

00052

На правах рукописи

Кузьмин Дмитрий Васильевич

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫВОДА УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ
МЕТОДА СВЯЗНЫХ ГРАФОВ

Специальность: 05.02.05 - Робототехника, мехатроника и
робототехнические системы



АВТОРЕФЕРАТ

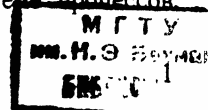
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2002 г.

В. А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Решение задач проектирования приводов и систем управления роботов различного целевого назначения требует адекватного математического описания объектов управления (ОУ). Современные ОУ часто представляют собой механические системы, имеющие пространственную структуру и большое число степеней свободы. Наличием таких ОУ характеризуются роботы-манипуляторы, многокоординатные станки с ЧПУ для обработки деталей со сложной поверхностью, шагающие роботы и прочие подобные системы. Математическое описание данных ОУ достаточно трудоемко и его желательно полностью автоматизировать. До настоящего времени задача автоматизации математического описания ОУ решалась в основном с использованием численных методов. Известно, что применение численных методов связано с необходимостью учета всех факторов, влияющих на устойчивость вычислительного процесса и точность результатов. Кроме того, решение задач синтеза алгоритмов управления нередко требует наличия математической модели ОУ в виде замкнутой системы дифференциальных уравнений движения. Возможности современной компьютерной графики и компьютерной алгебры позволяют автоматизировать вывод уравнений динамики в аналитическом виде. Научная работа в этом направлении интенсивно ведется как отечественными, так и зарубежными организациями. Алгоритмы вывода уравнений динамики механизмов роботов в аналитическом виде традиционно основываются на классических методах динамики. Однако наиболее общим при решении задач моделирования динамических объектов является системный подход, суть которого заключается в представлении объекта в виде системы, состоящей из связанных в общую структуру отдельных элементов. При этом как элементы, так и связи между ними описываются математическими уравнениями, отражающими физическую сущность протекающих в системе процессов.



Эффективность такого представления динамических систем обусловлена не только постоянством математического описания элементов (изменяется только структура), но и его независимостью от физической природы описываемых объектов. Системный подход, который давно и успешно применяется в автоматизированном проектировании электронных устройств, является основой описания динамики механических систем методом связанных графов (МСГ). Наряду с уравнениями движения, данный метод позволяет получать связный граф, наличие которого облегчает выявление динамических особенностей и контроль правильности выведенных на ЦЭВМ уравнений движения. Поэтому для автоматизации вывода уравнений динамики исполнительных систем роботов, МСГ представляется перспективным.

Изложенное дает основание считать, что тема диссертации, в которой разработаны алгоритмы автоматизированного вывода уравнений динамики исполнительных систем роботов на основе МСГ, является актуальной.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка эффективных алгоритмов вывода уравнений динамики исполнительных систем роботов на ЦЭВМ. Основными задачами исследования являются теоретическое обоснование МСГ, разработка на его основе математического и алгоритмического обеспечения автоматизированного вывода уравнений динамики голономных механических систем, анализ вычислительной эффективности разработанных алгоритмов, а также исследование возможности использования МСГ в задачах математического описания исполнительных систем роботов с учетом упругости звеньев механизмов.

Методы исследования. В основу теоретических исследований в данной работе положены методы аналитической механики, матричного анализа, теоретические основы электротехники, методы компьютерной алгебры, а также компьютерное моделирование в среде MathCAD®.

Научная новизна. Анализ состояния вопроса показывает, что представление динамики исполнительных систем с большим числом степеней свободы в виде связанных графов не является традиционным и общепринятым. Этим обусловлена научная новизна данной работы, одной из задач которой является теоретическое обоснование МСГ, а также получение на его основе математического обеспечения алгоритмов автоматизированного описания динамики исполнительных систем роботов. МСГ взят из практики описания динамики механизмов роботов-манипуляторов иностранными учеными Г. Пейнтером и М. Шахинпуром.

