

УДК 539.3

Н. Г. ШУЛЬЖЕНКО, Б. Ф. ЗАЙЦЕВ, А. В. АСАЕНОК

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ КОНСТРУКЦИЙ НА ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Представлена расчетная методика оценки реакции трехмерных систем на кратковременные нагрузки с учетом возможных трещин с контактирующими берегами на основе использования МКЭ и применения прямого численного интегрирования конечно-разностных уравнений. Приводятся результаты оценки влияния упругоинерционных характеристик элементов измерительной аппаратуры на определяемые параметры конкретной системы. Установлено значительное изменение параметров движения рассмотренной тонкостенной конструкции (прежде всего ускорений), что следует учитывать при сопоставлении результатов расчетных и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: расчет конструкций, импульсное нагружение, трехмерная модель, учет трещины.

Введение

Эксплуатация аэрокосмических конструкций может сопровождаться короткоимпульсными силовыми воздействиями (50–200 мкс), вызванными срабатыванием систем разделения или воздействием аэродинамической волны. Нагрузки при этом локализуются или распределяются на поверхности конструкции и возбуждают волновые процессы, переходящие со временем в свободные колебания. При численном моделировании колебаний таких систем [1, 2] целесообразно трехмерное представление даже тонкостенных конструкций с необходимой дискретизацией их по пространственным координатам и процессам по времени. Значительное влияние могут оказывать динамические контактные явления в разъемных соединениях конструкций или наличие трещин, берега которых испытывают односторонний контакт [3]. Решение осуществляется в этих случаях в постановке динамической контактной задачи теории упругости и достигается итерациями ряда линеаризованных задач.

В данной работе описывается методическое обеспечение для расчета динамики конструкций, в том числе аэрокосмического назначения с разъемными элементами или гипотетическими трещинами. Приводятся результаты исследования влияния упругоинерционных характеристик элементов экспериментальной измерительной аппаратуры (ЭИА) на развиваемые процессы при импульсном силовом нагружении конструкции.

1. Постановка задачи и методика исследований

Рассматривается произвольное тело или конструкция, для которых в общем случае допускается наличие трещин или разъемов, берега или стороны

которых испытывают контактные усилия. Разрабатывается методико-программное обеспечение для расчета нестационарных колебательных процессов, в том числе и при кратковременных воздействиях, когда могут наблюдаться волновые явления. В качестве базового принимается МКЭ.

Уравнения динамического состояния тела с трещиной в матричной форме представляются в виде

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = F, \quad (1)$$

где u – вектор узловых перемещений;

$[C]$ – матрица демпфирования;

F – вектор узловых сил от внешней нагрузки;

$[K]$, $[M]$ – матрицы жесткости и масс тела.

Методика включает построение конечноэлементной (КЭ) модели тела с трещиной, учет контактирования ("дыхания") ее берегов и решение нелинейной начально-краевой задачи.

Построение КЭ-модели тела с трещиной [4] заключается в разрыве связей между узлами ее КЭ-сетки по поверхности, разделяющей берега трещины. Полученная модифицированная сетка конечных элементов содержит разделяющую поверхность, имеющую не связанные между собой двойные узлы, представляющие берега трещины.

На рис. 1, а, б показана трансформация КЭ-сетки для введения трещины. Исходное состояние (рис. 1, а) соответствует регулярной сетке без трещины, где ПТ – поверхность трещины; ЛТ – линия трещины; А, В, С, D – конечные элементы. Трансформация исходной и образование нерегулярной КЭ-сетки с трещиной (рис. 1, б) осуществляется выделением узлов, первоначально расположенных на разделяющей поверхности (отмеченных символом \times) и смещением к ним соседних узлов (обозначенных символом \circ) (рис. 1, а). В результате на разделяющей поверхности образуются двойные узлы

