

УДК 629.764:539.3

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХМЕРНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Шульженко Н. Г., д. т. н., проф., Гонтаровский П. П., к. т. н., с. н. с.,
Протасова Т. В., к. т. н., Колядюк А. С.

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины,
ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, 61046, Украина*

shulzh@ipmach.kharkov.ua

Описывается методика расчета переходных процессов в элементах конструкций в виде тел вращения. Она базируется на сочетании метода конечных элементов с описанием решения в окружном направлении рядами Фурье. Приводится пример расчета динамической реакции узла конструкции на кратковременное импульсное воздействие. Исследована и подтверждена внутренняя сходимость результатов расчетов. Выполнена верификация алгоритмического и программного обеспечения путем сопоставления результатов расчетов, полученных по различным методикам.

Ключевые слова: переходный процесс, импульсное нагружение, трехмерная осесимметричная конструкция, полуаналитический метод конечных элементов

РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРИВИМІРНИХ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ КОНСТРУКЦІЯХ ПРИ КОРОТКОЧАСНОМУ ІМПУЛЬСНОМУ ВПЛИВІ

Шульженко М. Г., д. т. н., проф., Гонтаровський П. П., к. т. н., с. н. с.,
Протасова Т. В., к. т. н., Колядюк А. С.

*Інститут проблем машинобудування ім. А.Н. Підгорного НАН України,
вул. Дм. Пожарського, 2/10, м. Харків, 61046, Україна*

shulzh@ipmach.kharkov.ua

Описується методика розрахунку перехідних процесів в елементах конструкцій у вигляді тіл обертання. Вона базується на поєднанні методу кінцевих елементів з описом рішення в окружному напрямку рядами Фур'є. Наводиться приклад розрахунку динамічної реакції вузла конструкції на короткочасний імпульсний вплив. Досліджена та підтверджена внутрішня збіжність результатів розрахунків. Виконана верифікація алгоритмічного та програмного забезпечення шляхом зіставлення результатів розрахунків, отриманих за різними методиками.

Ключові слова: перехідний процес, імпульсне навантаження, тривимірна осесиметрична конструкція, напіваналітичний метод кінцевих елементів.

CALCULATED ESTIMATION OF TRANSIENT PROCESS IN 3D AXISYMMETRIC CONSTRUCTION UNDER SHORT-TERM IMPULSE ACTION

Shulzhenko N. G., Gontarovskiy P. P., Protasova T. V., Koliadiuk A. S.

A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

shulzh@ipmach.kharkov.ua

The technique based on a combination of finite element method with variable decomposition at Fourier series on the circumferential coordinate is developed for estimate of spacecraft components in the form solid of revolution. It allows dividing finite element method system of equations into number of smaller dimensions systems for independent harmonic. It is significantly reduced computational costs at real designs calculation. There is further decrease of computational costs in case of presence of one or several meridional symmetry plane. The matrix differential equation system of a construction deformation is integrated in time by implicit finite-difference Wilson's θ -method or Newmark's method.

The software contains graphical interface for the analysis of the construction stressed and strained state in particular time value or its change with time in the form of displacement, velocity and acceleration plots in particular construction nodes.

As example, the impact of geometrical and time discretization and also number of Fourier's series component on kinematical characteristics of carrier rocket adapter is analysed. The algorithmic and the software verification were carried out by comparison of the calculated results that were performed by the different techniques. Acceptable fit of results is observed. There is a small shift in a time of displacements, velocities and accelerations in some points, and their maximum values are relatives.

Key words: transient process, impulsive loading, 3D *axisymmetric construction*, semianalytical finite element method.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы снижения перегрузок в частях аэрокосмических конструкций при срабатывании устройств разделения можно решать экспериментально на основе затратных исследований на моделях или натуральных объектах. Использование при этом расчетных методик оценки переходных процессов может существенно уменьшить затраты. При численном моделировании таких систем [1, 2] целесообразным является трехмерное представление конструкций с необходимой их дискретизацией по пространственным координатам и процессов по времени.

Для общего типа конструкции узла разделения с наличием разнородных анизотропных элементов, выполняющих функцию дополнительного демпфирования, ранее разработана методика и создано соответствующее программное обеспечение [3, 4] на основе классического метода конечных элементов по трехмерной расчетной модели. По этой методике при моделировании механических нестационарных процессов допускается односторонний контакт элементов, учитывающийся специальными моделями разрезов и алгоритмом решения динамической контактной задачи. Вследствие универсальности быстрого действия этого программного обеспечения является невысоким, но оно имеет широкую область применения.