Практическая ценность. Практическая ценность результатов, полученных в диссертации, заключается в их использовании для создания эффективной CAD/CAE системы, в которой полностью автоматизированы математическое моделирование и расчет исполнительных систем роботов.

В диссертации автор защищает:

- 1) уравнения динамики, следующие из описания МСГ голономной механической системы общего вида;
- 2) алгоритм описания кинематики исполнительных механизмов роботов, основанный на идее назначения систем координат, связанных с подвижными звеньями, в процессе формирования геометрической модели механизма;
- 3) алгоритм вывода уравнений динамики исполнительных механизмов роботов, основанный на МСГ и методах компьютерной алгебры;
- 4) общий алгоритм автоматизированного описания динамики исполнительных механизмов роботов;
- 5) математическое описание МСГ динамики исполнительных систем роботов с учетом упругости звеньев механизмов.

Достоверность полученных результатов, по мнению автора диссертации, подтверждается соответствием МСГ теоретическим основам механики, а также совпадением уравнений динамики манипуляторов типовых

кинематических схем, полученных по разработанным в диссертации алгоритмам, с уравнениями динамики, полученными классическим методом Лагранжа.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на региональных научно-технических конференциях «Новые информационные технологии в проектировании и производстве», проведенных в г. Северодвинске в 1998, 1999, 2000, 2001 гг., обсуждались на научно-методических заседаниях кафедры «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Результаты выполненных исследований используются в учебном процессе подготовки инженеров по специальности 07.18.00 «Мехатроника» в Севмашвузе, филиале С-Пб. ГМТУ им. А. Н. Крылова.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объем работы. По структуре и содержанию диссертация подразделена на введение, пять глав, заключение. Она содержит список использованной литературы, включающий 57 наименований. Всего диссертация содержит 208 с. машинописного текста, включающего таблицы и рисунки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе сформулирована задача автоматизации математического описания динамики голономной механической системы с удерживающими, идеальными и стационарными связями. Даны краткие характеристики методов динамики механических систем, используемых в робототехнике. Рассмотрены процедуры вывода уравнений движения голономной системы классическими методами Лагранжа, Эйлера и Гаусса. Установлено, что данные методы имеют особенности, в силу которых их использование как

основы алгоритмов автоматизированного описания динамики манипуляторов с большим числом степеней свободы в форме замкнутой системы дифференциальных уравнений не является предпочтительным.

Во второй главе изложена идея и основные положения МСГ. Дано описание динамики голономной механической системы общего вида с использованием МСГ. Получено и теоретически обосновано общее уравнение динамики, на основе которого разработаны алгоритмы вывода уравнений движения разомкнутой механической системы без ветвления. Разработаны алгоритмы линеаризации уравнений движения в окрестностях опорной траектории или точки. Показано, что разработанные алгоритмы могут быть использованы в случае голономных систем с ветвлением кинематической цепи, как разомкнутых, так и имеющих замкнутые контуры.

Основные положения МСГ состоят в следующем. Динамическая система представляется как совокупность взаимосвязанных элементов, между которыми осуществляется обмен энергией. При этом сама система рассматривается как часть более широкой системы, от элементов которой в нее поступает энергия и к элементам которой энергия возвращается. Элементами *механической системы* являются:

- масса или момент инерции относительно оси (*инерционный накопитель энергии*);
- жесткость упругого звена (*емкостной накопитель энергии*);
- трение вязкое или сухое (*элемент, рассеивающий энергию*);
- функциональный преобразователь (*элемент, изменяющий параметры энергии*).

Состояние каждого элемента системы определяется скоростью изменения его координаты (*поток*) и силовым воздействием (*усилие*), вызывающим изменение координаты. Обобщенные скорости и координаты абсолютных скоростей точек механической системы являются переменными типа «поток», а силы и моменты сил, вызывающие изменение этих координат, –

переменными типа «усилие». Связный граф механической системы отображает элементы и структуру обмена энергией между элементами; уравнения движения выводятся применением к узлам графа закона (1), являющегося следствием закона сохранения механической энергии:

$$\sum_k e_k = 0, \quad (1)$$

e_k – сходящиеся в узле усилия.

