

1562352

На правах рукописи

Яскевич Андрей Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ
ПРОЦЕДУР РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
КОСМИЧЕСКИХ МАНИПУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПОЛУНАТУРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ**

**Специальность 05.13.16 – Применение вычислительной техники
и математических методов
в научных исследованиях**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва - 1999

Работа выполнена на кафедре "Системы автоматического управления" в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
академик РАЕН
Пупков К.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Евсеев О.В.

кандадат технических наук, доцент
Серов В.А.

Ведущая организация: Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК)

ая 1999 года в 14 час. 30 мин. на
12 в Московском государственном
иана по адресу: 107005 ул. 2-я

в библиотеке МГТУ им. Н.Э.

999 года.

1562352

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1562352

Яскевич А. В. Разработка ме

Неусыпин К. А.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы.

Принципиальной проблемой наземной обработки операций, выполняемых с помощью космических манипуляторов, является невозможность адекватной их реализации в условиях действия поля силы тяжести. Вследствие этого возрастает роль программных и полунатурных комплексов моделирования. Многие космические роботизированные операции выполняются в режиме полуавтоматического управления, то есть с участием оператора. Поэтому их моделирование необходимо осуществлять в реальном масштабе времени. Наиболее сложной подсистемой манипуляторов, с точки зрения объема необходимых для расчета математических операций, являются их исполнительные механизмы. Для космических манипуляторов эта сложность значительно возрастает вследствие необходимости обязательного учета упругости конструкции их исполнительных механизмов. Автоматизация получения уравнений и процедур расчета движения манипуляторов позволяет сократить сроки разработки и, что особенно важно, увеличить надежность программного обеспечения. Но существующие методы решения этой задачи обладают значительной вычислительной избыточностью. Получаемые на их основе программы не могут обеспечить моделирование динамических процессов в реальном масштабе времени без использования очень мощного компьютера. Поэтому задача совмещения достоинств автоматизации получения и высокого быстродействия процедур расчета движения этого класса управляемых механических систем является актуальной.

Цель работы

- разработка методики автоматизированного формирования вычислительных процедур, гарантирующих расчет движения механических систем манипуляторов за минимальное число тактов процессора, в реальном масштабе времени.

Методы исследования.

Для решения поставленной задачи использовались методы вычислительной математики и механики, теории структур и баз данных, теории экспертных систем, а также теории управления роботами-манипуляторами

Научная новизна.

1. Получена новая, наиболее эффективная в вычислительно отношении формулировка уравнений движения механических систем космических манипуляторов;
2. Предложен и реализован новый комбинированный метод упрощения математических выражений, позволяющий обеспечить глобальный минимум объема вычислений при расчете движения механических систем;
3. Разработаны модель данных, алгоритмы реализации математических операций и исключения избыточных вычислений в новой специализированной системе символьных преобразований;
4. Разработана математическая модель движения космического манипулятора, предназначенная для расчета в реальном масштабе времени при полунатурной отработке процессов управления.

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами сравнительного компьютерного моделирования и данными полунатурной экспериментальной отработки процессов управления.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Разработан комплекс программ для формирования и оптимизации в символьном виде вычислительных процедур расчета движения механических систем космических манипуляторов.

С помощью этого комплекса программ получены процедуры расчета в реальном масштабе времени движения упругого космического манипулятора и полезного груза при выполнении сборочных операций.

Использование полученных процедур в системе управления 6-степенным динамическим стендом в ракетно-космической корпорации "Энергия" им. С.П. Королева позволило провести полунатурное моделирование выполняемых с помощью манипулятора операций стыковки и укладки полезного груза.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на конференции "Опыт создания и внедрения методов и средств проектирования и расчета динамических систем и процессов с учетом показателей сложности" (Москва, 1985г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Техническое и программное обеспечение комплексов полунатурного моделирования" (Гродно,

1988 г.), на Всесоюзном совещании “Методы компьютерного конструирования моделей классической и небесной механики-89” (Ленинград, 1989 г.); на XXXI, XXXIV научно-технических конференциях РУДН (Москва, 1995 г., 1998 г.); на международной конференции ‘New Computer Technologies in Control Systems, NCTCS-95’ (Pereslavl-Zalessky, Russia, 1995); на 2-м международном симпозиуме “Интеллектуальные системы”, INTELS’96 (Санкт-Петербург, 1996 г.); на международной конференции “Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении” (Саратов, 1997 г.); на 3-й международной научно - практической конференции “Пилотируемые полеты в космос” (Звездный городок, 1997 г.).

