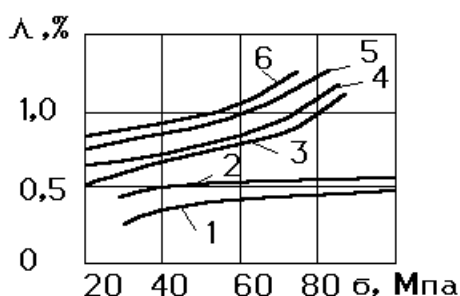


Рис. 2. Зависимости ЛДЗК от напряжения для алюминиевого сплава Д16:  
1—  $-86^{\circ}\text{C}$ ;  
2—  $-50^{\circ}\text{C}$ ; 3—  $+20^{\circ}\text{C}$ ; 4—  $+50^{\circ}\text{C}$ ; 5—  $+100^{\circ}\text{C}$ ; 6—  $+150^{\circ}\text{C}$

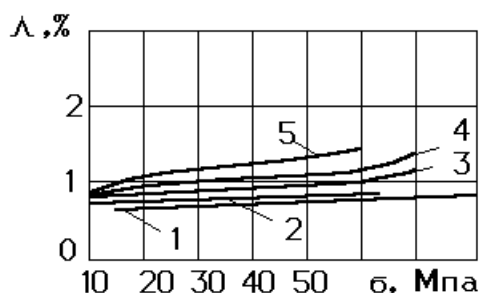


Рис. 3. Зависимости ЛДЗК от напряжения для алюминиево-магниевого сплава АМг:  
1—  $+20^{\circ}\text{C}$ ; 2—  $+50^{\circ}\text{C}$ ;  
3—  $+100^{\circ}\text{C}$ ; 4—  $+150^{\circ}\text{C}$ ;  
5—  $+200^{\circ}\text{C}$

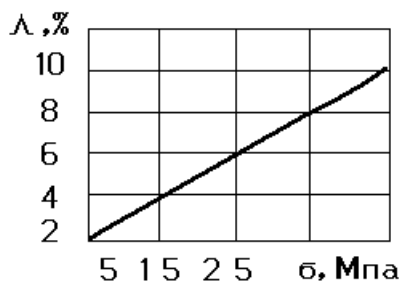


Рис. 4. Зависимость ЛДЗК от напряжения для стекло-текстолита СФ1-35 при  $20^{\circ}\text{C}$

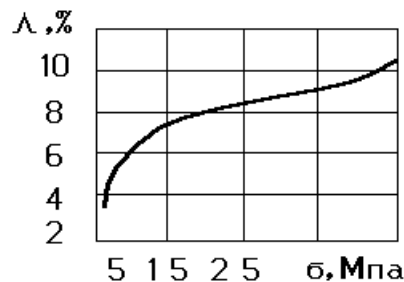


Рис. 5. Зависимость ЛДЗК от напряжения для стеклотекстолита ВФТ-С при  $20^{\circ}\text{C}$

Механические потери в материале зависят также от вида напряженного состояния, обусловливаемого видом колебаний (продольные, крутильные, поперечные, изгибно-крутильные, продольно-крутильные и т.п.). Механические потери зависят от температуры материала. С повышением температуры демпфирующие свойства материалов, как правило, возрастают.

Практически в любых РЭС все входные воздействия, выходные характеристики являются случайными величинами или процессами прежде всего из-за технологических разбросов параметров материалов, а также эксплуатационных разбросов параметров эле-

ментов под воздействием случайных внешних факторов. Поэтому на определенных этапах конструкторского и технологического проектирования РЭС необходимо проводить исследования разбросов параметров с применением вероятностных моделей. Если при проектировании РЭС возникает необходимость дополнительной защиты от механических воздействий, то конфликтными становятся ограничения по массе, особенно для авиационной и космической техники. Поэтому актуальной является задача оптимизации параметров конструкций РЭС, отвечающих требованиям НТД по механическим характеристикам, с целью снижения массы.