Для менее сложных по форме, но достаточно распространенных конструкций в виде тел вращения целесообразно использовать специальное методическое обеспечение [5], которое обладает более высоким быстрым действием.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Для расчета узлов и элементов космических аппаратов в виде тел вращения разработана методика, основанная на сочетании метода конечных элементов с разложением неизвестных в ряды Фурье по окружной координате [5]. При этом элементы конструкции моделируются трехмерными телами вращения. В основу разработки положен полуаналитический метод конечных элементов. Искомые перемещения, а также скорости, ускорения и напряжения в меридиональном сечении описываются координатными функциями произвольных выпуклых четырехугольных элементов. В окружном направлении решения раскладываются в ряды Фурье, что позволяет разделить систему уравнений метода конечных элементов на ряд систем меньшей размерности для отдельных гармоник, что существенно сокращает вычислительные затраты при расчете реальных конструкций. При наличии одной или нескольких меридиональных плоскостей симметрии имеет место дальнейшее сокращение вычислительных затрат.

Перемещения на конечном элементе задаются в виде

$$u_v(\xi, \eta, \theta, t) = u_{vik}(t) \cdot \varphi_i(\xi, \eta) \cdot \varphi_k(\theta), \quad u_\theta(\xi, \eta, \theta, t) = u_{\theta ik}(t) \cdot \varphi_i(\xi, \eta) \cdot \bar{\varphi}_k(\theta), \quad (1)$$

$$(v = r, z; \quad i = 1, 2, 3, 4; \quad k = 0, \dots, n),$$

где u_{vik} , $u_{\theta ik}$ – амплитудные значения распределения перемещений в узлах конечных элементов; $\varphi_i(\xi, \eta)$ – координатные функции конечного элемента; $\varphi_k(\theta)$, $\bar{\varphi}_k(\theta)$ – координатные функции в окружном направлении, которые имеют вид:

$$\varphi_0(\theta) = \bar{\varphi}_0(\theta) = 1,$$

$$\varphi_k(\theta) = \cos(0,5(k+1) \cdot \theta), \quad \bar{\varphi}_k(\theta) = \cos(0,5 \cdot k \cdot \theta) \quad (\text{при } k = 1, 3, 5, \dots), \quad (2)$$

$$\varphi_k(\theta) = \sin(0,5 \cdot k \cdot \theta), \quad \bar{\varphi}_k(\theta) = \sin(0,5(k+1) \cdot \theta) \quad (\text{при } k = 2, 4, 6, \dots).$$

Уравнения динамического состояния конструкции в матричной форме представляются в виде

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

где u – вектор узловых перемещений; $[C]$ – матрица демпфирования; F – вектор узловых сил от внешнего нагружения; $[K]$, $[M]$ – матрицы жесткости и масс тела.

Система матричных дифференциальных уравнений деформирования конструкции интегрируется по времени неявным конечноразностным θ -методом Вильсона или методом Ньюмарка.

Методическое обеспечение сопровождается программной реализацией. Разработаны основные модули вычисления и графический интерфейс для представления геометрии модели с дискретизацией ее на конечные элементы и результатов расчета перемещений, скоростей, ускорений и напряжений в виде графиков и изолиний в отдельных точках конструкции или в меридиональных сечениях.

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ УЗЛА КОНСТРУКЦИИ

С применением созданного методического обеспечения выполнены расчеты переходных процессов в элементе конструкции (адаптере ракетносителя) при импульсном нагружении. Меридиональное и поперечное сечения конструкции показаны на рис. 1. Обозначены контрольные точки A и B , в которых будут оцениваться получаемые результаты.

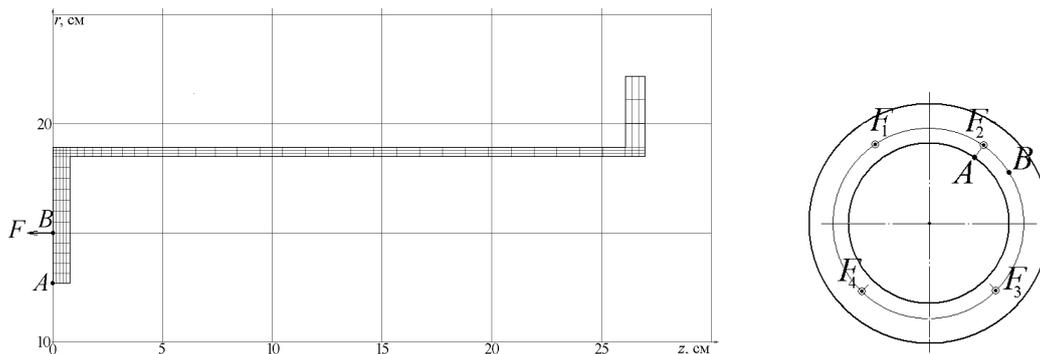


Рис. 1. Меридиональное ($\theta = 0$) и поперечное ($z = 0$) сечения элемента конструкции

