

Е. Аринов¹, С.Ж. Карипбаев², К.З. Сартаев³¹ Жезказганский университет им. О.А. Байконурова, Казахстан;² Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан;³ Ежибастузский инженерно-технический институт им. К.И. Сатпаева, Казахстан
(E-mail: arinov91@mail.ru)

Динамическое напряженно-деформированное состояние односекционного манипулятора

Смоделирована динамика упруго-деформируемых плоских и пространственных механизмов. Построены матрицы, описывающие инерционные, диссипативные и жесткостные свойства элементов при действии внешних сил, сил инерции, дополнительных узловых сил. Полные перемещения при этом описаны суммой деформационных и кинематических перемещений. Разработаны алгоритм и комплекс вычислительного пакета прикладных программ на основе разработанных подходов, методической основы для многовариантных компьютерных расчетов сил, динамического напряженно-деформированного состояния в элементах упругих механизмов. Используемый в работе метод конечных элементов дает возможность для многовариантных расчетов напряженно-деформированного состояния механизмов, для установления закономерности распределения упругих перемещений, внутренних усилий, напряжений в зависимости от многочисленных факторов, т.е. упругих свойств, параметров движения, внешних статических и переменных во времени сил.

Ключевые слова: манипуляторы, метод конечных элементов, динамика, сила, упругие механизмы, внутреннее напряжение.

При исследовании плоских и пространственных механизмов актуальность приобретают проблемы их напряженно-деформированного состояния (НДС) [1–3], поэтому проведение расчета и полной оценки динамического НДС механизмов с упругими звеньями на основе их конечно-элементной модели требует дальнейшего исследования.

Учет упругости звеньев плоских и пространственных механизмов является одной из наиболее сложных и требующих дальнейшего изучения проблем. Исследованию механизмов и машин с упруго-деформируемыми прямолинейными и криволинейными звеньями посвящены работы [4–6].

Неоднозначность выбора механико-математической модели динамического НДС механизмов с присущими им геометрическими и физическими характеристиками представляется существенным для поставленной задачи.

В предлагаемой работе смоделирована на ПЭВМ задача динамики упругих механизмов с различными степенями свободы. Разработаны единые методические основы, алгоритм, комплекс вычислительных объектно-ориентированных пакетов прикладных программ для исследования динамики упруго-деформируемых механизмов при действии различных сил.

Для решения задачи динамического НДС упругих механизмов применяется метод Ньюмарка [7]:

$$[S] \{U\}_{t+\Delta t} = \{R_s(t)\}_{t+\Delta t}, \quad (1)$$

где $\{R_s(t)\}_{t+\Delta t} = \{F_2^{(l)}(t)\} + [M] \{b_n\} + [C] \{b_m\} + \{F_8^{(l)}(t)\} + \{F^{(l)}(t)\}$ — эффективная нагрузка; $[S] = a_0 [M] + a_1 [C] + [K]$ — эффективная матрица жесткости; $\{F_B^{(l)}(t)\}$ — внешние динамические силы; $\{F^{(l)}(t)\}$ — узловые силы инерции; $\{F_K^{(l)}(t)\}$ — дополнительные узловые силы; $[C]$ — внутреннее трение в материале, определяемое по Релею; $[K]$ — матрица жесткости системы с учетом вида кинематических пар механизмов; коэффициенты a_0, a_1 зависят от шага по времени Δt и определяются по вычислительному эксперименту по двум значениям коэффициентов демпфирования, относящимся к двум нижшим частотам колебаний механизмов; коэффициенты $\{b_n\}, \{b_m\}$ являются линейной комбинацией векторов упругих и кинематических перемещений, скоростей и ускорений, полученных в предыдущих шагах интегрирования. Выбор оптимального шага по времени при вычислении значений упругих перемещений

$\{U_{t+\Delta t}\}$ узлов в момент времени $t + \Delta t$ производится путем численного эксперимента и обеспечивает учет всех пиковых частей переменных нагрузок и устойчивость вычислительного процесса [2,3,7].

Для проверки эффективности метода Ньюмарка все полученные выше формулы систематизированы в последовательный алгоритм, составлены прикладные программы и реализованы на персональных компьютерах для механизмов погрузчика (рис. 1), механизма разгрузки контейнера (рис. 2) и многоконтурного параллельного манипулятора со многими степенями свободы с поступательными и вращательными парами (рис. 3); изучены изменения максимальных значений упругих динамических усилий, перемещений, напряжений в сечениях элементов манипулятора при действии различных сил; проанализировано НДС исследуемого манипулятора при полном его функционировании для других вариантов нагружения и кинематических параметров.