Связный граф голономной системы, состоящей из материальных точек C_i с массами $m_i, i=1, \dots, n$ и числом степеней свободы $m=3 \cdot n - r > 0$, где r – число удерживающих, идеальных и стационарных геометрических связей, представлен на рис. 1.

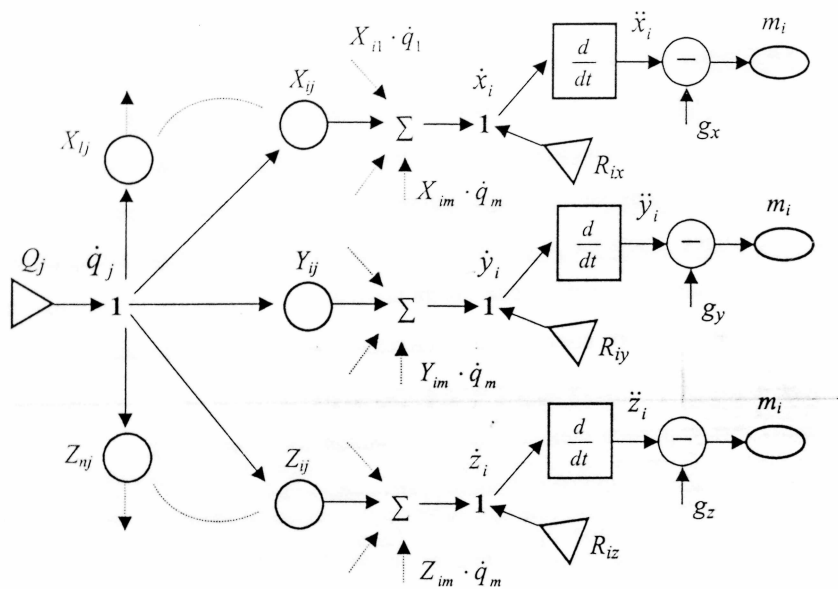


Рис. 1. Связный граф голономной системы общего вида.

На связном графе обозначены: треугольниками – источники усилий (силы и моменты Q_j , действующие по обобщенным координатам q_j со стороны приводов, $j=1, 2, \dots, m$, R_i – силы внешней нагрузки, приложенные к точкам

системы); окружностями – функциональные преобразователи

$$X_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial q_j}, Y_{ij} = \frac{\partial y_i}{\partial q_j}, Z_{ij} = \frac{\partial z_i}{\partial q_j}; \text{ эллипсами – массы точек, } r_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T -$$

положения точек в неподвижной системе координат, $g = [g_x \quad g_y \quad g_z]^T -$

ускорение свободного падения. Применение закона (1) к узлам 1 связного графа приводит к общему уравнению динамики:

$$Q_j = \sum_{i=1}^n \frac{\partial r_i}{\partial q_j} (m_i (\ddot{r}_i - g) - R_i), \quad (2)$$
$$j = 1, 2, \dots, m.$$

В диссертации показано, что уравнение (2), при тех же условиях, следует из общего уравнения динамики в форме Даламбера – Лагранжа. Это полностью доказывает соответствие МСГ теоретическим положениям аналитической механики. Физический смысл (2) состоит в том, что в любой момент времени t , силы или моменты, действующие непосредственно на обобщенных перемещениях, уравниваются силами или моментами, приведенными к данным перемещениям.

Использование (2) в качестве математической основы алгоритмов автоматизированного вывода уравнений динамики манипуляторов предполагает наличие функций положения $r_i = r_i(q_1, q_2, \dots, q_m)$; их определение является задачей кинематики. Традиционно, эта задача решалась следующим образом:

- 1) назначение неподвижной системы координат (СК);
- 2) формирование геометрической модели манипулятора;
- 3) назначение СК, связанных с подвижными звеньями;
- 4) вычисление матриц перехода;
- 5) вычисление функций положения.