Нагружение конструкции моделируется четырьмя сосредоточенными импульсами $F_1 - F_4$, направленными вдоль оси вращения и распределенными по окружности в виде полуволны синусоиды длительностью 100 мкс с амплитудой 3454 Н.

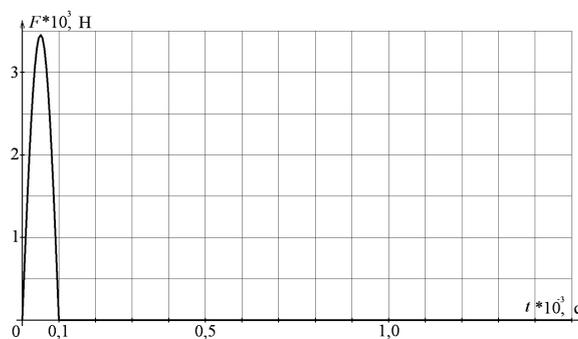


Рис. 2. Изменение нагрузки за исследуемый период времени

Исследовано влияние геометрической и временной дискретизации, а также количества слагаемых в разложениях Фурье на кинематические характеристики конструкции. Оценивалась сходимость результатов путем последовательного сгущения конечно-

элементной сетки при разбиении меридионального сечения конструкции на 129 (сетка 1), 293 (сетка 2) и 1172 (сетка 3) конечных элемента. При этом время счета задачи составляет 573, 1196 и 4384 с соответственно. На рис. 3 приведены результаты расчетов, из которых следует, что достаточным является разбиение меридионального сечения на 293 конечных элемента.

Исследовано влияние количества слагаемых ряда Фурье в разложении искомым компонент в окружном направлении на сходимость полученных результатов. Удерживались 16, 31 и 61 гармоническая составляющая, время счета задачи при этом составляет 305, 1196 и 4570 с. Для достижения приемлемой для практики точности достаточно ограничиться 31 гармоникой ряда Фурье с учетом симметрии для половины окружности (табл. 1, рис. 4).