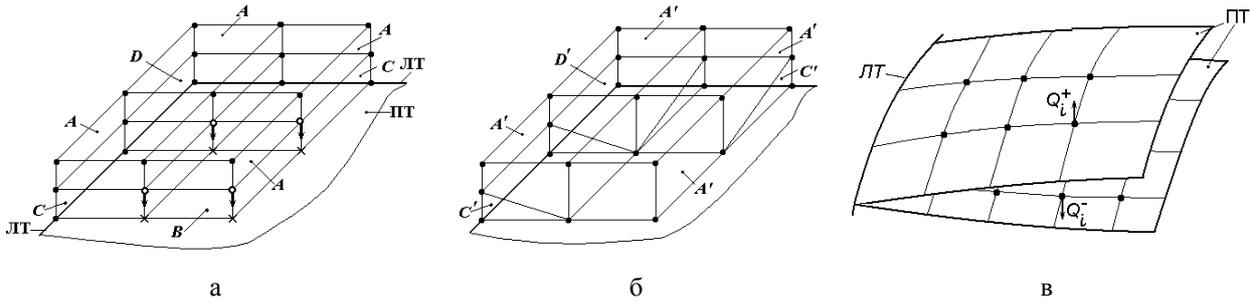


Рис. 1. Схемы трансформации сетки:
а, б – при введении трещины; в – при введении диполей в двойных узлах

(рис. 1, б), при этом конечные элементы А преобразуются в А', элементы С, D вырождаются в С', D', а элементы В упраздняются. Применение описанной схемы введения разрезов для учета трещины приводит к изменению основных характеристик КЭ-модели – матриц жесткости [K] и масс [M]. Их формирование для элементов А (рис. 1, а) осуществляется с учетом изменения ряда координат узлов, а для элементов В – обособлением узлов x с диагонализацией матриц относительно этих узлов

$$[K_B] = G \cdot \sum_j \mathbf{i}_j \mathbf{i}_j, \quad [M_B] = g \cdot \sum_j \mathbf{i}_j \mathbf{i}_j,$$

где принята диадная форма представления тензоров (матриц);

\mathbf{i}_j – вектор, у которого только j -я компонента отлична от нуля и равна единице;

j – индекс, указывающий на узлы x и компоненты перемещений в этих узлах;

$G \gg 1, g \ll 1$ – соответственно большое и малое числа.

Для изменения конечных элементов С, D (рис. 1, а), в которых число граней и узлов уменьшается, применяются формализованные процедуры матричных преобразований. Модифицированные матрицы жесткости [K'] и масс [M'] этих элементов определяются по зависимостям

$$[K'] = [A]^T \cdot [K] \cdot [A] + G \cdot \sum_j \mathbf{i}_j \mathbf{i}_j,$$

$$[M'] = [A]^T \cdot [M] \cdot [A] + g \cdot \sum_j \mathbf{i}_j \mathbf{i}_j,$$

где $[A] = E - \sum_j \mathbf{i}_j \mathbf{i}_j + \sum_{j,k} \mathbf{i}_j \mathbf{i}_k$ – матрица преобразования;

$$E = \sum_s \mathbf{i}_s \mathbf{i}_s \text{ – единичная матрица;}$$

k – относится к узлам o и перемещениям в них.

Описанная схема позволяет моделировать трещины со сложной поверхностью, например состоящей из состыкованных или пересекающихся плос-

костей различных направлений, и не накладывает ограничения на количество вводимых трещин.

При колебаниях тела берега трещины могут входить в односторонний контакт, когда отрыв возможен, а взаимное проникновение берегов отсутствует.

В рассматриваемой постановке контактирование берегов задается по нормали к поверхности трещины [5]. При этом допускается проскальзывание без трения. Условие непроникновения берегов трещины имеет вид

$$\delta_{in} = u_{in}^+ - u_{in}^- \geq 0, \quad (2)$$

где u_{in}^+, u_{in}^- – перемещения по нормали \bar{n} в i -м двойном узле на положительной (+) и отрицательной (–) поверхностях трещины;

δ_{in} – сближение по нормали в i -м двойном узле. Знаку равенства в (2) соответствует состояние контакта берегов трещины.

Силы, возникающие при контактировании берегов трещины (в зонах раскрытия они отсутствуют) определяются с помощью системы контактных сил $Q_i \{Q_i^+, Q_i^-\}$, приложенных в двойных узлах [5], парно равных по величине ($Q_i^+ = Q_i^-$) и противоположных по направлению и подлежащие определению, причем $i = 1 \div m$, где m – число двойных узлов на поверхности трещины.