Указанные факторы определяют необходимость тщательной отработки конструкций и документации на всех этапах проектирования. Традиционная технология проектирования, где предпочтение отдавалось стендовым испытаниям, устарела. По оценкам специалистов до 50% летательных аппаратов приземляются с отказами аппаратуры. При этом 50% отказов вызвано несоответствием стендовых испытаний и реальных условий эксплуатации. Испытания, не интегрированные с расчетными экспериментами, являются малоинформативными из-за невозможности установить датчики во многих точках конструкции, не позволяют провести исследования в критических режимах работы изделия из-за его разрушения, не позволяют распространить результаты испытаний отдельных образцов на все другие экземпляры изделия данного типа из-за случайных значений разбросов параметров.

Испытательное оборудование для испытаний на различные виды механических воздействий стоит достаточно дорого, например на воздействие случайной вибрации в 100...1000 раз дороже, чем для испытаний на воздействие гармонической вибрации. Сложные механические воздействия на современном оборудовании воспроизвести в полной мере практически невозможно. Испытания РЭС на комплексные тепловые и механические воздействия обойдутся примерно в 3...5 раз дороже, чем испытания на чисто механические воздействия, причем не для всех классов аппаратуры их можно воспроизвести в полной мере.

В условиях рыночной экономики предъявляются жесткие требования по срокам проектирования, трудоемкости и стоимости проектных работ. Для сравнения, трудоемкость работ, связанных с подготовкой и проведением испытаний на вибрационные и ударные воздействия конструкции 3-х этажной стойки на одном из оборонных предприятий, составила 17 чел. - дн. Трудоемкость расчета данной стойки на ЭВМ составила 2 чел. - дн. То есть в 8,5 раз ниже. Кроме того, по результатам как моделирования, так и испытаний были обнаружены отказы. В результате пришлось затратить еще несколько месяцев на доработку конструкции. Применив же на начальных этапах проектирования моделирование, удалось бы избежать значительных затрат в процессе доводки и отработки конструкции.

Существенную роль в повышении эффективности и качества процесса проектирования и сокращении сроков проектирования РЭС, отвечающих требованиям НТД по механическим характеристикам, играет обнаружение ошибок на ранних этапах проектирования. По мнению зарубежных специалистов, источником дефектов, проявляющихся под воздействием вибрации, температуры и влаги при эксплуатации и испытаниях, в 20...30% случаев являются ошибки конструирования и производства, обусловленные «человеческим» фактором, то есть ошибками человека-оператора. Анализ наиболее характерных ошибок конструкторской документации показывает, что большинство из них связано с неувязкой или отсутствием размеров, с неточностью компоновки. Эти ошибки, как правило, удается обнаружить по традиционной схеме отработки конструкторской документации. Однако обнаружить на ранних этапах ошибки, ухудшающие механические характеристики конструкций, а тем более принять обоснованное решение об изменениях в проекте без математического моделирования практически невозможно. Испытания, как уже отмечено, лишь фиксируют факт благоприятного или неблагоприятного исхода и не дают

информации о причинах ухудшении механических характеристик конструкции и, тем более, о путях улучшения конструкции. Представляется целесообразным включение математического моделирования в общую схему отработки качества конструкторских решений и документации.

Следует отметить трудности, возникающие при постановке и решении задачи расчета механических характеристик конструкций РЭС. Известно, что моделирование механических процессов в конструкциях РЭС основано на решении сложных нестационарных краевых задач математической физики. Математические и вычислительные трудности решения подобных задач определяются прежде всего сложной и неоднородной структурой конструкции, нелинейными характеристиками материалов, а также сложным характером внешних механических возмущений, которым подвергается нестационарная аппаратура. Существует множество различных вариантов конструкций РЭС. Выбор того или иного варианта определяется назначением, использованием и транспортировкой аппаратуры.