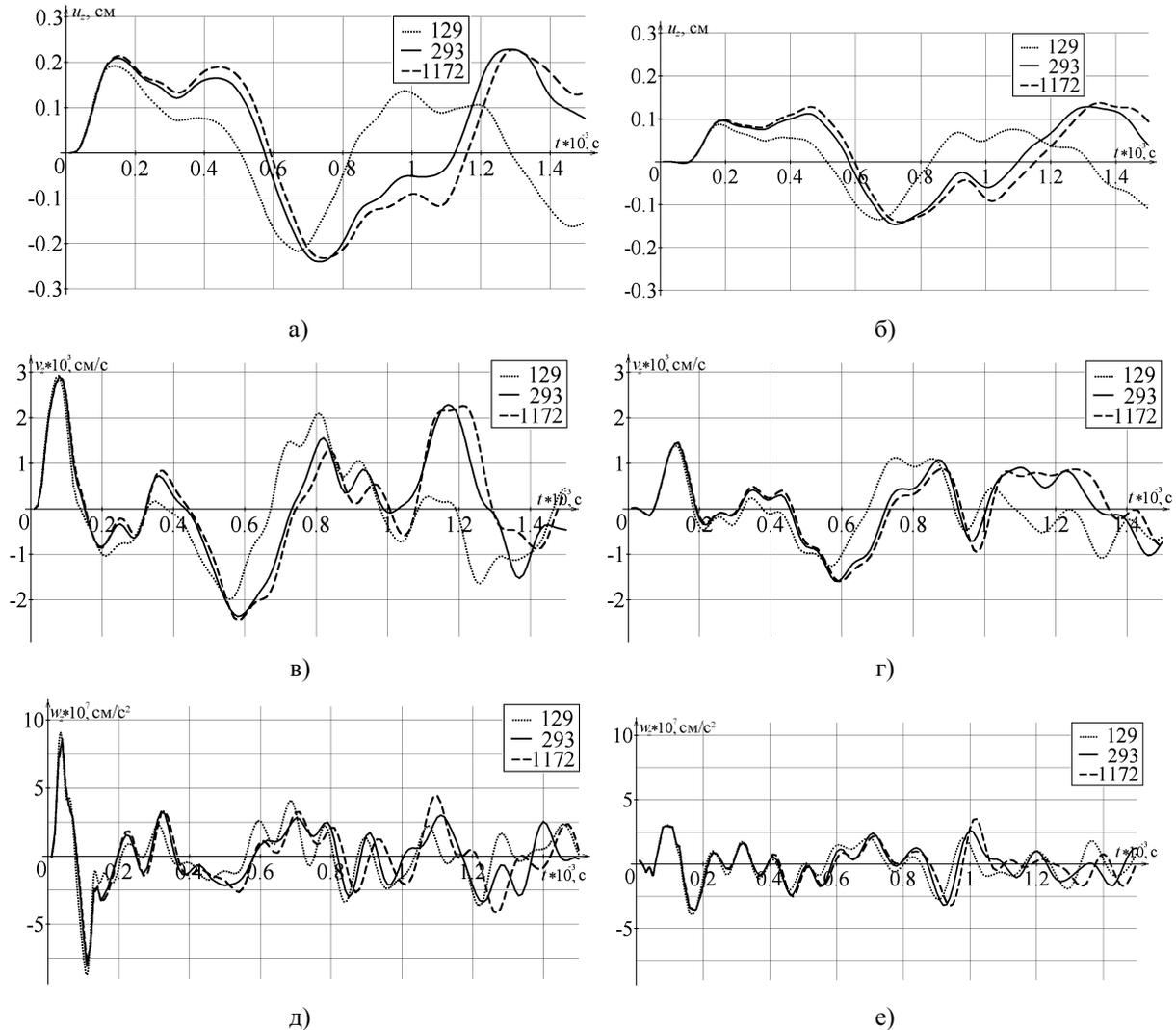


Рис. 3. Осевые перемещения (а-б), скорости (в-г) и ускорения (д-е) в контрольных точках А (а, в, д) и В (б, г, е) с различной разбивкой меридионального сечения на конечные элементы

Таблица 1 – Максимальные значения перемещений, скоростей и ускорений точки А для различного количества слагаемых ряда Фурье

Параметр	Количество гармоник		
	$n = 16$	$n = 31$	$n = 61$
u_z , см	-0,23995	-0,23995	-0,23995
$v_z \cdot 10^3$, см/с	2,918	2,913	2,913
$w_z \cdot 10^7$, см/с ²	9,09	8,53	8,53
	-8,18	-8,08	-8,08

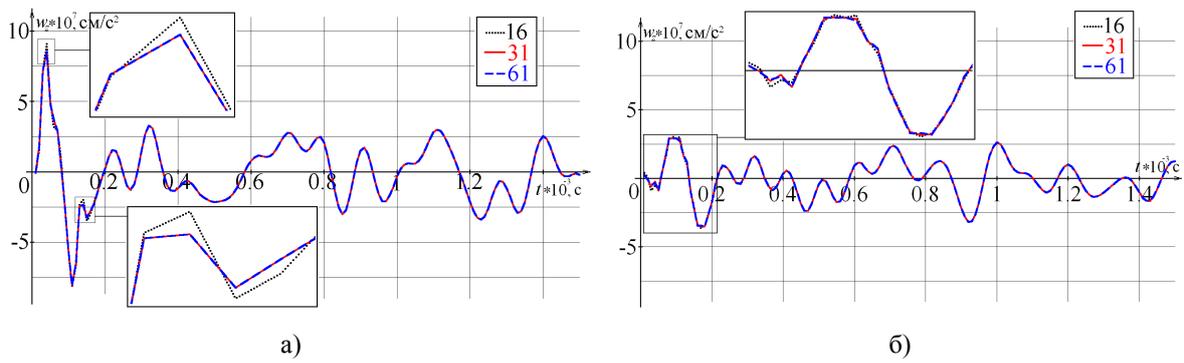


Рис. 4. Осевые ускорения точек А (а) и В (б) при варьировании числом гармоник

Затем были выполнены расчеты с различной величиной шага интегрирования по времени с использованием метода Вильсона. Они показали, что перемещения практически сходятся, начиная с шага 10, скорости – 2,5, а ускорения – 1 мкс (рис. 5, табл. 2).