В соответствии с терминологией, принятой в теории упругости, их можно назвать диполями (рис. 1, в).

В уравнении (1) матрицы жесткости и масс для тела с трещиной, берега которой не контактируют, заменяются модифицированными матрицами, а к внешним силам F добавляются переменные поверхностные силы, действующие по берегам трещины, в виде системы диполей $Q \{Q_i\}$ после чего оно приобретает вид

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = F + Q(u). \quad (3)$$

Распределение контактных сил – диполей $\mathbf{Q}\{Q_i\}$ изменяется во времени и определяется из решения контактной задачи для берегов трещины до выполнения условий (2).

Применяемая методика учета трещины построена на вычислении матриц при полностью открытой трещине, а введение диполей позволяет учесть в правой части уравнений движения (3) изменение формы тела при изменении зон контакта. Это позволяет не переисчислять матрицы жесткости и масс при изменении условий контактирования.

Решение начальной задачи (3) при расчете колебаний тела выполняется прямым интегрированием, для чего используются часто употребляемые двухслойные неявные конечноразностные схемы по методу Ньюмарка и θ -методу Вильсона, являющиеся безусловно устойчивыми [6] и используемыми для матричных дифференциальных уравнений второго порядка. В задачах оценки перегрузок при импульсных нагружениях за критериальные параметры принимаются ускорения, в этом случае предпочтительнее является схема θ -метода Вильсона.

Конечноразностные соотношения по θ -методу Вильсона представляются в виде

$$[\hat{\mathbf{K}}]\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \hat{\mathbf{R}}_{t+\Delta t}, \quad (4)$$

где $[\hat{\mathbf{K}}]$ – модифицированная матрица жесткости;

$\mathbf{u}_{t+\Delta t}$ – вектор перемещений для конца шага;

$\hat{\mathbf{R}}_{t+\Delta t}$ – модифицированная правая часть уравнений (3) для момента времени $t+\Delta t$.

Модифицированный вектор правой части может быть представлен в виде

$$\hat{\mathbf{R}}_{t+\Delta t} = \tilde{\mathbf{R}}_{t+\Delta t} + \mathbf{Q}_{t+\Delta t},$$

где $\tilde{\mathbf{R}}_{t+\Delta t}$ соответствует известной части модифицированного вектора правой части;

$\mathbf{Q}_{t+\Delta t}$ – наперед неизвестная часть, но в конце шага должна быть такой, чтобы удовлетворялись условия контакта (2).

Перемещения в конце шага $\mathbf{u}_{t+\Delta t}$ можно представить в виде

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \tilde{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \bar{\mathbf{u}}_{t+\Delta t},$$

где $\tilde{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ – вектор перемещений, соответствующий известной (вычисленной) части выражения (4);

$\bar{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ – вектор дополнительных перемещений от контактных сил $\mathbf{Q}_{t+\Delta t}$.

Перемещения $\tilde{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ определяются при решении системы (4) с известной правой частью, а перемещения $\bar{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ – после нахождения $\mathbf{Q}_{t+\Delta t}$ методом итераций до выполнения условий контактирования (2). После определения контактных усилий перемещения $\bar{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ могут быть вычислены

$$\bar{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = [\mathbf{B}]_{\Delta t} \mathbf{Q}_{t+\Delta t},$$

где $[\mathbf{B}]_{\Delta t}$ – матрица коэффициентов влияния размерностью $N \times m$ (N – число переменных в узлах).

Элементы строк матрицы $[\mathbf{B}]_{\Delta t}$ вычисляются предварительно и равны динамическим смещениям в теле за промежуток времени Δt от единичных диполей, приложенных поочередно в каждом из двойных узлов.

2. Приложение методики

При обработке функционирования конструкций, а также технологий их разделения выполняются экспериментальные исследования для съема информации о перегрузках при действии короткоимпульсных воздействий. При этом элементы (датчики) устанавливаемой измерительной аппаратуры, подсоединяемые к исследуемой конструкции, фактически становятся ее частью, изменяя массовые и жесткостные характеристики. Однако основным фактором искажения является снятие информации с некоторой площадки, по которой происходит контакт датчика и конструкции, а не в условной точке постановки датчика. Фактически при этом происходит усреднение измеряемой характеристики.