Указанная последовательность действий с точки зрения автоматизации не является рациональной, так как предполагает назначение СК по отдельному алгоритму, например, алгоритму Денавита – Хартенберга. В диссертации

предложен алгоритм автоматизированного вывода функций положения, основанный на прямом назначении СК в процессе формирования трехмерной геометрической модели манипулятора в CAD-подсистеме. Поступательные и вращательные соединения звеньев моделируются в виде блоков (рис. 2).

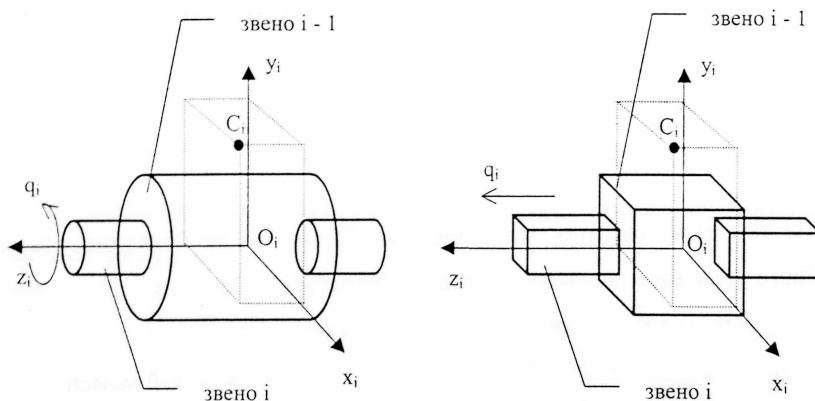


Рис. 2. Геометрические модели вращательного и поступательного соединений.

Символьные матрицы, описывающие перемещения звеньев во вращательном и поступательном соединениях соответственно:

$$Q_i = \begin{bmatrix} \cos q_i & -\sin q_i & 0 & 0 \\ \sin q_i & \cos q_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad Q_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots$$

Координаты центров масс C_i звеньев i в СК O_i, x_i, y_i, z_i вводятся пользователем при указании положений центров масс звеньев. Матрицы перехода автоматически вычисляются в виде:

$$A_i = H_i \cdot Q_i, \quad H_i = \begin{bmatrix} R_i & p_i \\ 0 \dots 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{постоянные матрицы, определяемые}$$

геометрией звеньев, $i=1,2,\dots,n$. Вывод функций положения звеньев осуществляется по известному соотношению: $r_i^0 = A_1 A_2 \dots A_i r_i^i$, верхний

индекс указывает номер СК, в которой задается положение точки (0 – неподвижная СК). Алгоритм вывода уравнений динамики использует алгоритм символьного дифференцирования функций одной переменной и основывается на декомпозиции задачи вывода уравнений динамики. Суть декомпозиции состоит в том, что уравнения (2) можно представить в виде суммы векторов:

$$P = M + S - G - T + B + K, \quad (3)$$

где $P=[P_j]$ - вектор управляющих сил и моментов, развиваемых приводами звеньев, $M=[M_j]$, $S=[S_j]$ – векторы сил и моментов сил инерции, обусловленные соответственно ускорениями и скоростями в соединениях, $G=[G_j]$ – сил тяжести, $T=[T_j]$ – сил внешней нагрузки, $K=[K_j]$ – сил упругости, $B=[B_j]$ – сил вязкого трения в соединениях, $j=1,2,\dots,n$. Символьные выражения для этих векторов вычисляются согласно формулам (4) – (9), а затем суммируются в соответствии с (3).