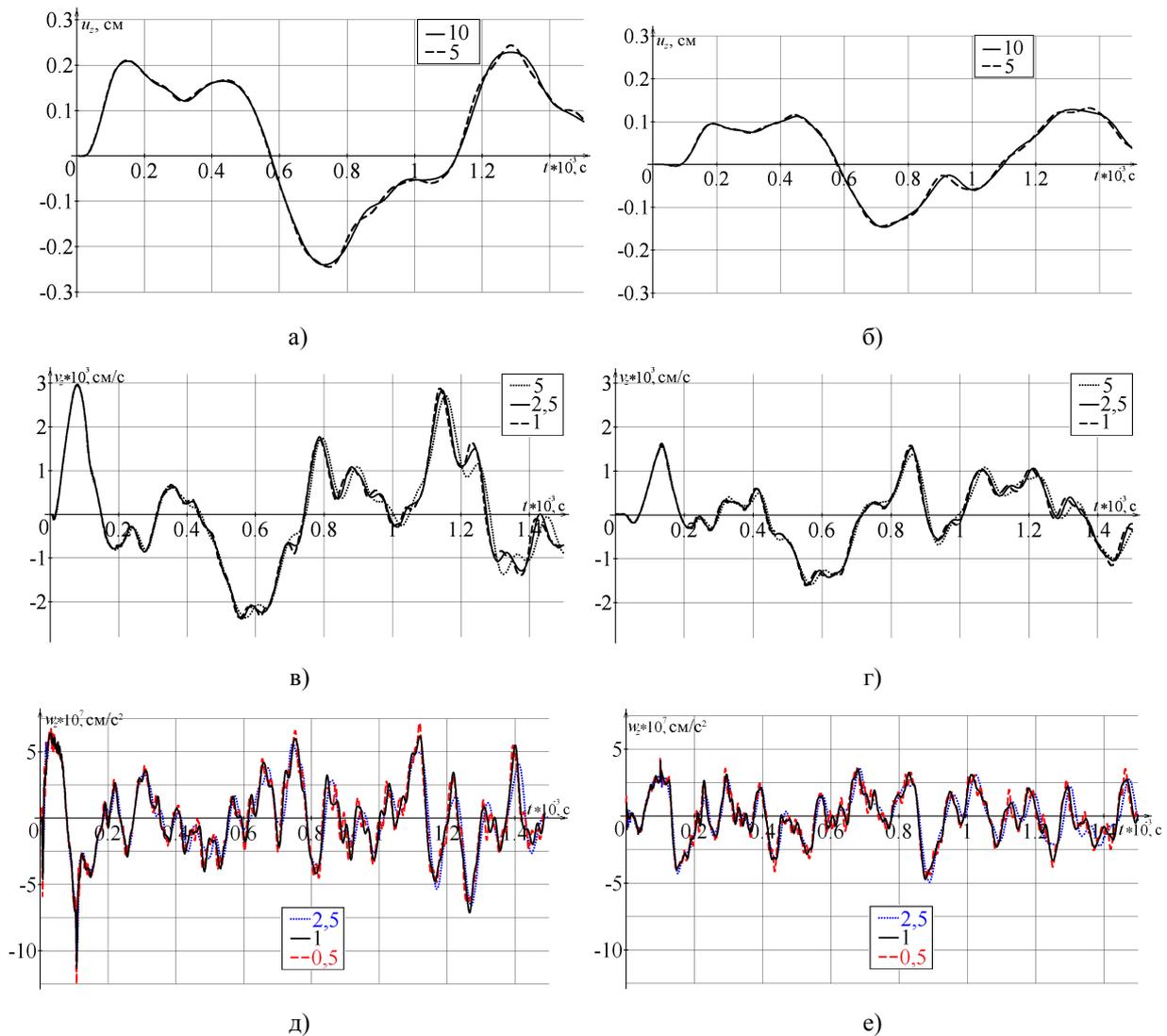


Рис. 5. Осевые перемещения (а-б), скорости (в-г) и ускорения (д-е) в контрольных точках А (а, в, д) и В (б, г, е) с разной величиной шага интегрирования по времени

При интегрировании по времени с применением метода Ньюмарка наблюдается резкая перемена знака на каждом шаге по времени для ускорений в местах больших градиентов, а метод Вильсона дает гладкое решение (рис. 6). В дальнейших расчетах будет использоваться процедура по алгоритму метода Вильсона.

