

**АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ  
В АВИАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ, С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ДЕМПИРУЮЩИХ СВОЙСТВ  
МАТЕРИАЛОВ**

*Шалумов Александр Славович*  
*д-р техн. наук, проф.,*  
*Шалумова Наталья Александровна*  
*канд. техн. наук, доц.,*  
*Шалумов Максим Александрович*  
*канд. техн. наук*  
*ООО «Цифровой двойник электроники»*

**ALGORITHM FOR MODELING MECHANICAL PROCESSES IN AVIATION ELECTRONICS, TAKING  
INTO ACCOUNT THE NONLINEARITY OF THE DAMPING PROPERTIES OF MATERIALS**

*Shalumov Alexander Slavovich*  
*Dr. sciences, prof.,*  
*Shalumova Natalya Alexandrovna*  
*Cand. tech. Sciences, Assoc.,*  
*Shalumov Maxim Alexandrovich*  
*Cand. tech. sciences*  
*LLC «Digital Twin of Electronics»*

**Аннотация.** Объектом исследования является авиационная электроника. Цель работы — разработка алгоритмов моделирования механических процессов в авиационной электронике для последующей реализации прототипа программно-методического комплекса создания цифровых двойников авиационной электроники.

Работа выполнялась по договору №91ГС1ЦТС10-D5/61789 от 23.09.2020 г. о предоставлении гранта на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на тему «Разработка прототипа программно-методического комплекса создания цифровых двойников авиационной электроники и его испытания» с Федеральным государственным бюджетным учреждением «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере».

**Annotation.** The object of research is aviation electronics. The purpose of the work is to develop algorithms for modeling mechanical processes in aviation electronics for the subsequent implementation of a prototype of a software and methodological complex for creating digital twins of aviation electronics.

The work was carried out under contract № 91GS1CTS10-D5/61789 dated September 23, 2020 on the provision of a grant for conducting research and development work on the topic «Development of a prototype of a software and methodological complex for creating digital twins of aviation electronics and its testing» with the Federal State budgetary institution «Fund for Assistance to the Development of Small Enterprises in the Scientific and Technical Sphere».

**Ключевые слова:** электроника, авиационная, математическое моделирование, механические процессы.

**Key words:** electronics, aviation, mathematical modeling, mechanical processes.

---

В основу алгоритма моделирования механических процессов, протекающих в авиационной электронике (АЭ), с учетом нелинейности демпфирующих свойств материалов положены следующие разработанные методы [1, 2]:

- метод математического моделирования и виртуализации испытаний АЭ на отсутствие резонансных частот в заданном диапазоне частот;
- метод математического моделирования и виртуализации испытаний АЭ на воздействие статических нагрузок (гравитации, давления, распределения температур);
- метод математического моделирования и виртуализации испытаний АЭ на виброустойчивость и вибропрочность воздействием синусоидальной или случайной широкополосной вибрации;
- метод математического моделирования и виртуализации испытаний АЭ на ударную устойчивость и ударную прочность при воздействии одиночного и многократного механического удара;
- метод математического моделирования и виртуализации испытаний АЭ на воздействие линейного ускорения;
- метод математического моделирования и виртуализации испытаний АЭ на воздействие акустического шума.

Конечной целью математического моделирования и виртуализации испытаний АЭ на отсутствие резонансных частот в заданном диапазоне частот является их исключение с применением моделирования механических процессов в АЭ.

Моделирование на обнаружение резонансных частот проводят:

- для определения соответствия требований ГОСТ 16962–71, согласно которым АЭ без виброизоляторов и их отдельные узлы и детали с различной степенью жёсткости (I, II, III) не должны иметь резонансных частот соответственно в следующих диапазонах: до 25, до 40, до 100 Гц;

- для определения отсутствия или наличия резонансных частот в АЭ, установленной на виброизоляторах, в диапазоне до 25 Гц;

- для определения возможности проведения ускоренных испытаний на вибропрочность и выбора метода этих испытаний;

- для получения сведений о резонансных частотах при необходимости включения этих сведений в документы по применению или в справочники.