Публикации. По основным положениям диссертации опубликовано 16 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и выводов, изложенных на 159 страницах машинописного текста, содержит 18 рисунков и 1 таблицу, включает 143 наименования отечественной и зарубежной литературы, всего 173 страницы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы. Определены цель и задачи исследования, дана структура диссертации и ее содержание по главам, приведены основные научные результаты, которые выносятся на защиту.

Первая глава диссертации посвящена анализу источников вычислительной избыточности в двух основных подходах к автоматизации составления уравнений динамики механических систем (МС), использующих обобщенные алгоритмы моделирования (ОАМ) и программные системы для формирования соответствующих вычислительных процедур в символьном виде.

ОАМ является матричной записью предварительно полученных кинематических и динамических соотношений для некоторого класса МС. Значения специальных параметров превращают его в уравнения движения (УД) для конкретной сис-

темы. Вычислительная эффективность ОАМ определяется формализмом, с помощью которого описывается движение тел, а также структурой уравнений динамики. Их замкнутая форма связывает все обобщенные ускорения в систему линейных алгебраических уравнений. Она является традиционной и используется в подавляющем числе работ, связанных с расчетом движения или управлением МС (Медведев И.С., Лесков А.Г., Кулаков Ф.М., Вукобратович М., Виттенбург И., Wicker J. и др.) Характерной ее особенностью является нелинейная зависимость объема необходимых вычислений от числа n степеней свободы МС. В наиболее экономичных формулировках замкнутой формы уравнений динамики она является кубической (Bae D.S., Hwang R.S., Haug E.J., Shabana A.A. и др.), в менее эффективных вычислительные затраты пропорциональны n^4 . Значительно более экономичные рекуррентные алгоритмы решения прямой задачи динамики обеспечивают только линейный рост объема вычислений от числа степеней свободы МС (Верещагин, Armstrong W.W., Featherstone R., Brandl H., D'Eleutario G.M.T., Ellenbroek M.H.M., Rodriguez G., Nasser M.G.)

Источником вычислительной избыточности всех ОАМ вне зависимости от их структуры являются операции с блочными слабо заполненными векторами и матрицами; повторяющиеся вычисления; операции с постоянным результатом; операции со вспомогательными параметрами, определяющими структуру МС. Компьютерное формирование УД МС в символьном виде дает возможность реализовать предварительное, до начала вычислений, исключение избыточных операций. При этом наиболее рациональный способ получения искомых соотношений заключается в символьной реализации ОАМ. Для исключения избыточных математических операций в настоящее время используются прямые или обратные методы исключения избыточных вычислений.

Прямые методы (Араис Е.А., Дмитриев В.М., Kircanski M. и др.) учитывают свойства конкретных математических выражений (МВ) и реализуются с помощью оптимизирующих формул (ОФ) в специализированных программных системах генерации текста вычислительных процедур. ОФ – это запись некоторого МВ с исключением априорно установленных избыточных вычислений. Локальность ее дей-

ствия и априорность используемой информации позволяют реализовать только частичное автономное упрощение отдельных выражений.

Обратные методы исключения избыточных вычислений формируются на основе общих свойств всего класса оптимизируемых МВ. Они реализуются с помощью правил условных подстановок, применение которых обусловлено значениями операндов. Для компьютерного представления формул с учетом значений операндов используются системы символьных преобразований (ССП), в которых математические выражения отображаются на некоторые структуры данных.

В универсальных СПП (АНАЛИТИК, РЕФАЛ, MACSYMA, REDUCE, FORMAC, MAPLE и др.) допускаются формулы произвольного вида, а для их кодирования используется списковая структура данных. Ее основным недостатком является более сложные алгоритмы просмотра математических выражений, которые значительно усложняют и вид правил подстановки. В специализированных СПП для вывода УД МС часто учитывается полиномиальный вид скалярных выражений. Это позволяет реализовать табличное кодирование формул с простой программной реализацией правил автономного упрощения МВ (Вукобратович М., Почтаренко М.В., Кульветис Г.П. и др.). Основным недостатком такого представления является фиксированный состав переменных, соответствующий числу степеней свободы МС. Это делает невозможным исключение повторяющихся вычислений, в частности, символьную реализацию рекуррентных УД.