Механизм погрузчика [8] – устройство, обеспечивающее периодическое или непрерывное действие для погрузки, выгрузки и транспортирования грузов на небольшие расстояния. На рисунке 1 приведен механизм погрузчика для периодического перемещения и поворота ковша.

В схеме 1б) ковш загружается при перемещении всей машины. Такая кинематическая связь обеспечивает движение ковша по определенному закону при подъеме или опускании стрелы. На определенной высоте ковш наклоняется вперед и происходит выгрузка.

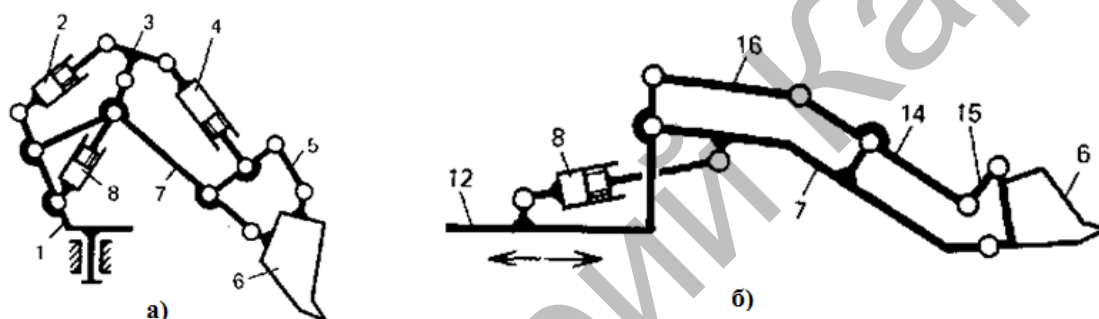


Рисунок 1. Поведение спиновой матрицы и потенциала

Механизм погрузчика можно моделировать с помощью стержневых элементов с различными геометрическими и упругими характеристиками.

Под действием внешних усилий каждая точка расчетного элемента деформируется. В каждой произвольной точке поперечного сечения пространственного расчетного стержневого элемента появляются шесть составляющих перемещения: три составляющих линейного перемещения u_ξ, v_η, w_ζ в направлении главных локальных осей $O_1\xi, O_1\eta, O_1\zeta$ системы координат $O'\xi\eta\zeta$ и три составляющих угла поворота $\varphi_\xi, \varphi_\eta, \varphi_\zeta$ соответствующего сечения вокруг тех же осей.

Выписываются все основные уравнения классической теории упругости по отношению к стержню.

Расчет механизма погрузчика в целом производится известными точными или приближенными математическими методами. Метод конечных элементов (МКЭ) [2,3,7], базирующийся на рассмотрении транспортных конструкций в виде совокупности отдельных конструктивных элементов, соединенных в конечном числе узловых точек, является наиболее эффективным численным методом.

Удовлетворяя условиям равновесия во всех узловых точках механизма погрузчика, множество систем уравнений для отдельных элементов может быть объединено в одну глобальную систему уравнений для всей системы механизма погрузчика относительно составляющих перемещений узлов и углов поворота всех узлов.

Для описания конечно-элементной модели механизма погрузчика (рис. 1) разбиваем их на прямолинейные стержневые элементы, соединенные в узлах. Узлы механизма погрузчика имеют нумерацию в глобальной системе координат (ГСК), которая служит для их идентификации в перечне узлов. Элементы имеют свои номера: начальный и конечный, с помощью которых в свою очередь производится их идентификация.

Каждому элементу механизма погрузчика присваивается набор упругих постоянных материала, характеризующих их физические свойства: модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность материала.

Считается, что звенья механизма погрузчика изготовлены из стальных стержней с поперечным сечением. Задаются форма и размеры поперечного сечения. Размерами и конструкцией узлов пренебрегают.

Механизм погрузчика состоит из различных кинематических пар. Элементы и узлы нумеруются. Координаты X , Y , Z узлов расчетной модели определены в ГСК, жестко соединенной неподвижным звеном.

Механизм разгрузки контейнера [8] – устройство, обеспечивающее захват, перемещение и опрокидывание контейнера.

На рисунке 2 показан механизм разгрузки контейнера, смонтированный на раме автомобиля.