В связи с этим применительно к представленной конструкции выполнены численные исследования по определению влияния присоединяемых ЭИА на расчетные характеристики узла космической конструкции, нагруженной двумя сосредоточенными импульсными силами $Q(t)$ (длительность импульса $T=100$ мкс),

$$Q=Q_0 \sin(\pi t/T) \text{ при } 0 \leq t \leq T, \quad Q=0 \text{ при } t \geq T.$$

Для этого рассмотрены две расчетные модели, одна из которых не учитывает влияния ЭИА, а другая – учитывает. В обоих случаях характеристики (ускорения, скорости, перемещения) определяются в указанной на схеме рис. 2 точке, в которой первоначально считается установленным датчик.

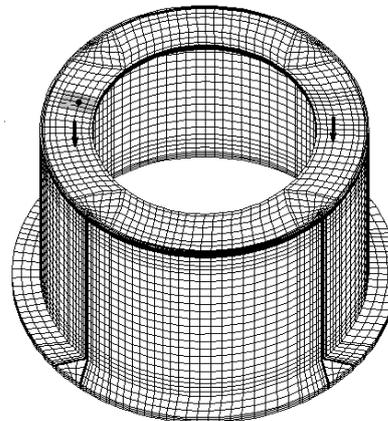


Рис. 2. Конечноэлементная модель, схема нагружения рассчитываемой конструкции

При моделировании присоединения ЭИА учитывалась добавочная масса, которая распределялась по площадке контакта ЭИА с конструкцией (затемненная на рис. 2). Т.к. датчик является сравнительно жестким элементом, то его крепление приводит к ужесточению части конструкции, относящейся к площадке контакта. Эта особенность учитывалась повышенными характеристиками материала слоя КЭ у площадки крепления ЭИА.

Результаты расчетных исследований приводятся на рис. 3: перемещения (рис. 3, а), скорости (рис. 3, б) и ускорения (рис. 3, в) в направлении действия импульсных сил.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии ЭИА на измеряемые под ним параметры исследуемой конструкции. При этом колебательные процессы в точке измерений качественно подобны, но значительно отличаются по уровню экстремальных значений, причем наибольшее отличие наблюдается для ускорений.

Заключение

Создано методико-программное обеспечение расчета динамических реакций пространственных конструкций аэрокосмического назначения на импульсные воздействия. Методика позволяет учесть неплотности разъемов или трещины, стороны или берега которых контактируют при колебаниях.

Численно установлено значительное влияние присоединенных к конструкции элементов измерительной аппаратуры (датчиков) на определяемые характеристики, что следует учитывать при сопоставлении расчетных и экспериментальных данных.

Литература

1. Шульженко, Н. Г. Реакция оболочечных элементов космических аппаратов на импульсное воздействие [Текст] / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 9(106). – С. 53–58.
2. Оценка резонансных режимов колебаний космического аппарата [Текст] / В. П. Трякин, Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский и др. // *Космічна наука і технологія*. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 40–44.
3. Шульженко, Н. Г. Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований) [Текст] : моногр. / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Б. Ф. Зайцев. – Saarbrücken, Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. – 370 с.
4. Асаёнок, А. В. Методика введения разрезов в схеме метода конечных элементов в задачах статики и собственных колебаний трехмерных конструкций [Текст] / А. В. Асаёнок, Б. Ф. Зайцев, Н. Г. Шульженко // *Проблемы машиностроения*. – 2003. – Т. 6, № 3. – С. 58–63.
5. Метод расчета колебаний тел, содержащих трещины с контактирующими берегами [Текст] / Б. Ф. Зайцев, Н. Г. Шульженко, А. В. Асаёнок, Н. Е. Ерецькая // *Проблемы машиностроения*. – 2008. – Т. 11, № 4. – С. 34–42.
6. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст] / К. Бате, Е. Вильсон. – М. : Стройиздат, 1982. – 448 с.