$$M_j = \sum_{i=1}^n m_i (f_{1ij} \bar{x}_i + f_{2ij} \bar{y}_i + f_{3ij} \bar{z}_i), \quad \bar{x} = F_1 \ddot{q}, \quad \bar{y} = F_2 \ddot{q}, \quad \bar{z} = F_3 \ddot{q}; \quad (4)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^n m_i (f_{1ij} \hat{x}_i + f_{2ij} \hat{y}_i + f_{3ij} \hat{z}_i), \quad \hat{x} = \sum_{l=1}^n \Phi_{1l} \dot{q} \dot{q}_l, \quad \hat{y} = \sum_{l=1}^n \Phi_{2l} \dot{q} \dot{q}_l, \quad \hat{z} = \sum_{l=1}^n \Phi_{3l} \dot{q} \dot{q}_l; \quad (5)$$

$$G_j = \sum_{i=1}^n m_i (f_{1ij} g_1 + f_{2ij} g_2 + f_{3ij} g_3), \quad g_1 = g_x, g_2 = g_y, g_3 = g_z; \quad (6)$$

$$T_j = \sum_{i=1}^n (f_{1ij} R_{1i} + f_{2ij} R_{2i} + f_{3ij} R_{3i}), \quad R_{1i} = R_{xi}, R_{2i} = R_{yi}, R_{3i} = R_{zi}; \quad (7)$$

$$K_j = k_j q_j; \quad (8)$$

$$B_j = b_j \dot{q}_j; \quad (9)$$

$$\text{где } q = [q_j], \quad F_1 = [f_{1ij}] = \left[\frac{\partial x_i^0}{\partial q_j} \right], \quad F_2 = [f_{2ij}] = \left[\frac{\partial y_i^0}{\partial q_j} \right], \quad F_3 = [f_{3ij}] = \left[\frac{\partial z_i^0}{\partial q_j} \right],$$