Моделирование на обнаружение резонансных частот проводится с целью проверки способности АЭ выполнять свои функции и сохранять свои параметры в соответствии с нормативной документацией.

Алгоритм проведения математического моделирования АЭ на отсутствие резонансных частот в заданном диапазоне частот:

1) Частотами резонанса АЭ считаются частоты, при которых амплитудное значение виброперемещения или виброускорения каких-либо точек АЭ превышает в 2 или более раз амплитудное значение виброперемещения или виброускорения точек крепления АЭ к столу вибратора.

2) Моделированию на обнаружение резонанса отдельной АЭ, элементов и сборочных единиц АЭ подвергается в трех взаимно перпендикулярных направлениях в требуемом частотном диапазоне и при двукратной перегрузке.

3) Выбираются пониженные ускорения, не превышающие 2 g, в диапазоне частот 10 ... 150 Гц. На конструкцию АЭ действует гармоническая вибрация с данными параметрами. Резонансные частоты фиксируются. В заданном диапазоне их может быть несколько. Но может не быть ни одной резонансной частоты.

4) Плавно изменяя частоты и при этом поддерживая постоянное ускорение, можно осуществить поиск резонансных частот. Нужно подобрать такую скорость изменения частоты, чтобы не пропустить резонансную частоту и успеть её зарегистрировать. Но она должна быть больше чем одна октава в минуту (октавой считается диапазон частот, у которого отношение высшей частоты к низшей равно двум).

5) Оцениваемыми характеристиками являются резонансные частоты АЭ.

6) Для определения резонансных частот в АЭ проводится конечно-элементный анализ.

7) Для определения резонансных частот в АЭ, установленной на виброизоляторах, используется система дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагранжа с шестью степенями свободы.

8) Наличие корректной 3D-модели АЭ.

9) Наличие физико-механических параметров материалов АЭ, используемых в конечно-элементной модели.

Коэффициент потерь при механических колебаниях (КПМК) в зависимости от напряжения изгиба  $\sigma_n$  на линейном участке вычисляется по формуле [1]:

$$\gamma = \gamma_0 + k_\sigma \sigma_n,$$

где  $\gamma_0$  - КПМК для линейного участка зависимости КПМК от напряжения изгиба  $\sigma_n$  при  $\sigma_n = 0$ ;  $k_\sigma$  - коэффициент зависимости КПМК от напряжения.

Некоторые физико-механические параметры материалов АЭ существенно зависят от температуры. Прежде всего это касается неметаллов, например, материалов печатных плат и демпфирующих материалов. Для них сильно зависимыми от температуры являются упругие и демпфирующие характеристики.

При увеличении температуры модуль упругости снижается, то есть упругость снижается:

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

где  $T$  - действующая температура;  $E^{20}$  - модуль упругости при  $T = 20$  °С;  $K_E$  - параметр, учитывающий упругие свойства материала.

При этом КПМК растёт, то есть диссипативные свойства возрастают, меняются обе характеристики КПМК. Уравнения температурных зависимостей имеют вид:

$$\gamma_0 = \gamma_0^{20} + K_\gamma(T - 20), \quad (1)$$

$$k_\sigma = k_\sigma^{20} + K_k(T - 20), \quad (2)$$

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.

Данные параметры могут быть получены путём идентификации.

10) Наличие следующих параметров виброизоляторов:

- коэффициент жёсткости по оси X;
- коэффициент жёсткости по оси Y;
- коэффициент жёсткости по оси Z;
- значение КПМК по оси X при  $\sigma_{и} = 0$ ;
- значение КПМК по оси Y при  $\sigma_{и} = 0$ ;
- значение КПМК по оси Z при напряжении растяжения-сжатия  $\sigma_{p-c}=0$ ;
- коэффициент зависимости КПМК по оси X от напряжения изгиба;
- коэффициент зависимости КПМК по оси Y от напряжения изгиба;
- коэффициент зависимости КПМК по оси Z от напряжения растяжения – сжатия.

Данные параметры могут быть получены путём идентификации.

11) Параметры гармонической вибрации:

- ускорение 1 g;
- диапазон частот 10 ... 150 Гц.