Поступила в редакцию 4.06.2014, рассмотрена на редколлегии 16.06.2014

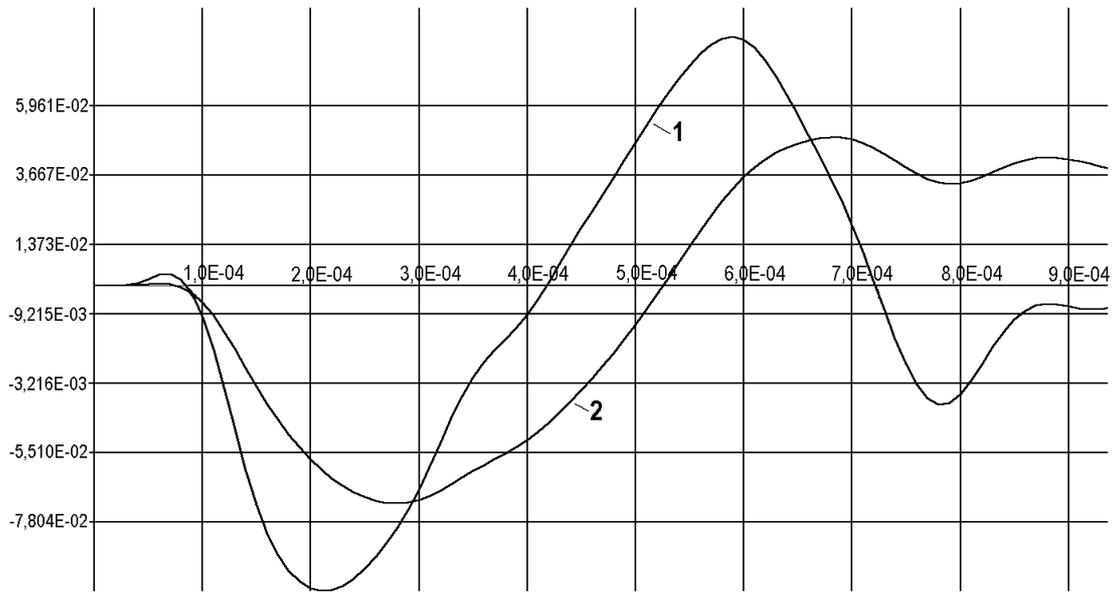
Рецензент: д-р техн. наук, проф., ведущий научный сотрудник К. В. Аврамов, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ НА ІМПУЛЬСНИЙ ВПЛИВ

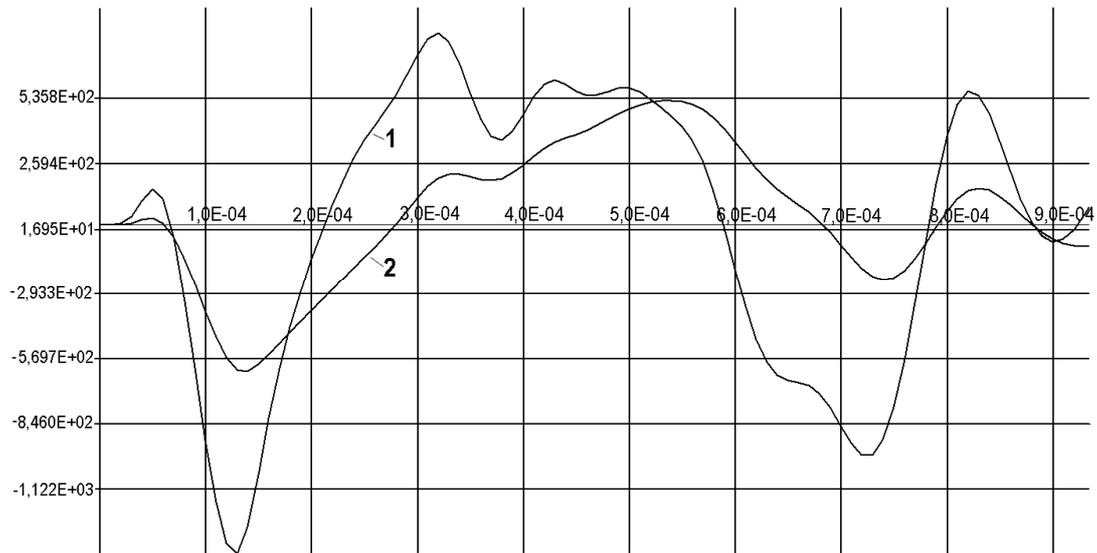
М. Г. Шульженко, Б. П. Зайцев, О. В. Асайонок