При использовании обратных методов существует противоречие между возможной глубиной просмотра и детальностью применяемых правил упрощения МВ. Попытка удовлетворить оба эти требования одновременно приводит к так называемому проклятию размерности. Поэтому, как правило, реализуется допустимое, но не оптимальное упрощение.

Анализ существующих методов параллельных вычислений в динамике манипуляторов (Binder E.E., Lee C.S.G., Ramos S., Furth B., Kircanski N. и др.) показал, что из-за сильной связности математических соотношений, лежащих в основе решения прямой задачи, при моделировании МС может быть реализован параллелизм только нижнего уровня, при котором одновременно выполняются только короткие цепочки скалярных операций. В этом случае достигаемый выигрыш во времени по-

глощается при обмене информацией между процессорами. Поэтому предварительная оптимизация УД в символьном виде и уменьшение длины скалярных МВ для минимизации обмена данными между процессором и оперативной памятью компьютера являются наиболее предпочтительным по критерию, основанному на соотношении достигаемого быстродействия к стоимости реализации.

На основе обзора существующих методов автоматизации получения УД и ускорения вычислений сделан вывод о необходимости и возможности разработки новой методики формирования и оптимизации процедур расчета движения МС манипуляторов с учетом достоинств каждого из существующих подходов. В конце главы сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе описываются новые наиболее эффективные по быстродействию обобщенные УД исполнительных механизмов манипуляторов и определяются их вычислительные свойства. Предлагается новый комбинированный метод исключения избыточных вычислений с использованием ССП, основанный на комбинации прямых и обратных методов упрощения МВ. Возможность его применения основана на использовании рекуррентных УД МС. Рекуррентные соотношения имеют наиболее простую структуру и минимальную длину. Это дает возможность наиболее полно реализовать прямые методы упрощения, которые основаны на замене всех априорно повторяющихся вычислений промежуточными переменными и на использовании ОФ для векторно-матричных произведений, содержащих одинаковые сомножители. В последнем случае скалярные выражения, определяющие элементы таких произведений, имеют устойчивые структурные особенности. Сочетание рекуррентных соотношений и прямых правил упрощения создает условия, при которых обратные методы гарантируют исключение всех оставшихся избыточных вычислений. Приняты допущения, учитывающие конструктивные особенности кинематическим схем космических манипуляторов и позволяющие сократить число применяемых правил исключения избыточных вычислений. Такая локализация класса исследуемых механических систем не сказываются на общности предложенного комбинированного метода упрощения МВ.

Описание распределенных упругих свойств звеньев выполнено с помощью фиктивных шарниров на основе метода "дискретных конечно-элементных моде-

лей". При этом обеспечивается наибольшая точность по статическим и динамическим критериям и не используется гипотеза о квазистатическом приближении, необходимая в методе модальных координат, определенных на собственных формах свободных колебаний.

Обобщенные векторно-матричные УД МС манипуляторов получены в предположении допустимости разделения переносного и деформационного движений тел. Это предположение учитывает динамические особенности космических роботизированных операций и позволяет применить линейные неявные методы интегрирования жестких дифференциальных уравнений динамики. Последнее обстоятельство в значительной степени определяет возможность выполнения расчета движения в реальном масштабе времени.

Для описания переносного движения использованы наиболее экономичные рекуррентные УД. Получена их модифицированная форма, объединяющая известные, но ранее применявшиеся порознь, наиболее эффективный метод исключения неизвестных и кинематическое описание, основанное на разделении нелинейных и линейных составляющих абсолютных ускорений тел и удобное для согласования с описанием их линейных деформаций. Рекуррентные УД МС твердых тел со структурой дерева включают обратные

$$M_j^* = M_j + \sum_{k \in NB_j} B_k^T H_k B_k = M_j + \sum_{k \in NB_j} \Delta M_k^{(j)}, \quad (1)$$

$$s_j^* = s_j - M_j (B_j a_{p(j)}^n + \eta_j) - \sum_{k \in NB_j} B_k^T h_k = s_j + \sum_{k \in NB_j} \Delta s_j, \quad (2)$$

$$A_j = P_j^T M_j^* P_j, \quad (3)$$

$$H_j = M_j^* - M_j^* (P_j A_j^{-1} P_j^T) M_j^*, \quad (4)$$

$$h_j = M_j^* (P_j A_j^{-1} P_j^T) (s_j^* + \dot{P}_j g_j) - s_j^* \quad (5)$$

и прямые

$$q_j = A_j^{-1} P_j^T (-M_j^* B_j a_{p(j)}^l + s_j^* + P_j g_j) \quad (6)$$

соотношения, в которых M_j^* — (6×6) — матрица приведенной инерции j -го и последующих тел кинематической цепи; s_j^* — (6×1) — вектор действующих на j -е