12) Проводится идентификация физико-механических параметров материалов АЭ в случае их отсутствия.

При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и изготавливаются макеты пластин для испытаний.

Входные данные:

1. Параметры плоской конструкции:

- габаритные размеры;
- шаги сетки по осям координат в плоскости конструкции;
- количество опор;
- диаметр опоры;
- расстояние от края до центра опоры.

2. Файлы с экспериментальными данными:

- зависимость виброускорения от частоты в центре пластинки при воздействии гармонической вибрации;
- зависимость ударного ускорения от времени в центре пластинки при ударном воздействии;

3. Начальные значения идентифицируемых параметров материала.

4. Диапазон изменения идентифицируемых параметров материала.

5. Максимальное количество итераций.

6. Ошибка определения резонансной частоты.

7. Ошибка определения виброускорения.

8. Ошибка определения ударного ускорения.

9. Резонансная частота (экспериментальная).

10. Резонансное ускорение (экспериментальное).

13) Проводится идентификация параметров виброизоляторов в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации системы виброизоляции, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и приготавливаются образцы виброизоляторов для испытаний.

14) Идентифицированные параметры материалов АЭ и параметры виброизоляторов заносятся в базу данных для использования в процессе моделирования.

15) Проводится подготовка моделей:

- 3D-моделей в формате STEP конструкций АЭ без виброизоляторов в CAD-системах;
- 3D-моделей конструкций АЭ, установленных на виброизоляторах, в специализированных интерфейсах.

16) Проводится импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций в системе моделирования АЭ на механические воздействия.

17) Проводятся виртуальные испытания на отсутствие резонансных частот в заданном диапазоне частот с применением моделирования механических процессов в АЭ на воздействие гармонической вибрации. Определяются зависимости ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольных точках или в системах виброизоляции, по которым выявляются резонансные частоты.

18) По результатам виртуальных испытаний составляется отчёт, в котором даётся информация о наличии или отсутствии резонансных частот. Протокол виртуальных испытаний должен содержать следующую информацию:

- описание модели;
- график входного воздействия гармонической вибрации на модель;

- график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке модели;
- идентифицированные параметры;
- график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке изделия;
- выводы о наличии резонансных частот.

Моделирование на воздействие статических нагрузок (гравитации, давления, распределения температур) проводится с целью проверки способности АЭ выполнять свои функции под их действием, которые в общем случае могут быть вызваны:

- разностью давления;
- статической инерционной нагрузкой под действием собственного веса (гравитацией);
- распределением температур (тепловым расширением);
- одновременным воздействием всех вышеперечисленных факторов.

Алгоритм проведения математического моделирования АЭ на воздействие статических нагрузок:

1) Проводится идентификация физико-механических параметров материалов АЭ в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и изготавливаются макеты пластин для испытаний.

2) Идентифицированные параметры материалов изделия заносятся в базу данных для использования в процессе моделирования.

3) Проводится подготовка 3D-моделей в формате STEP конструкций АЭ без виброизоляторов в CAD-системах.

4) Проводится импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций в системе моделирования АЭ на механические воздействия.

5) Задаются характеристики давления. Оно может быть задано для отдельно взятой поверхности. Также оно может быть задано для группы поверхностей.

6) Задаются характеристики гравитации. В большинстве случаев требуется смоделировать действие силы тяжести как частный случай силы гравитации. Для этого нужно задать ось гравитации, совпадающую с вертикальной осью модели, а ускорение задать равным ускорению свободного падения на Земле ( $9.81 \text{ м/с}^2$ ). Направление гравитации должно быть против вертикальной оси модели.

7) Задаются характеристики теплового расширения. Задаются начальное и конечное значения температур, полученные по результатам испытаний на воздействие повышенной рабочей и предельной температуры среды.

8) Задаются характеристики давления, гравитации и теплового расширения для комбинированного расчёта. При данном виде расчёта напряжения вызываются одновременным действием давления, гравитации и теплового расширения конструкции.

9) Для определения перемещений и механических напряжений в АЭ без виброизоляторов проводится конечно-элементный анализ.