Так как подавляющее большинство отказов РЭС, как указывалось выше, является результатом выхода за пределы, установленные НТД, механических характеристик конструкций РЭС, необходимо на ранних этапах проектирования сосредоточить все усилия на расчете механических характеристик РЭС - ускорений РЭ, времени до усталостного разрушения выводов, перемещений и напряжений в элементах конструкции. Для получения механических воздействий на РЭ необходимо провести расчет несущих конструкций аппаратуры при заданных воздействиях. Решение задачи обеспечения требований НТД по механическим характеристикам РЭС на ранних этапах проектирования требует, с одной стороны, упрощения процесса моделирования, а с другой стороны, учета всех изложенных выше факторов. Причем расчет должен проводиться для каждого вывода РЭ.

В связи с тем, что использование детальной модели требует большого объема вычислений, особенно при решении задач оптимизации, и, учитывая жесткие требования по срокам проектирования, для большинства просматриваемых вариантов структуры конструкций должна выполняться лишь ориентировочная оценка механических характеристик конструкций РЭС (вплоть до каждого РЭ) на основе макромоделей. Такая оценка позволит на ранних этапах проектирования без существенных затрат вычислительных ресурсов, исходя из требований НТД по механическим характеристикам, выбрать тип конструкции, элементную базу, размещение РЭ, варианты креплений, конструкционные материалы, отсеять большинство неперспективных вариантов и оставить для тщательного анализа малое число вариантов. Использование типовых конструкций - шкафов, стоек, блоков, ПУ, РЭ - приводит также к упрощению и ускорению проектирования: так, типовые конструкции, а значит и их макромодели, разрабатываются однократно, но в различных проектах применяются многократно.

Ввиду сложности конструкций РЭС (десятки тысяч РЭ) сама оценка возможна только при наличии средств автоматического перехода от реальной конструкции к макромодели, для чего прежде всего необходимо решить задачу формализации получения математических макромоделей механических процессов в типовых конструкциях РЭС. Входная информация должна задаваться в доступной для конструктора РЭС форме и с использованием привычной для него терминологии. Ввод графической и текстовой информации должен осуществляться на уровне конструкции РЭС, а не на уровне модели. Использование базы данных по конструкционным материалам и РЭ и интерфейса с системой P-Cad позволяет существенно сократить трудоемкость ввода данных о конструкции. Кроме данных о конструкции, входная информация включает в себя условия эксплуатации, то есть заданные тепловые и механические воздействия, а также задание на расчет, содержащее информацию о цели расчета, о контролируемых параметрах. При этом в зависимости от типа конструкции, анализируемой пользователем, вида воздействия и цели расчета в программе должен включаться тот или иной алгоритм, который направляет пользователя по

заранее продуманному пути. Выходная информация также должна выдаваться в доступной для конструктора РЭС форме.

В случае сложной конструкции РЭС (шкаф, стойка, блок) целесообразно представление конструкции в виде некоторой иерархической структуры, каждый следующий уровень которой входит в виде составной части в предыдущий уровень. Такое представление не только упрощает процедуру описания конструкции, но и существенно упрощает последующий процесс моделирования, анализа чувствительности, оптимизации, то есть всю процедуру решения задачи проектирования. Построение иерархической структуры конструкции основано на том предположении, что деформации некоторых элементов и узлов можно считать пренебрежимо малыми. Такие элементы и узлы полагаются недеформируемыми (т.е. абсолютно жесткими) на данном этапе расчета и рассматриваются как следующий, по отношению к данной конструкции, более низкий иерархический уровень. Иначе говоря, сложная конструкция рассматривается как совокупность несущей конструкции и недеформируемых масс. При дальнейшей детализации, на следующем этапе расчета, каждая масса рассматривается как несущая конструкция, включающая свои недеформируемые массы и т.п. Более подробно формализованное описание конструкции будет рассмотрено дальше. Здесь же отметим, что изложенное представление иерархической структуры конструкции позволяет унифицировать форму представления исходных данных; независимо от места конструкции в общей иерархии, входная информация должна содержать данные о ее конфигурации и структуре, о связи с предыдущим и последующим уровнями.