тело активных и инерционных моментов и сил с учетом последующих тел кинематической цепи; A_j – обобщенная масса, приведенная к осям возможных перемещений в j -й кинематической пары; H_j – (6×6) – матрица инерции j -го и последующих тел, некомпенсированной активными силами и моментами в j -й кинематической паре; h_j – (6×1) – вектор инерционных и активных сил и моментов, действующих на j -е и последующие тела и приведенных к j -й кинематической паре; B_j – (6×6) – матрица преобразования систем координат; P_j – (6×1) – вектор, связывающий обобщенные и относительные декартовы скорости в кинематической паре (КИ).

На следующей стадии упрощения блочные векторно-матричные уравнения (1) – (6) заменены автономными для поступательного и вращательного движений тел и дополнены рекуррентными кинематическими соотношениями. Это позволило выявить их структурные особенности и применить прямые методы исключения избыточных математических операций, основанные на замене повторяющихся вычислений промежуточными переменными и на использовании как ранее известных, так и вновь разработанных ОФ.

Для описания упругих колебаний отдельных звеньев используются уравнения динамики в замкнутой форме с постоянными параметрами. Матрица коэффициентов системы уравнений, полученная с учетом линейного неявного метода интегрирования, и обратная ей матрица имеют разреженную ленточную структуру. Это обеспечивает большую экономию вычислений при условии предварительной реализации данных соотношений в ССП. При этом обращение матрицы осуществляется предварительно, численно и независимо от процесса упрощения МВ.

Полученные в работе уравнения, при условии их символьной реализации, обеспечивают расчет движения механических систем манипуляторов с помощью минимального числа операций, а входящие в них скалярные МВ не содержат повторяющихся сумм. Единственное соотношение, в котором возможно использование альтернативных формул, определяет матрицу некомпенсированной инерции вращательного движения.

Третья глава диссертации посвящена описанию новой специализированной ССП, в которой программируются все входящие в УД МС стандартные векторно-матричные операции и ОФ. Она обеспечивает окончательное исключение избыточных вычислений с помощью обратных правил упрощения МВ. В ее состав входят реляционная база данных для хранения скалярных выражений, векторов и матриц УД, символьный процессор, реализующий выполнение математических операций и автономное упрощение скалярных выражений, и оптимизатор, осуществляющий выделение используемых МВ, их локальное и глобальное упрощение.

Получение процедуры расчета движения производится поэтапно. Сначала формируется ее макет. Далее на его основе определяется состав используемых промежуточных переменных (ПП) и соответствующих скалярных МВ. Окончательная оптимизация последних производится на последнем этапе.

Было установлено, что любое скалярное выражение в неизбыточных УД МС может быть записано в виде совокупности бескобочных сумм (БС), все слагаемые которых содержат не более трех символьных множителей.

$$\sum_{i \in I_A} n_i \cdot C_i \cdot \prod_{k=1}^3 V_{k,i}, \quad (7)$$

где n_i, C_i - постоянные численный и символьный, а $V_{k,i}$ - переменные множители; I_A - множество индексов слагаемых.

Это позволяет представить формулы строками фиксированной длины вне зависимости от числа переменных состояния МС и использовать табличный способ их кодирования при сохранении произвольного состава переменных. Произвольный состав переменных обеспечивает простоту исключения повторяющихся вычислений, а табличная организация данных позволяет реализовать регулярные алгоритмы символьных преобразований, значительно более простые и эффективные, чем при обработке списков.