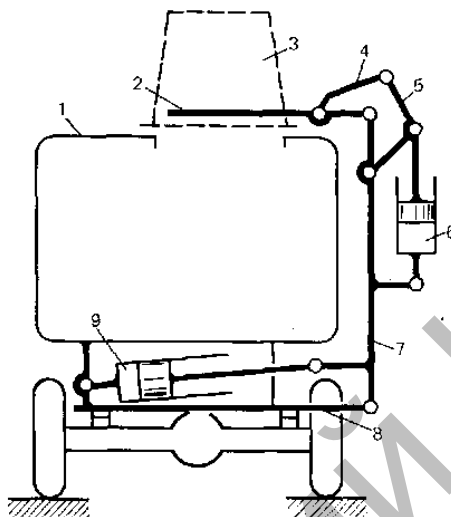


Рисунок 2. Механизм разгрузки контейнера

Для описанной выше физической модели идеально упругого тела в достаточной степени преимущественно используют сталь, а также другие металлы и их сплавы.

При конечно-элементном моделировании [2,3,7] нагрузку следует заменить системой статически эквивалентных сил, приложенных в узлах.

Стержневые элементы, являющиеся составной частью механизма разгрузки контейнера, описывают их НДС, находясь в условиях сложного сопротивления.

Расчет механизма разгрузки контейнера в целом, состоящего в основном из множества пространственных стержневых элементов с различными геометрическими и упругими характеристиками, приводит к практической возможности их решения известными точными или приближенными математическими методами: большой эффективностью при анализе поведения упругого механизма разгрузки контейнера обладает МКЭ [2,3,7]. Особые преимущества метода заключаются в удобстве формирования системы алгебраических уравнений высокого порядка и возможности представления совершенно нерегулярных и сложных объектов и условий нагружения.

При расчете статически неопределимых систем МКЭ в форме метода перемещений неизвестными являются перемещения узлов в ГСК, компонентами которых являются перемещения вдоль координатных осей OX , OY , OZ и углы поворота узловых сечений вокруг этих осей, остальные же параметры, характеризующие НДС механизма разгрузки контейнера, определяются через найденные значения узловых перемещений.

Для определения узловых перемещений получаем систему линейных уравнений, для решения которой могут быть применены различные методы решения [2,3,7]. Решением системы определяются узловые перемещения механизма разгрузки контейнера в ГСК и далее по найденному вектору перемещения определяются напряжения и деформации в любой точке любого элемента.

Далее по найденному вектору узлового перемещения для пространственного призматического стержня механизма разгрузки контейнера в любом сечении определяются внутренние силовые факторы и напряжения.

По разработанному алгоритму реализована также программа для исследования динамического НДС для упругого манипулятора параллельной структуры.

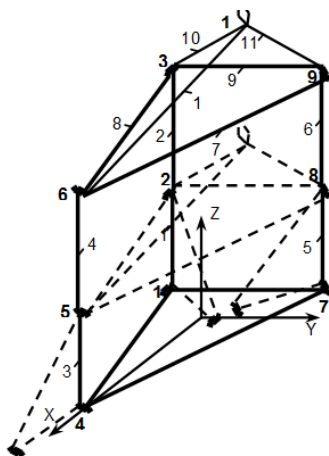


Рисунок 3. Манипулятор параллельной структуры

Многоконтурному манипулятору параллельной структуры платформенного типа со многими степенями свободы (рис. 3) соответствуют геометрические размеры звеньев $l_2 = l_4 = l_6 = \sqrt{2} \cdot l_1 <$, $l_7 = l_8 = l_9 = 1.5l_1 / \cos 30^\circ <$. Постоянные параметры Денавита-Хартенберга позволяют записать для каждого контура в отдельности символическое уравнение манипулятора для девяти кинематических пар.

Для описания конечно-элементной модели манипулятора разбиваем его на элементы, соединенные в узлах через кинематические пары. Для манипулятора, состоящего, в основном, из отдельных стержневых звеньев, такое расчленение является естественным. Узлы манипулятора имеют нумерацию в ГСК, элементы имеют свои номера: начальный и конечный.

Каждому элементу манипулятора присваивается набор упругих постоянных материала: модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν ; плотность ρ

$$E = 2 \cdot 10^5 0, \quad \rho = 7900 : 3 / <^3, \quad \nu = 0, 25. \quad (2)$$

Звенья манипулятора изготовлены из стальных стержней диаметром поперечного сечения 0,006 м. Формы и размеры сечения, упругие свойства материалов постоянны. Размерами и конструкцией узлов пренебрегают.