$$\Phi_{kl} = \frac{\partial F_k}{\partial q_l}, k=1,2,3; j=1,2,\dots,n.$$

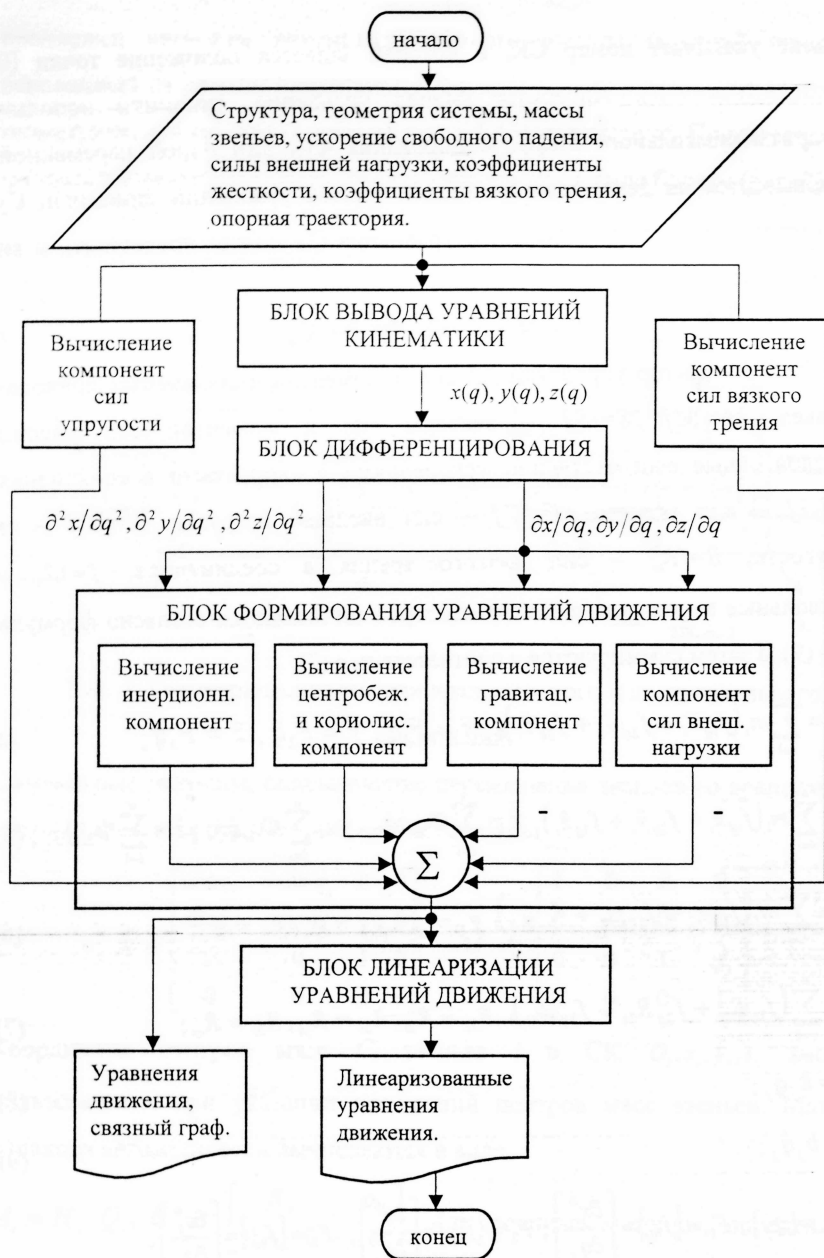


Рис. 3. Общий алгоритм описания динамики исполнительных механизмов роботов-манипуляторов.

Общий алгоритм описания динамики исполнительных механизмов роботов-манипуляторов приведен на рис. 3. В конце второй главы приведены символьные алгоритмы линеаризации разложением в ряд Тейлора уравнений динамики манипуляторов в окрестности опорной траектории или точки. Показано, что разработанные алгоритмы вывода уравнений динамики могут быть использованы в случае голономных систем с ветвлением и наличием замкнутых кинематических контуров. Для определения ветвлений кинематической цепи был использован структурный алгоритм П. Б. Слиеде.

В третьей главе выполнена проверка работоспособности полученных алгоритмов описания кинематики и динамики по критерию тождественности выводимых с их использованием уравнений движения уравнениям, полученным по алгоритму Денавита – Хартенберга (кинематика) и методом Лагранжа (динамика). В качестве объектов моделирования были взяты исполнительные механизмы промышленных роботов-манипуляторов с типовыми кинематическими схемами и тремя основными степенями свободы: “MHU Senior”, фирмы-производители – Robert Bosch (Германия), Electrolux (Швеция); “Skilam SR 4000-G”, фирма-производитель – Sankyo (Япония). Проведенные исследования показали, что разработанные на основе МСГ алгоритмы приводят к тем же уравнениям движения, что и алгоритмы, построенные на основе классических методов. Таким образом, работоспособность алгоритмов, разработанных на основе МСГ, подтверждается практически.

В четвертой главе проведен анализ вычислительной эффективности алгоритмов, построенных на основе МСГ, в задачах вывода уравнений динамики. Основным показателем вычислительной эффективности является зависимость числа N_a операций сложения и умножения, необходимых для вывода уравнений динамики разомкнутой кинематической цепи без ветвления, от числа степеней свободы n кинематической цепи:

$$N_a(n) = N_K(n) + N_M(n) + N_S(n) + N_G(n),$$

где $N_K(n)$ – число операций, необходимых для описания кинематики; $N_M(n)$ – для вычисления вектора M ; $N_S(n)$ – для вычисления вектора S ; $N_G(n)$ – для вычисления вектора G . Значения $N_a(n)$, $N_d(n)$ для $n = 1, 2, \dots, 6$, приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Число степеней свободы, n	1	2	3	4	5	6
Число операций умножения и сложения, N_a	220	682	1452	2697	4693	7780
Число операций дифференцирования, N_d	6	30	81	168	300	486
Общее число операций	226	712	1533	2865	4993	8266