Представлено розрахункову методику оцінки реакції тривимірних систем на короточасні навантаження з урахуванням можливих тріщин з контактуючими берегами на основі використання МСЕ та застосування прямого чисельного інтегрування кінцево-різницевих рівнянь. Приводяться результати оцінки впливу пружноінерційних характеристик елементів вимірювальної апаратури на параметри конкретної системи, що визначаються. Встановлено значну зміну параметрів руху розглянутої тонкостінної конструкції (насамперед прискорень), що варто враховувати при зіставленні результатів розрахункових і експериментальних досліджень.

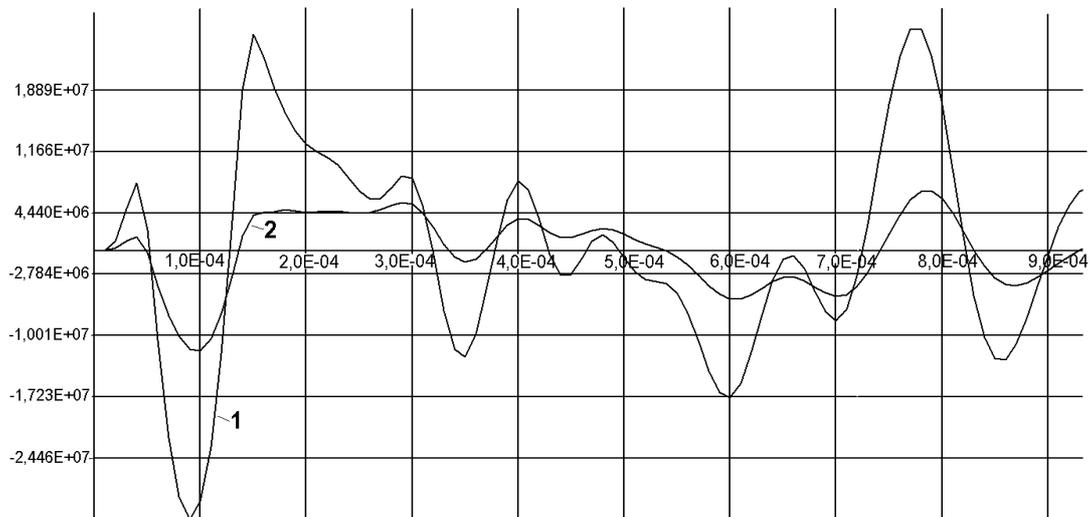
Ключові слова: розрахунок конструкцій, імпульсне навантаження, тривимірна модель, урахування тріщини.



а



б



в

Рис. 3. Перемещение (а), скорость (б), ускорение (в) в точке измерений:
1 – без учета ЭИА; 2 – с учетом ЭИА

**NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC RESPONSE
OF STRUCTURE UNDER IMPULSE IMPACT***M. G. Shulzhenko, B. P. Zajtsev, A. V. Asajenok*

The calculation method for estimation of three-dimension systems on short-term load is presented. Possibility of contact between edges of the crack is taken into account. This method is based on finite element method and direct numerical integration of finite difference equations. Results of impact assessment of elastically inertial characteristics of elements of measuring equipment on parameters of specific system are shown. Significant variation of motion parameters of thin-walled construction (primarily acceleration) is determined. These results should be considered during comparison of calculated and experimental researches.

Key words: analysis of construction, impulse loading, three-dimensional model, consideration of crack.

Шульженко Николай Григорьевич – д-р техн. наук, проф., зав. отделом вибрационных и термопрочностных исследований, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина, e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

Зайцев Борис Филиппович – д-р техн. наук, вед. науч. сотр., ст. науч. сотр., Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина, e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

Асаенко Александр Викторович – канд. техн. наук, науч. сотр., Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина, e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.