С помощью МКЭ разработаны единая методическая основа, алгоритм и составлен комплекс вычислительных объектно-ориентированных пакетов прикладных программ исследования динамического НДС упруго-деформируемого механизма погрузчика, механизма разгрузки контейнера, манипулятора параллельной структуры платформенного типа со многими степенями свободы при действии различных сил.

На рисунке 4 показаны изменения максимальных динамических упругих усилий в сечениях элементов манипулятора параллельной структуры с девятью элементами (рис. 3) от действия динамических сил, приложенных вертикально вниз в узлах 3, 4, 7 при полном его функционировании.

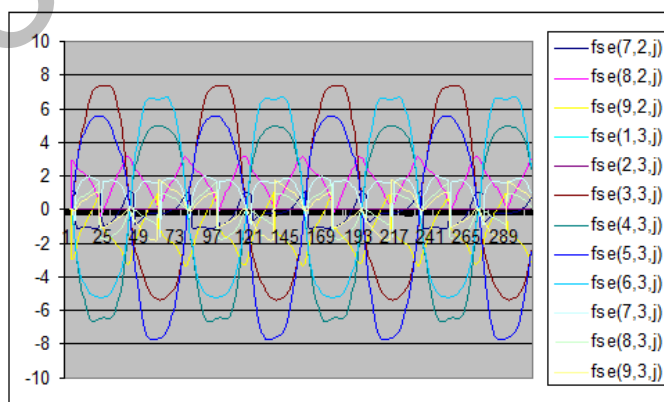


Рисунок 4. Внутренние усилия в узловых сечениях элементов манипулятора параллельной структуры

Краткие выводы

Проведена подробная детализация всех этапов вычислений для получения значений искомых величин путем реализации разработанных программных средств по исследованию динамического НДС на профессиональной версии языка программирования на специально отобранных задачах (механизм погрузчика, механизм разгрузки контейнера, манипулятор параллельной структуры). Разработанные алгоритмы и программы позволяют произвести полный количественный анализ динамических усилий, напряжений, выявить наиболее нагруженные звенья, наихудшие положения в пространстве упругих механизмов с различными геометрическими и физическими характеристиками.

Список литературы

- 1 Масанов Ж.К. Анализ сил и колебаний конструкций механизмов высоких классов пространственной топологии / Ж.К. Масанов, Е.С. Темирбеков, Е.А. Биртанов // Деп. в КазГосИНТИ, №6871-КА96. Деп. от 12.04.96 г. — 254 с.
- 2 Агапов В.П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций / В.П. Агапов. — М.: АСВ, 2000. — 152 с.
- 3 Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. — М.: Мир, 1975. — 541 с.
- 4 Масанов Ж.К. Конечно-элементная модель движения упругих механизмов / Ж.К. Масанов, К. Сартаев, Л.А. Хаджиева, С. Жолдасов // Труды VI Междунар. конф., Санкт-Петербург, Россия (14-17 июня 2005 г.). — СПб., 2005. — С. 141-146.
- 5 Масанов Ж.К. Квазистатическая упругая устойчивость пространственных МВК / Ж.К. Масанов, К.З. Сартаев, Г.А. Абдраимова // Проблемы механики современных машин: материалы II Междунар. конф. (23-29 июня 2003 г.). — Улан-Удэ, 2003. — Т. 3. — С. 62-65.
- 6 Масанов Ж.К. Квазистатика трехмерных МВК с криволинейными упругими звеньями и силами трения в кинематических парах / Ж.К. Масанов, А.Е. Елеусинова, А.С. Тулепов // Вестн. КазНУ. Сер. математика, механика, информатика. — 2002. — № 2(30). — С. 132-138.
- 7 Курков С.В. Метод конечных элементов в задачах динамики механизмов и приводов / С.В. Курков. — СПб.: Политехн. ун-т, 1991. — 224 с.
- 8 Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам / А.Ф. Крайнев. — М.: Машиностроение, 1987. — 560 с.