При этом не учитываются демпфирование и инерция.

Оцениваемыми характеристиками являются перемещения по всем осям и суммарные, а также механические напряжения в конструкциях АЭ.

10) Проводятся виртуальные испытания АЭ на:

- воздействие давления;
- воздействие статической инерционной нагрузки под действием собственного веса (гравитацию);
- тепловое расширение;
- одновременное воздействие всех вышеперечисленных факторов статических нагрузок (гравитации, давления, распределения температур).

Определяются перемещения по всем осям и суммарные, а также механические напряжения в конструкциях АЭ.

11) По результатам виртуальных испытаний составляется отчёт, в котором даётся информация о перемещениях по всем осям и суммарных, а также механических напряжениях в конструкциях АЭ. Протокол виртуальных испытаний должен содержать следующую информацию:

- описание модели;
- график входного воздействия гармонической вибрации на модель;
- график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке модели;
- идентифицированные параметры;
- перемещения по всем осям и суммарные, а также механические напряжения в конструкциях АЭ.

Моделирование на воздействие синусоидальной или случайной широкополосной вибрации проводится как на заданные в техническом задании значения параметров воздействий, так и с повышенными амплитудой ускорения и спектральной плотностью ускорения (в критических режимах, в том числе невозпроизводимых при натурных испытаниях). Виртуальные испытания позволяют выявить возможные механические повреждения,

сделать выводы о конструктивной прочности АЭ, определить степень годности АЭ, оценить ухудшение заданных значений параметров АЭ.

Алгоритм проведения математического моделирования АЭ на воздействие синусоидальной или случайной широкополосной вибрации:

- 1) Моделированию АЭ подвергается в трёх взаимно перпендикулярных направлениях.
- 2) Вначале выбирают одну конкретную частоту и на ней проводят моделирование на воздействие синусоидальной вибрации. Эту частоту определяют путём предварительного анализа конструкции АЭ на собственные частоты. Потенциально каждая собственная частота может оказаться резонансной. Так как собственных частот может быть множество, моделирование может проводиться отдельно на нескольких частотах.
- 3) Моделирование проводят путём непрерывного увеличения, а затем уменьшения частоты вибрации.
- 4) В реальных условиях эксплуатации вибрация является случайной. Поэтому проводится моделирование на её воздействие с заданной спектральной плотностью ускорения в пределах частотного диапазона.
- 5) Оцениваемыми характеристиками являются резонансные частоты, ускорения, перемещения, механические напряжения в АЭ, время до усталостного разрушения.
- 6) Для определения оцениваемых характеристик АЭ без виброизоляторов проводится конечно-элементный анализ.
- 7) Для определения оцениваемых характеристик АЭ, установленной на виброизоляторах, используется система дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагранжа с шестью степенями свободы.
- 8) Параметры гармонической вибрации (численные значения задаются в техническом задании на разработку АЭ):
  - ускорение, [g];
  - диапазон частот, [Гц].
- 9) Параметры широкополосной случайной вибрации (численные значения задаются в техническом задании на разработку АЭ):
  - спектральная плотность,  $S$  [ $g^2/Гц$ ];
  - диапазон частот, [Гц].
- 10) Проводится идентификация физико-механических параметров материалов АЭ в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и изготавливаются макеты пластин для испытаний.
- 11) Проводится идентификация параметров виброизоляторов в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации системы виброизоляции, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и приобретаются образцы виброизоляторов для испытаний.
- 12) Идентифицированные параметры материалов АЭ и параметры виброизоляторов заносятся в базу данных для использования в процессе моделирования.
- 13) Проводится подготовка моделей:
  - 3D-моделей в формате STEP конструкций АЭ без виброизоляторов в CAD-системах;
  - 3D-моделей конструкций АЭ, установленных на виброизоляторах, в специализированных интерфейсах.
- 14) Проводится импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций в системе моделирования АЭ на механические воздействия.
- 15) Проводятся виртуальные испытания на воздействие гармонической вибрации и на воздействие случайной широкополосной вибрации в заданном диапазоне частот с применением моделирования механических процессов в АЭ на воздействие гармонической и случайной вибрации. Определяются зависимости ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольных точках или в системах виброизоляции, по которым выявляются резонансные частоты. Также определяются среднеквадратические значения ускорений при случайной вибрации.
- 16) По результатам виртуальных испытаний составляется отчёт, в котором даётся информация об оцениваемых характеристиках. Протокол виртуальных испытаний должен содержать следующую информацию:
  - описание модели;
  - график входного воздействия гармонической вибрации на модель;
  - график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке модели;
  - идентифицированные параметры;
  - график входного воздействия гармонической и случайной вибрации на АЭ;
  - график выходного воздействия гармонической и случайной вибрации в контрольной точке АЭ;
  - оцениваемые характеристики: резонансные частоты, ускорения, перемещения, механические напряжения в АЭ, время до усталостного разрушения.