Таблица 2 – Максимальные значения перемещений, скоростей и ускорений в контрольных точках А и В при варьировании величиной шага интегрирования по времени

Параметр	Шаг по времени, 10^{-6} с				
	$h = 10$	$h = 5$	$h = 2,5$	$h = 1$	$h = 0,5$
точка А					
u_z , см	0,2282 -0,23995	0,24366 -0,24496	–	–	–
$v_z * 10^3$, см/с	–	2,969 -2,368	2,968 -2,384	2,966 -2,360	–
$w_z * 10^7$, см/с ²	–	–	5,68 -9,98	6,18 -11,29	7,2 -12,8
точка В					
u_z , см	0,1281 -0,14639	0,13181 -0,14437	–	–	–
$v_z * 10^3$, см/с	–	1,538 -1,582	1,586 1,592	1,625 -1,606	–
$w_z * 10^7$, см/с ²	–	–	3,59 -4,93	4,14 -4,73	4,3 -4,58
время счета задачи, с	1196	1728	2780	6212	11479

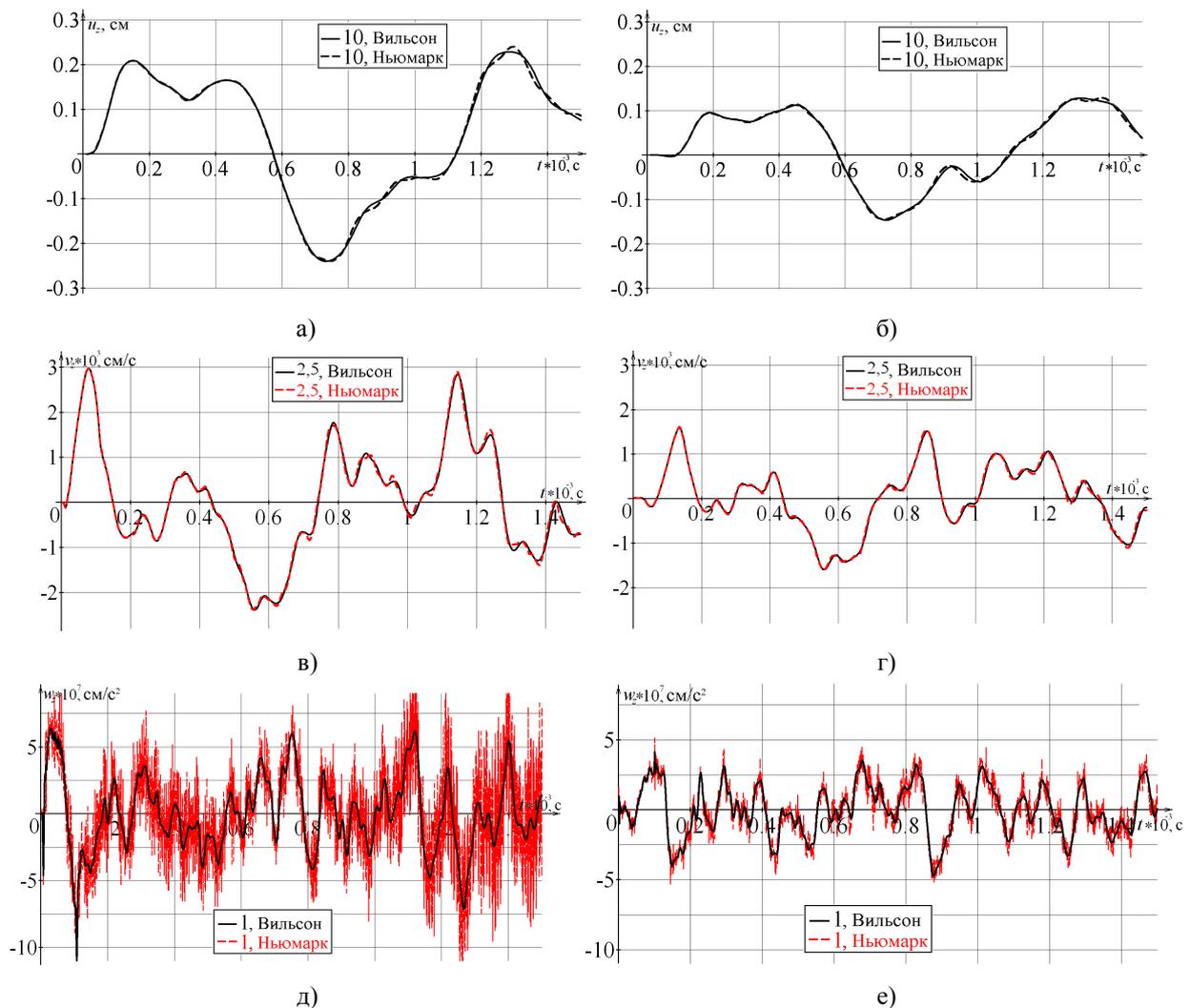


Рис. 6. Осьевые перемещения (а-б), скорости (в-г) и ускорения (д-е) в контрольных точках А (а, в, д) и В (б, г, е), полученные по разным методам интегрирования по времени

Выполнена верификация алгоритмического и программного обеспечения путем сопоставления результатов расчетов, полученных по разработанной методике и с помощью методики на основе классического метода конечных элементов [3, 4]. При этом построенные трехмерные модели содержали 30 и 103 тыс. конечных элементов, что соответствует расчетам с сетками 1–2 по разработанной методике. Интегрирование по времени осуществлялось по методу Вильсона. Время счета задачи составляло 20 и 100 мин.

На рис. 7 приводятся полученные по разработанной методике и по методике [3, 4], отвечающие сетке 2. Наблюдается приемлемое их соответствие. В некоторых точках имеет место небольшое смещение во времени перемещений, скоростей и ускорений, а их максимальные значения являются близкими.