Математические выражения УД МС отображаются на реляционную модель данных, которая включает таблицы описания произведений, бескобочных сумм, идентификаторов и матричных операндов. Структура строк и взаимодействие таблиц показаны на рис. 1, где SDT, PDT, IDT, MPT, MET - таблицы, содержание которых кодирует описания соответственно БС, произведений-слагаемых, идентифи-

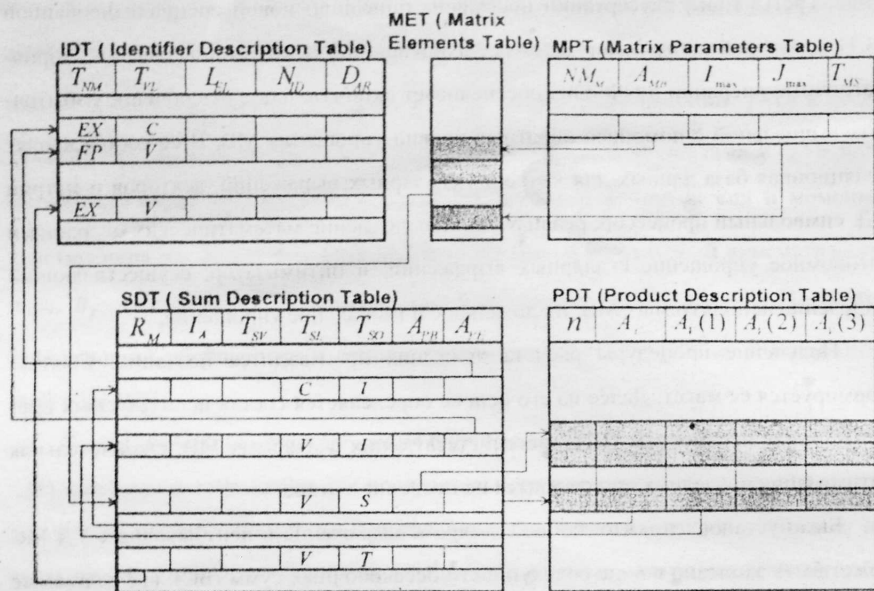


Рис. 1. Структура реляционной базы данных специализированной системы символьных преобразований

фикторов математических величин, параметров и элементов векторно-матричных операндов. n, A_C - численный множитель и код символьной константы, а $A_C(1) - A_C(3)$ - коды символьных операндов в произведении-слагаемом БС. R_M, I_A - кратность ссылок на переменную или константу (обозначающую БС) и ее индекс в соответствующем массиве, T_{SV}, T_{SL} - тип величины и тип ее локализации, T_{SO} - тип операции для БС специального вида, A_{PB}, A_{PE} - адреса первой и последней строки описания произведений-слагаемых БС в PDT. T_{NM}, T_{VL}, L_{EL} - тип имени, тип величины и длина в байтах элемента данных, обозначаемого идентификатором, N_D - имя идентификатора, D_{AR} - размерность массива данных с этим именем. NM_M, AM_M - имя матрицы и адрес ее первого элемента в MET, I_{max}, J_{max}, T_{MS} - максимальные значения индексов и тип структуры матрицы. Одна строка таблицы MPT содержит адрес описания в SDT элемента вектора или матрицы.

Символьный процессор выполняет операции сложения, умножения и деления отдельных скалярных операндов и их произведений. Его структура данных также ориентирована на обработку БС.

После получения макета вычислительной процедуры оптимизатор определяет кратность использования переменных и соответствующих скалярных МВ. Неиспользуемые выражения, на которые отсутствуют ссылки, исключаются из дальнейшего рассмотрения. Оставшиеся МВ, автономно упрощенные при выполнении математических операций, могут содержать только повторяющиеся произведения. Доказано утверждение, в соответствии с которым последовательность их замены промежуточными может быть произвольной. Однократное вычисление таких произведений должно быть согласовано с ранее сформированной последовательностью математических выражений. Поэтому оптимизатор имеет собственную структуру данных, в которой учитывается вид слагаемых БС.

Альтернативные варианты отдельных скалярных МВ накапливаются в таблицах символьного процессора. В результате их сравнения в оптимизаторе остается тот из них, для которого число умножений является минимальным. После завершения процесса упрощения по содержанию таблиц оптимизатора восстанавливается описание выражений в реляционной базе данных. В последующем на их основе выполняется генерация текста вычислительной процедуры на языке программирования высокого уровня.

Полученный алгоритм расчета движения является линейным, то есть не содержит циклических и условных операторов. Длина скалярных МВ позволяет разместить все их операнды в стеке процессора. В результате на самом нижнем, процессорном уровне оптимизации генерируются такая последовательность команд, при которой в память компьютера передается только конечный результат вычисления очередного СМВ, соответствующего терминальной или промежуточной переменной. Этот уровень оптимизации обеспечивается специализированным транслятором.