Наряду с моделированием на воздействие многократных ударов проводят моделирование на воздействие одиночных и многократных механических ударов, которым могут подвергаться АЭ в период эксплуатации или при транспортировании.

Алгоритм проведения математического моделирование АЭ на ударное воздействие:

1) Моделированию на воздействие одиночных ударов АЭ подвергается в трёх взаимно перпендикулярных направлениях.

2) Длительность действия ударного ускорения определяется по осциллограмме.

3) Оцениваемыми характеристиками являются ускорения, перемещения, механические напряжения в изделиях, время до усталостного разрушения.

4) Для определения оцениваемых характеристик АЭ без виброизоляторов проводится конечно-элементный анализ.

5) Для определения оцениваемых характеристик АЭ, установленной на виброизоляторах, используется система дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагранжа.

6) Наличие корректной 3D-модели АЭ.

7) Параметры одиночного механического удара:

- максимальное значение ударного ускорения;
- время воздействия удара.

8) Параметры многократного механического удара:

- максимальное значение ударное ускорения одного импульса;
- длительность одного ударного импульса.
- количество ударных импульсов.

9) Проводится идентификация физико-механических параметров материалов АЭ в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от времени удара в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и изготавливаются макеты пластин для испытаний.

10) Проводится идентификация параметров виброизоляторов в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации системы виброизоляции, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и приобретаются образцы виброизоляторов для испытаний.

11) Идентифицированные параметры материалов АЭ и параметры виброизоляторов заносятся в базу данных для использования в процессе моделирования.

12) Проводится подготовка моделей:

- 3D-моделей в формате STEP конструкций АЭ без виброизоляторов в САД-системах;
- 3D-моделей конструкций АЭ, установленных на виброизоляторах, в специализированных интерфейсах.

13) Проводится импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций АЭ в системе моделирования изделий на механические воздействия.

14) Проводятся виртуальные испытания АЭ на воздействие одиночного и многократного механического удара с применением моделирования. Определяются зависимости ускорения удара от времени в контрольных точках или в системах виброизоляции.

15) По результатам виртуальных испытаний составляется отчёт, в котором даётся информация об оцениваемых характеристиках. Оцениваемые характеристики: ускорения, перемещения, механические напряжения в АЭ, время до усталостного разрушения. Протокол виртуальных испытаний должен содержать следующую информацию:

- описание модели;
- график входного воздействия одиночного механического удара на модель;
- график выходного воздействия одиночного механического удара в контрольной точке модели;
- идентифицированные параметры;
- график входного воздействия одиночного и многократного механического удара на АЭ;
- график выходного воздействия одиночного и многократного механического удара в контрольной точке АЭ.

Алгоритм проведения математического моделирование АЭ на линейное ускорение аналогичен алгоритму моделирования на ударные воздействия, за исключением следующих пунктов:

1) Параметры линейного ускорения:

- пиковое линейное ускорение;
- длительность воздействия линейного ускорения.

2) Проводятся виртуальные испытания АЭ на воздействие линейного ускорения с применением моделирования. Определяются зависимости ускорения от времени в контрольных точках или в системах виброизоляции.