Возможность эксплуатации программных комплексов на уровне конструктора, оперирующего привычными и доступными терминами и обозначениями, является одним из необходимых условий широкого использования этих комплексов в конструкторской практике. К наиболее важным требованиям, с точки зрения организации пользовательского сервиса, относится простота описания объекта и уровень автоматизации процесса формирования модели, включая этапы трансляции входных данных, синтеза структуры модели на выбранном базисе элементов, описания неоднородной структуры элементов модели, формирования матриц систем уравнений, описывающих состояние модели. Здесь следует особо отметить возможность автоматизации синтеза дискретной структуры. Основная идея состоит в том, что при анализе описания объекта и сопоставлении структуры объекта и размеров его элементов с заданной пользователем степенью детализации дискретной структуры (размерами дискретных элементов, шагами дискретизации) определяется тип элемента, который интерпретирует ту или иную связь в модели. Автоматизация этой процедуры существенно упрощает и сокращает весь процесс подготовки данных для решения задач.

Таким образом, для решения проблем проектирования конструкций РЭС с учетом механических воздействий нужна специальная информационная технология, которая позволила бы обеспечить: а) многовариантное конструирование; б) решение неразрешимых задач путем прерывания автоматических вычислений и передачи управления человеку-оператору; в) оперативное задание и отмену контрольных точек.

Учитывая сложность расчетов, проведение которых в современных условиях возложено на разработчика РЭС, и жесткие ограничения по срокам и стоимости проектных работ, реализовать подобную информационную технологию возможно только в автоинтерактивном режиме. К алгоритмам автоинтерактивной системы конструирования предъявляются следующие требования:

1. Проектные алгоритмы должны выполняться достаточно быстро (от секунд до нескольких минут). При этом допустимо снижение качества получаемых результатов по формальным критериям, так как в автоинтерактивном режиме за достижением требуемого качества результатов проектирования следит конструктор (выполнение этого требования возможно только за счет макро моделирования).

2. Алгоритмы должны выдавать всю необходимую (дифференциальную и интегральную) информацию о ходе и результатах конструирования преимущественно в графическом виде для того, чтобы конструктор мог оценить и принять решение по полученным результатам (для выполнения этого требования необходимы специализированные в области РЭС графические интерфейсы ввода-вывода).

Следовательно, научной основой информационной технологии является методология автоинтерактивного расчета, решающая указанные выше задачи, а практической реализацией в качестве инструментария проектировщика - соответствующая проблемно-ориентированная подсистема.

Для определения резонансных амплитуд ускорений и механических напряжений в элементах конструкций РЭС необходимо принять гипотезу о диссипативной силе. Для конструкций с демпфирующими слоями из полимерных материалов широкое распространение получила экспериментально проверенная гипотеза, согласно которой диссипативная сила принимается пропорциональной скорости деформации.

Для конструкций из металлов и жестких полимеров наиболее широко применяется гипотеза Сорокина, в соответствии с которой диссипативная сила пропорциональна упругой восстанавливающей силе, но сдвинута относительно последней на угол  $\pi/2$ . Так как в конструкциях РЭС применяются в основном именно такие материалы, то в дальнейшем при решении задач мы будем использовать данную гипотезу, сущность которой состоит в комплексном представлении упругих постоянных материала. Однако определенные особенности физико-механических свойств полимеров потребовали дополнительных доказательств правомерности использования гипотезы Сорокина для макро моделирования механических процессов в конструкциях РЭС, рассматриваемых в работе.

В полимерных и композиционных материалах напряжение в данной частице в данный момент времени зависит не только от текущих значений деформаций, температуры и других определяющих параметров, но и от значений этих параметров во все предшествующие моменты времени - от истории процесса деформирования данной частицы. Зависимость от истории проявляется, в частности, в том, что в экспериментах на чистое растяжение имеют место такие явления, как ползучесть и релаксация. Ползучестью называют процесс изменения во времени  $t$  деформаций  $\varepsilon(t)$  при неизменных напряжениях  $\sigma(t)$ :

$$\varepsilon(t) = A\sigma(t) + \int_0^t n(t, \tau)\sigma(\tau)d\tau,$$

где  $A$  - модуль мгновенной податливости;  $n$  - ядро ползучести;  $\tau < t$  - переменная интегрирования.