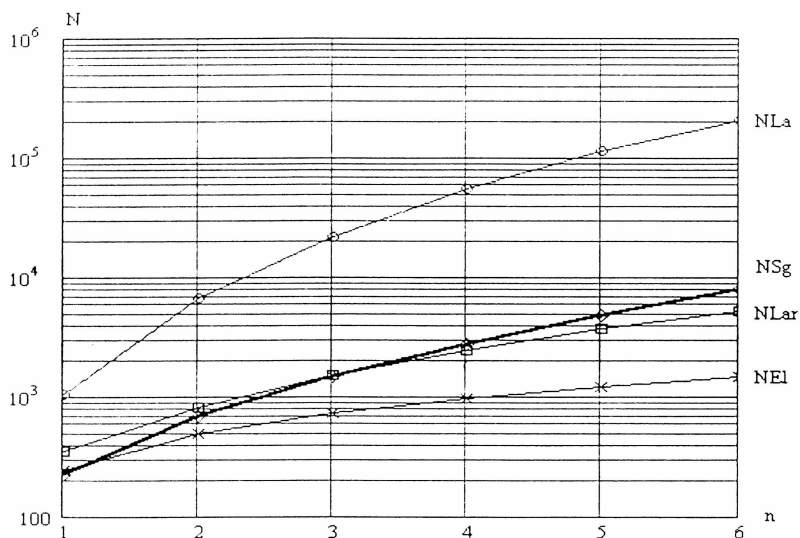


Рис. 4. Число операций сложения и умножения при реализации методов: NSg – МСГ; $NLar$ – Лагранжа, с рекуррентным описанием кинематики; NLa – Лагранжа, с описанием кинематики матрицами однородных преобразований

координат; NEI – Эйлера, с рекуррентным описанием кинематики и динамики.

На рис. 4 приведены графики показателей вычислительной эффективности методов Лагранжа, Эйлера и МСГ. Анализ графиков показывает, что МСГ приближается к методу Лагранжа с описанием кинематики рекуррентными уравнениями, который в настоящее время является самым выгодным в вычислительном плане методом, позволяющим получать замкнутые системы уравнений движения. Таким образом, показано, что МСГ обладает приемлемой вычислительной эффективностью, которая достигается за счет прямого формирования уравнений динамики в виде (2) и исключения операций умножения элементов на ноль.

В пятой главе обоснована целесообразность применения МСГ в задачах математического описания исполнительных систем роботов с учетом упругой податливости звеньев механизма. Показано следующее:

- математическое описание МСГ механических систем с упругими звеньями принципиально не отличается от описания механических систем с абсолютно твердыми звеньями;
- связные графы, описывающие динамику электрических и механических систем, идентичны;
- отображение взаимосвязи механической и электрической частей системы на связном графе имеет физический смысл гираторной связи.

Установлено, что применение МСГ в задачах математического описания динамики исполнительных систем роботов дает следующие преимущества:

- Возможность полной автоматизации описания динамики, основанная на инвариантности математического описания систем различной физической природы;
- В связных графах динамических систем имеет место четкое разделение переменных, характеризующих состояние элементов, и потоков энергии

между элементами, что позволяет существенно упростить анализ динамики этих систем.

Приведено математическое описание МСГ динамики исполнительной электромеханической системы робота-манипулятора с двумя степенями свободы, учитывающее упругость валов передаточных механизмов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Выявлены преимущества применения МСГ в задачах автоматизации математического описания динамики механических систем, имеющих пространственную структуру и большое число степеней свободы. Данные преимущества заключаются в повышении вычислительной эффективности алгоритмов за счет прямого вывода уравнений движения (2), который осуществляется без формирования сложных выражений для механической энергии или принуждения по Гауссу, а также в отсутствии рекуррентных вычислительных процедур.
2. Дано математическое описание голономной механической системы общего вида методом связанных графов. Показано, что математическое описание голономных механических систем МСГ равносильно описанию таких систем на основе общего уравнения Даламбера - Лагранжа.
3. Разработаны алгоритмы описания кинематики голономных механических систем без ветвления, эффективность которых обусловлена определением систем координат в процессе формирования геометрической модели в 3D - графическом редакторе.
4. Разработаны алгоритмы вывода уравнений движения голономных механических систем без ветвления на основе МСГ и методов компьютерной алгебры. Эффективность разработанных алгоритмов обусловлена указанными преимуществами МСГ, а также покомпонентным формированием уравнений движения и исключением символьных операций умножения над нулевыми элементами массивов.