Четвертая глава работы посвящена описанию результатов применения разработанной методики для автоматизированного формирования вычислительных процедур расчета движения дистанционно управляемого манипулятора SRMS много-

разового космического корабля и переносимого им полезного груза большой массы в процессе стыковки последнего к космической станции. Приводится краткое описание особенностей этой динамической операции, схема 6-степенного стэнда для ее полунатурного моделирования, структура системы управления манипулятором, расчетная схема его исполнительного механизма.

Приводятся полученные автором формулы интегрирования линейным неявным методом дифференциальных уравнений переносного движения, позволяющие учесть кусочно-линейные характеристики привода с редуктором большой жесткости. Объем вычислений, необходимый для расчета движения манипулятора приведен в таблице 1. Он обеспечивает расчет управления от рукояток, движения манипулятора и полезного груза (54 степени подвижности с учетом упругих деформаций

Таблица 1

Число элементарных арифметических операций ($+$, $\times$, $/$, $=$), а также логических операций (if) и вычислений тригонометрических функций ($\sin/\tan$) при расчете движения манипулятора SRMS

Вид вычислений	Вид математических операций					
	+	$\times$	/	=	if	$\sin/\tan$
1-й прямой рекуррентный процесс	183	127	1	125	0	12
Обратный рекуррентный процесс	676	558	9	763	0	0
2-й прямой рекуррентный процесс	141	80	0	125	0	0
Расчет упругих деформаций	581	533	3	423	0	0
Расчет движения полезного груза	475	499	0	321	0	3
Расчет уравнений двигателей и редукторов	294	203	21	343	98	0
Расчет сигналов цифровых регуляторов	54	180	48	294	66	0
Алгоритм управления по скорости	339	229	51	310	149	29
Всего	2743	2409	133	2704	313	44

редукторов и звеньев) на компьютере Pentium-II/233 за время в три раза меньшее, чем длительность реального динамического процесса: шаг интегрирования (0.5мсек) реализуется менее чем за 0.17 мсек). Окончательная оптимизация процедуры дуры на уровне обмена данными между процессором и оперативной памятью компьютера позволяет увеличить ее быстродействие еще примерно в три раза.

Работоспособность разработанных вычислительных процедур, а та же влияние упругости исполнительного механизма манипулятора и расположения точки захвата полезного груза продемонстрированы на примере выполнения простого грубого маневра сближения. С этой целью был задан сигнал управления, который в случае жесткого ненагруженного манипулятора должен вызывать его движение вдоль оси сближения стыкующихся объектов. В течение первых 20 сек выполнялся разгон манипулятора и его движение с постоянной скоростью. После этого осуществлялось мгновенное прекращение управления и включение тормозов двигателей приводов, что вызывало колебания всей механической системы и значительную деформацию его звеньев и редукторов, срабатывание предохранительных муфт. Угловые колебания полезного груза относительно исходного невозмущенного положения показаны на рис. 2. Реальное управление осуществляется более плавно, на основе устойчивых навыков, формируемых в процессе тренировки оператора.

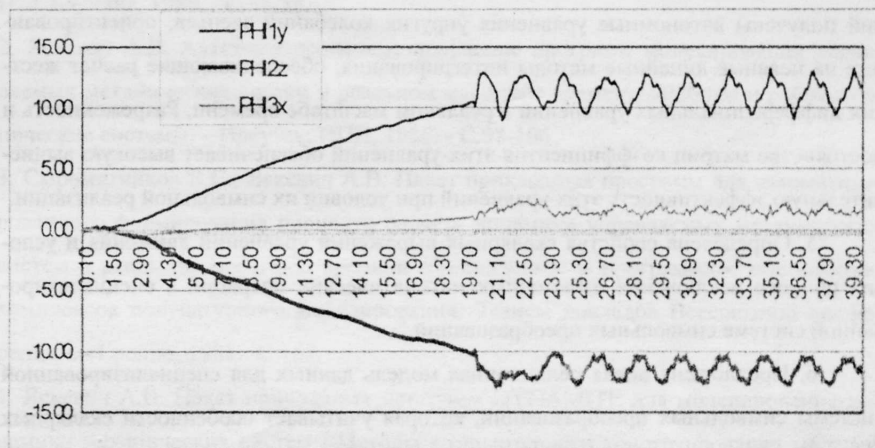


Рис. 2. Угловые колебания переносимого манипулятором полезного груза при выполнении грубого маневра

Основные результаты работы

1. На основе анализа вычислительной избыточности методов автоматизации получения уравнений движения механических систем определена последовательность формирования и оптимизации процедур расчета движения исполнительных систем манипуляторов. Предложен комбинированный метод исключения избыточных вычислений, объединяющий достоинства прямых и обратных методов упрощения математических выражений.