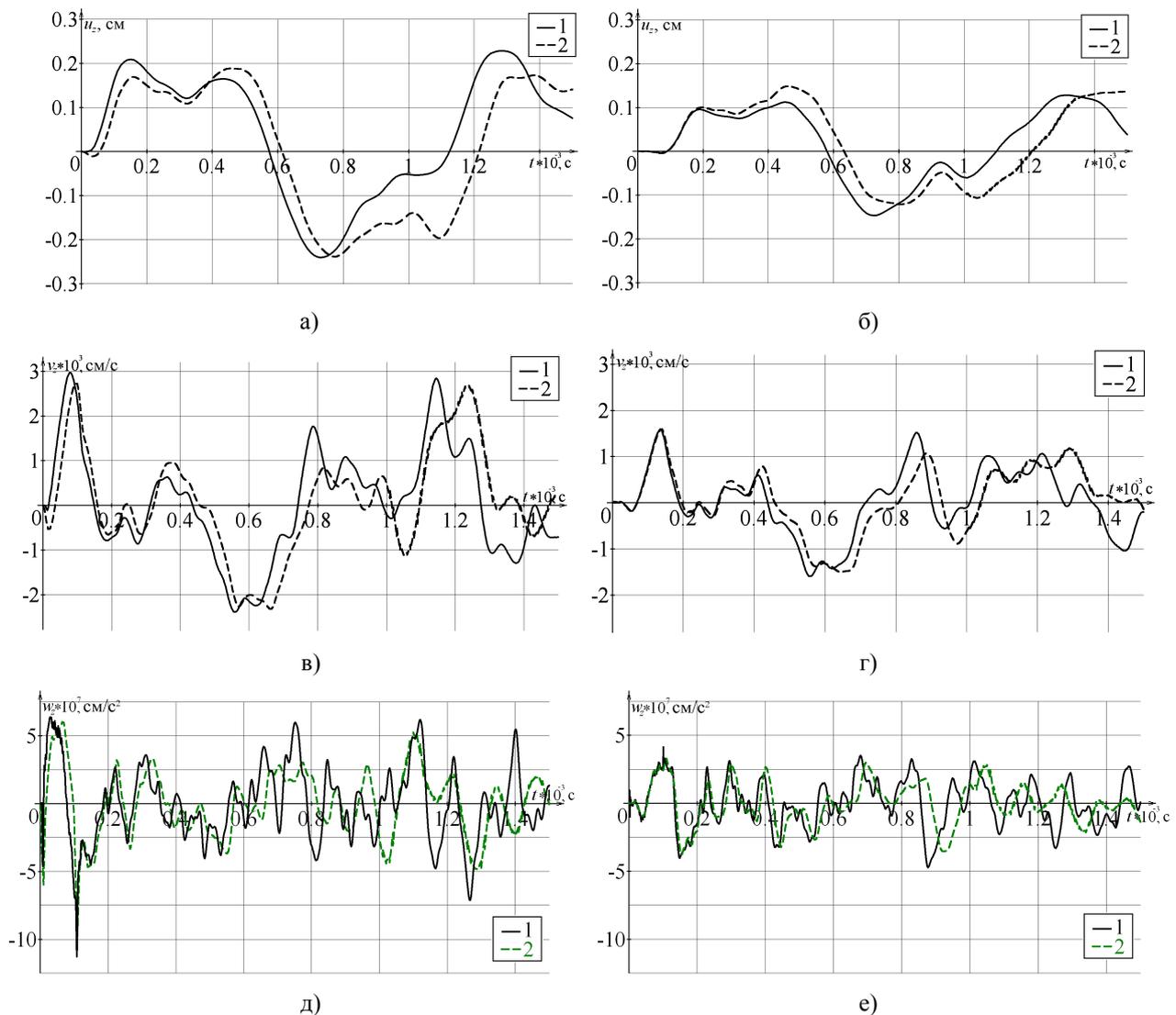


Рис. 7. Осевые перемещения (а-б), скорости (в-г) и ускорения (д-е) в контрольных точках А (а, в, д) и В (б, г, е), полученные по разработанной методике (кривая 1) и с использованием методики на основе классического метода конечных элементов (кривая 2)

ВЫВОДЫ

Создано методико-программное обеспечение для исследования переходных процессов в трехмерных пространственных конструкциях в виде тел вращения на основе полуаналитического метода конечных элементов.

Проведенные расчеты динамической реакции узла конструкции (на примере адаптера ракетносителя) на импульсное воздействие подтверждают устойчивость результатов, полученных с его помощью, по отношению к количеству удерживаемых гармоник, шагу и методам интегрирования в рамках построенной модели. Сопоставление результатов, полученных по различным методикам, свидетельствует об их соответствии.

С помощью разработанного методического обеспечения с достаточной точностью могут быть определены кинематические характеристики и напряжения в элементах конструкций космических аппаратов. Данная программная разработка характеризуется высокими показателями быстродействия при существенно меньших трудозатратах, что позволяет оперативно выполнять проектные исследования в условиях конструкторского бюро.

Работа частично выполнена при поддержке Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012-2016 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трякин В. П. Оценка резонансных режимов колебаний космического аппарата / В.П. Трякин, Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Ю.И. Матюхин // *Космічна наука і технологія*. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 40-44.
2. Шульженко Н. Г. Реакция оболочечных элементов космических аппаратов на импульсное воздействие / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 9 (106). – С. 53-58.