Релаксация - процесс изменения напряжений во времени при неизменных деформациях:

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) - \int_0^t R(t, \tau)\varepsilon(\tau)d\tau,$$

где  $a$  - модуль мгновенной упругости;  $R$  - ядро релаксации.

К настоящему времени предложено несколько вариантов записи ядер релаксации и ползучести для устойчивых процессов деформирования. Эти ядра подбираются таким образом, чтобы учесть наличие бесконечно большой скорости деформирования или релаксации в начальный момент нагружения, когда значение  $t$  стремится к нулю, и конечную функцию процесса ( $\varepsilon = const$ ,  $\dot{\varepsilon} = 0$  или  $\sigma = const$  и  $\dot{\sigma} = 0$ ) при  $t \rightarrow \tau$ . Это дает возможность с помощью одних и тех же функций решать задачи и статического, и динамического типа с нагрузками, быстро меняющимися во времени. В расчетной практике большое применение нашли ядра, предложенные Ю.Н. Работновым и А.Р. Ржаницыным, М.А. Колтуновым. Для определения параметров ядер ползучести и релаксации на основе экспериментальных кривых ползучести разработан алгоритм, а для приближенных инженерных оценок - практически приемы, основанные на графических построениях.

Точное определение параметров ядер релаксации и ползучести материала представляет достаточную сложность. Кроме того, учет процессов релаксации и ползучести приводит к значительному усложнению моделей механических процессов и процесса их решения. Резко возрастает время расчетов по таким моделям, что противоречит цели данной работы. Поэтому необходимо определить, насколько важен учет этих процессов при макро моделировании механических процессов в конструкциях РЭС и можно ли ими пренебречь.

Наибольшей вязкостью в конструкциях РЭС обладают виброизоляторы. Проверив на их примере влияние процессов релаксации и ползучести на результаты макро моделирования, можно, в случае доказательства возможности пренебрежения этими процессами, обобщить данный вывод и на другие элементы конструкций РЭС, рассматриваемых в пособии. В качестве примера была взята задача о виброзащите изделий, устанавливаемых на транспортных средствах. Используя формулы, полученные с учетом процессов релаксации, были рассчитаны виброперемещения реальных объектов с конкретными виброизоляторами. Затем были проведены расчеты для тех же конструкций по рассматриваемой в пособии макро модели без учета релаксации. Сравнение полученных результатов показало, что пренебрежение процессами релаксации приводит к относительному отклонению значений виброперемещений на 3...5%, в то время как погрешность определения виброперемещений по макро моделям относительно экспериментальных результатов составляет до 30%. Таким образом, указанная погрешность полностью перекрывает диапазон отклонения результатов из-за пренебрежения процессами релаксации, что позволяет их не учитывать в работе при макро моделировании механических процессов в конструкциях РЭС.

Согласно гипотезе Сорокина комплексный модуль упругости выразится как

$$\bar{E} = E(1 + j\gamma),$$

где  $E$  - статический модуль упругости;  $\gamma$  - коэффициент механических потерь (КМП);  $j$  - мнимая единица.

КМП связан с ЛДЗК  $\Lambda$  следующим соотношением:

$$\gamma = \Lambda / \pi.$$

Для того, чтобы воспользоваться гипотезой Сорокина и учесть механические потери в материалах конструкций, нужно правильно определить КМП в зависимости от факторов, указанных выше для ЛДЗК. При этом основными факторами являются амплитуда напряжения, вид колебаний, форма колебаний, размеры образцов и их форма, температура.

Как видно из рис. 2 - 5 (графики приведены для изгибных колебаний), зависимости КМП от напряжения изгиба  $\sigma_u$  на линейном участке имеют вид:

$$\gamma = \gamma_0 + k_\sigma \sigma_u$$

где  $\gamma_0$  - КМП для линейного участка при  $\sigma_u = 0$ ;  $k_\sigma$  - коэффициент зависимости КМП от напряжения.