3) По результатам виртуальных испытаний составляется отчёт, в котором даётся информация об оцениваемых характеристиках. Оцениваемые характеристики: ускорения, перемещения, механические напряжения в АЭ, время до усталостного разрушения. Протокол виртуальных испытаний должен содержать следующую информацию:

- описание модели;

- график входного воздействия линейного ускорения на модель;
- график выходного воздействия линейного ускорения в контрольной точке модели;
- идентифицированные параметры;
- график входного воздействия линейного ускорения в контрольной точке АЭ.

Моделирование на воздействие акустического шума проводят в целях определения способности изделий выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах норм, указанных в стандартах и технических условиях на изделия в условиях воздействия повышенного акустического шума (ГОСТ Р 52862–2007).

Алгоритм проведения математического моделирования АЭ на воздействие акустического шума:

1) В зависимости от условий эксплуатации АЭ проводится моделирование либо на воздействие детерминированного значения давления акустического шума на каждой частоте заданного диапазона, либо на воздействие случайного акустического шума.

2) Оцениваемыми характеристиками являются резонансные частоты, ускорения, перемещения, механические напряжения в АЭ, время до усталостного разрушения.

3) Для определения оцениваемых характеристик АЭ без виброизоляторов проводится конечно-элементный анализ.

4) Для определения оцениваемых характеристик АЭ, установленной на виброизоляторах, используется система дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагранжа.

5) Параметры акустического шума (численные значения задаются в техническом задании на разработку АЭ):

- уровень звукового давления, [дБ];
- диапазон частот, [Гц].

6) Проводится идентификация физико-механических параметров материалов АЭ в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и изготавливаются макеты пластин для испытаний.

7) Проводится идентификация параметров виброизоляторов в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяется зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации системы виброизоляции, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывается программа испытаний и приобретаются образцы виброизоляторов для испытаний.

8) Идентифицированные параметры материалов АЭ и параметры виброизоляторов заносятся в базу данных для использования в процессе моделирования.

9) Проводится подготовка моделей:

- 3D-моделей в формате STEP конструкций изделий без виброизоляторов в CAD-системах;
- 3D-моделей конструкций АЭ, установленных на виброизоляторах, в специализированных интерфейсах.

10) Проводится импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций АЭ в системе моделирования изделий на механические воздействия.

11) Проводятся виртуальные испытания на воздействие акустического шума в заданном диапазоне частот с применением моделирования механических процессов в АЭ на воздействие акустического шума. Определяются зависимости ускорения от частоты акустического шума в контрольных точках или в системах виброизоляции, по которым выявляются резонансные частоты.

12) По результатам виртуальных испытаний составляется отчёт, в котором даётся информация об оцениваемых характеристиках. Оцениваемые характеристики: резонансные частоты, ускорения, перемещения, механические напряжения в изделиях, время до усталостного разрушения. Протокол виртуальных испытаний должен содержать следующую информацию:

- описание модели;
- график входного воздействия гармонической вибрации на модель;
- график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке модели;
- идентифицированные параметры;
- график входного воздействия акустического шума на АЭ;
- график выходного воздействия акустического шума в контрольной точке АЭ.

#### Список литературы

1. Шалумов А.С. Моделирование механических процессов в конструкциях РЭС на основе МКР и аналитических методов: Учебное пособие. Допущено Министерством образования РФ в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности 220300 «Системы автоматизированного проектирования». - Ковров: Ковровская государственная технологическая академия, 2001. 296с.

2. Шалумов А.С. Методы и средства испытаний аппаратуры на механические воздействия: Учеб. пособие. М: изд. МИЭМ, 2009. 81с.

#### References

1. Shalunov A.S. Modelirovaniye mekhanicheskikh protsessov v konstruktsiyakh RES na osnove MKR i analiticheskikh metodov: Uchebnoye posobiye. Dopushcheno Ministerstvom obrazovaniya RF v kachestve uchebnogo posobiya dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti 220300 «Sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya». - Kovrov: Kovrovskaya gosudarstvennaya tekhnologicheskaya akademiya, 2001. 296p.

2. Shalunov A.S. Metody i sredstva ispytaniy apparatury na mekhanicheskiye vozdeystviya: Ucheb. posobiye. M: izd. MIEM, 2009. 81p.