Е. Аринов, С.Ж. Карипбаев, К.З. Сартаев

Бір секциялы манипулятордың динамикалық кернеулі-деформацияланған күйі

Серпімді-деформацияланған жазық және кеңістікті механизмдердің динамикасы моделденген. Сыртқы, инерция, қосымша түйінді күштерінің әсерінен элементтердің инерциялық, диссипативті, қатаңдық қасиеттерін белгілейтін матрицалары құрылған. Бұл жағдайда толық ауысулар деформациялық және кинематикалық ауысулармен сипатталады. Күштің көпнұсқалық компьютерлік есебінің әдістемелік негізінде серпімді элементтердің механизмдерінде динамикалық кернеулі-деформацияланған күйі үшін және құрылған амалдардың негізінде қолданбалы бағдарламалардың есептеуіш пакеттері, алгоритмі мен кешені жасалған. Жұмыста қолданылған ақырлы элементтер әдісі механизмдердің кернеулі-деформацияланған күйінің көпнұсқаулық есептеулері, ішкі күштер және серпімді ауысулардың үлестіру заңын анықтау үшін, көптеген факторларға тәуелді кернеулердің, оның ішінде серпімді қасиеттері, қозғалу параметрлері, уақыт бойынша статикалық және айнымалы күштер үшін, мүмкіндік туғызады.

Кілт сөздер: манипуляторлар, ақырлы элементтер әдісі, динамика, күш, серпімді тетіктер, ішкі кернеу.

E. Arinov, S.Zh. Karipbaev, K.Z. Sartayev

Dynamic stress-strain state of a single-section manipulator

The dynamics of elastically deformed plane and spatial mechanisms is modeled. Matrices are constructed that describe the inertial, dissipative, and stiffness properties of elements under the action of external forces, inertia forces, additional nodal forces. The total displacements are described by the sum of deformation and kinematic displacements. An algorithm and a complex of a computational package of applied programs are developed on the basis of the developed approaches, Methodical basis for multivariate computer calculations of forces, dynamic stress-strain state in the elements of elastic mechanisms. The finite element method used in the work makes it possible for multivariate calculations of the stress-strain state of the mechanisms, To establish the regularity of the distribution of elastic displacements, internal forces, stresses, depending on numerous factors: Elastic properties, motion parameters, external static and time-varying forces.

Keywords: manipulators, finite element method, dynamics, force, elastic mechanisms, internal stress.

References

- 1 Masanov, Zh. K., Temirbekov, E.C. & Birtanov, E.A. (1996). Analiz sil i kolebaniï konstruksii mekhanizmov vysokikh klassov prostranstvennoi topologii [Analysis of forces and vibrations of structures of high-class space topology]. *Dep. In KazGOCINTI. No 6871-KA96. De.12.04.96, 254* [in Russian].
- 2 Agapov, V.P. (2000). Metod konechnykh elementov v statike, dinamike i ustoichivosti prostranstvennykh tonkostennykh podkreplennykh konstrukcii [The finite element method in statics. Laminamics and stability of the space of thin-walled reinforced structures]. Moscow: ASV [in Russian].
- 3 Zenkevich, O. (1975). *Metod konechnykh elementov v tekhnike [Finite Element Method in Engineering]*. Moscow: Mir [in Russian].
- 4 Masanov, Zh.K., Sartayev, K.S., Khadzhieva, L.A. & Zholdasov, S. (2005). Konechno-elementnaia model dvizheniia upruhikh mekhanizmov [Finite-element model of the motion of elastic mechanisms]. *VI Mezhdunarodnaia konferentsiia Sankt-Peterburg (14-17 iunია 2005 hoda) – VI International Conference Saint Petersburg.* (pp. 141–146) [in Russian].
- 5 Masanov, Zh.K., Sartayev, K.Z. & Abdraïmova, G.A. (2003). Kvazistaticheskaia upruhaia ustoichivost prostranstvennykh MVK [Quasistatic elastic stability of gavels of spatial MVK]. Proceedings from Problems of mechanics of modern machines: *II Mezhdunarodnaia konferentsiia (23-29 iunია 2003 hoda) – 2nd International Scientific and Practical Conference* (Vol. 3, pp. 62–65). Ulan-Ude [in Russian].
- 6 Masanov, Zh.K., Eleus, A.E. & Tulepov, A.S. (2002). Kvazistatika trekhmernykh MVK s krivolineinymi upruhimi zveniami i silami treniia v kinematicheskikh parah [Quasi-statics of re-dimensional MVK with curvilinear elastic links and frictional forces in kin. Couples]. *Vestnik KazNU. Serii matematika, mehanika, informatika – Bulletin of KazNU. Series mathematics, mechanics. Informatics, 2(30), 132–138* [in Russian].
- 7 Kurkov S.V. (1991). *Metod konechnykh elementov v zadachakh dinamiki mekhanizmov i privodov [The finite element method in problems of the dynamics of mechanisms]*. Saint Petersburg: Politekhnikeskii universitet [in Russian].
- 8 Kraïnev A.F. (1987). *Slovar-spravochnik po mekhanizamam [Dictionary-reference on mechanisms]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].