Чтобы воспользоваться данной зависимостью, нужно получить  $\gamma_0$ ,  $k_\sigma$ . Это делается путем идентификации данных параметров для различных форм колебаний, размеров образцов и их форм.

Взаимосвязь тепловых и механических процессов в конструкциях РЭС обусловлена двумя факторами, связанными с влиянием тепловых процессов на механические: 1) температурными зависимостями физико-механических параметров - модуля упругости  $E$  и КМП  $\gamma$  - для материалов конструкций РЭС; 2) температурными напряжениями, возникающими в статически неопределимых системах. Рассмотрим последовательно учет этих факторов.

1. Как показывают экспериментальные зависимости, с ростом температуры модуль упругости уменьшается, а КМП увеличивается. Как указывалось выше, температура участков конструкций бортовой аппаратуры достигает +85 °С. В данном диапазоне, как показывают экспериментальные графики, зависимости  $E$  и  $\gamma$  от температуры могут аппроксимироваться линейными полиномами. Уравнение прямой для зависимости модуля упругости от температуры в этом случае имеет вид:



$$E = E^{20} - K_E (T - 20)$$

где  $T$  - текущая температура;  $E^{20}$  - модуль упругости при  $T = 20$  °С;  $K_E$  - коэффициент пропорциональности.

Рассматривая зависимости ЛДЗК от температуры, можно сделать вывод, что при этом меняется как  $\gamma_0$  в зависимости от температуры, так и  $k_\sigma$ . Уравнения прямых для зависимостей  $\gamma_0$  и  $k_\sigma$  от температуры имеют вид:

$$\gamma_0 = \gamma_0^{20} + K_\gamma (T - 20),$$

$$k_\sigma = k_\sigma^{20} + K_k (T - 20),$$

где  $\gamma_0^{20}$  - значение  $\gamma_0$  при  $T = 20$  °С;  $k_\sigma^{20}$  - значение  $k_\sigma$  при  $T = 20$  °С;  $K_\gamma$ ,  $K_k$  - коэффициенты пропорциональности.

В табл.1 приведены значения  $K_E$ ,  $K_\gamma$ ,  $K_k$ ,  $E^{20}$ ,  $\gamma_0^{20}$ ,  $k_\sigma^{20}$  для ряда материалов, применяемых в конструкциях РЭС, полученные на основе исследований экспериментальных температурных зависимостей.

Таблица 1

Физико-механические параметры материалов для температурных зависимостей

Материал	$K_E$ , ГПа/°С	$K_\gamma$ , 1/°С	$K_k$ , 1/Па*°С	$E^{20}$ , ГПа	$\gamma_0^{20}$	$k_\sigma^{20}$ , 1/Па
Д16	0,018	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-14}$	73	$1,114 \cdot 10^{-3}$	$2,387 \cdot 10^{-11}$
Сталь	0,016	$-1,4 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-14}$	190	$1,648 \cdot 10^{-3}$	$1,137 \cdot 10^{-12}$
АМг	0,033	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-14}$	72	$1,778 \cdot 10^{-3}$	$1,064 \cdot 10^{-11}$
В95	0,033	$8,4 \cdot 10^{-7}$	$9,6 \cdot 10^{-14}$	72	$1,900 \cdot 10^{-3}$	$7,000 \cdot 10^{-12}$
МЛ5	0,011	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-14}$	44	$4,775 \cdot 10^{-3}$	$3,183 \cdot 10^{-11}$
Красная медь	0,018	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-14}$	115	$-1,213 \cdot 10^{-3}$	$2,668 \cdot 10^{-10}$
Гетинакс	0,136	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$-9,5 \cdot 10^{-13}$	8	$7,000 \cdot 10^{-3}$	$2,546 \cdot 10^{-10}$
СФ1-35	0,136	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$-9 \cdot 10^{-13}$	16,9	$2,637 \cdot 10^{-3}$	$7,458 \cdot 10^{-10}$