5. Исследованы особенности вывода уравнений движения механических систем с ветвлением кинематической цепи. Показано, что автоматизация математического описания динамики систем с ветвлением может быть осуществлена на основе алгоритмов, разработанных для случая системы без ветвления, и структурного алгоритма П. Б. Слиеде.
6. Получено математическое описание динамики исполнительных механизмов промышленных роботов-манипуляторов «МНУ-Senior» и «Skilam SR 4000-G» методом Лагранжа при описании кинематики с использованием алгоритма Денавита – Хартенберга, а также при помощи алгоритмов, основанных на МСГ. Сопоставление уравнений движения, полученных различными методами, показало их тождественность, а, следовательно, и работоспособность разработанных в диссертации алгоритмов.
7. Получена зависимость числа математических операций, необходимых для вывода уравнений движения разомкнутой кинематической цепи методом связанных графов, от числа степеней свободы кинематической цепи. Показано, что по данному показателю МСГ более чем на порядок превосходит метод Лагранжа и приближается к модифицированному методу Лагранжа, использующему описание кинематики при помощи рекуррентных процедур.
8. Выявлены преимущества описания роботов-манипуляторов связными графами в задачах математического описания динамики, заключающиеся в повышении наглядности и информативности, а также в возможности перехода от графического описания к уравнениям движения путем применения простого закона (1).

В целом, выполненная диссертационная работа, имеющая квалификационный характер, позволила развить идею применения системного подхода к математическому описанию динамики исполнительных систем роботов, а также разработать математическое и алгоритмическое обеспечение для создания эффективной САПР роботов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кузьмин Д. В. Автоматизация математического описания динамики сложных механических систем при помощи метода связанных графов. // Новые информационные технологии в проектировании и производстве. Тезисы докладов. Северодвинск, РИО Севмашвузу, 1998. С. 7 – 9.
2. Кузьмин Д. В. Алгоритмы вычисления модулированных преобразователей при построении связанных графов манипуляторов. // Вопросы технологии, эффективности производства и надежности. Вып. №17, ч. 1. Северодвинск, Типография ПО СМП, 1999. С. 88 – 91.
3. Кузьмин Д. В. Автоматизация определения положений роботов-манипуляторов с использованием САД – систем и методов компьютерной алгебры. // Вопросы технологии, эффективности производства и надежности. Вып. №17, ч. 2. Северодвинск, Типография ПО СМП, 1999. С. 50 – 56.
4. Кузьмин Д. В. Автоматизация кинематического и динамического описания сложных голономных механических систем. // Севмашвуз: вчера, сегодня, завтра. Северодвинск, РИО Севмашвузу, 2000. С. 30 – 32.
5. Кузьмин Д. В. Автоматизация описания динамики роботов-манипуляторов методом связанных графов. // Вопросы технологии, эффективности производства и надежности. Вып. №18. Северодвинск, Типография ПО СМП, 2001. С. 69 – 74.
6. Крутько П. Д., Кузьмин Д. В. Метод связанных графов в задачах математического описания динамики голономных механических систем. // Проблемы машиностроения и надежности машин, №6, 2001. С. 63 – 68.
7. Кузьмин Д. В. Вычислительная эффективность классических методов динамики в задачах автоматизации вывода уравнений движения. // Проблемы машиностроения и надежности машин, №2, 2002. С.
8. Кузьмин Д. В. Структура алгоритмического обеспечения автоматизированной системы вывода уравнений динамики методом связанных графов. // Проблемы машиностроения и надежности машин, №3, 2002. С.