3. Шульженко Н. Г. Задачи термостойкости, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований) : монография / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Б.Ф. Зайцев. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. – 370 с.
4. Шульженко Н. Г. Численное моделирование динамической реакции конструкций на импульсное воздействие / Н.Г. Шульженко, Б.Ф. Зайцев, А.В. Асаенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 9 (116), С. 6-11.
5. Шульженко Н. Г. Методика расчета переходных процессов в трехмерных осесимметричных конструкциях при импульсном нагружении / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Т.В. Протасова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 8 (115), С. 148-151.

REFERENCES

1. Tryakin, V.P., Shul'zhenko, N.G., Gontarovskii, P.P. and Matyukhin, Yu.I. (2003), "Estimation of spacecraft vibrations resonant modes", *Kosmichna nauka i tekhnologiya*, vol. 9, no. 4, pp. 40-44.
2. Shul'zhenko, N.G. and Gontarovskii, P.P. (2013), "Response of spacecraft shell elements under impulse action", *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, no. 9(106), pp. 53-58.
3. Shul'zhenko, N.G., Gontarovskii, P.P. and Zaitsev, B.F. (2011), *Zadachi termoprochnosti, vibrodiagnostiki i resursa jenergoagregatov (modeli, metody, rezul'taty issledovanij): monografija* [Thermostability, vibrodiagnostics and resource of energy equipment (models, methods and investigation results): monograph], LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, Saarbrücken, Germany.
4. Shul'zhenko, N.G., Zaitsev, B.F. and Asaenok, A.V. (2014), "Numerical simulation of dynamic response of structure under impulse impact", *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, no. 9(116), pp.6-11.
5. Shul'zhenko, N.G., Gontarovskii, P.P. and Protasova, T.V. (2014), "Calculation method for transient process in 3D axisymmetric constructions under impulse loading", *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, no. 8(115), pp. 148-151.