2. Среди наиболее экономичных рекуррентных формулировок уравнений движения систем твердых тел определена максимально эффективная. Получена ее модификация, наилучшим образом сочетающаяся с различными вариантами моделей упругих деформаций звеньев.

3. При записи неизбыточных автономных рекуррентных соотношений для поступательного и вращательного движений тел механической системы использованы прямые правила упрощения, основанные на исключении повторяющихся векторно-матричных операций и использовании ранее известных и вновь разработанных оптимизирующих формул

4. На основе гипотезы о разделении переносного и деформационного движений получены автономные уравнения упругих колебаний звеньев, ориентированные на неявные линейные методы интегрирования, обеспечивающие расчет жестких дифференциальных уравнений в реальном масштабе времени. Разреженность и постоянство матриц коэффициентов этих уравнений обеспечивает высокую вычислительную эффективность этих уравнений при условии их символьной реализации.

5. Определены свойства скалярных выражений уравнений движения и условия полного исключения избыточных математических операций в специализированной системе символьных преобразований.

6. Предложена новая реляционная модель данных для специализированной системы символьных преобразований, которая учитывает особенности скалярных выражений в неизбыточных уравнениях движения, обеспечивает эффективное исключение избыточных вычислений и простоту реализации алгоритмов символьных преобразований. На основе этой модели разработаны алгоритмы символьной ре-

лизации скалярных и векторно-матричных математических операций по стандартным и оптимизирующим формулам.

7. Разработан алгоритм определения используемых переменных и соответствующих им скалярных выражений, определена последовательность исключения в них повторяющихся произведений. Реализация и сравнение результатов упрощения математически эквивалентных, но альтернативных по форме математических выражений позволяет определить глобально оптимальную последовательность вычислений.

8. Получены вычислительные процедуры расчета в реальном масштабе времени движения 6-степенного упругого космического манипулятора для реализации в системе управления динамическим стендом, предназначенном для полунатурной отработки роботизированных сборочных операций.

Основное содержание диссертации изложено в публикациях:

1. Яскевич А.В., Лобусов Е.С. Автоматизированное формирование процедур расчета коэффициентов уравнений движения управляемых механических систем. //Автоматизированное проектирование систем управления. – Москва: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1986. - С.46-58.
2. Яскевич А.В. Автоматизированное получение программ моделирования управляемых механических систем в реальном масштабе времени //Роботы и робототехнические системы. – Иркутск: ИПИ, 1986. - С.98-106.
3. Сыромятников В.С., Яскевич А.В. Пакет прикладных программ для автоматизированного формирования процедур расчета динамики управляемых механических систем в реальном масштабе времени //Техническое и программное обеспечение комплексов полунатурного моделирования: Тезисы докладов Всесоюзной конференции. - Гродно, 1988. -С.157.
4. Яскевич А.В. Пакет прикладных программ DYNAMITE для моделирования динамики механических систем //Методы компьютерного конструирования моделей классической и небесной механики - 89: Материалы Всесоюзного совещания. - Ле-

нинград, 1989. - С.60-61. (Препринт ЛФ ИМАШ им. А.А. Благонравова АН СССР, № 32).

5. Яскевич А.В. Алгоритм моделирования динамики стыковки, выполняемой с помощью упругого манипулятора //Труды ЦНТИ "Поиск". Сер. XXII. Ракетно-космическая техника. - 1992. - № 3. - С.58-79.

6. Яскевич А.В. Уравнения движения манипулятора и полезного груза для полунатурной экспериментальной отработки операции стыковки //Труды ЦНТИ "Поиск". Сер. XXII. Ракетно-космическая техника. - 1993. - № 4. - С.3-20.

7. Кудрявцев В.В., Остроухов Л.Н., Яскевич А.В. Полунатурное моделирование сборочных операций выполняемых упругим манипулятором //Труды XXXI научной конференции РУДН. - М., 1995. - С.147.

8. Yaskевич A.V. Algorithms for generation of efficient rigid body system motion equation in symbolic form //New Computer Technologies in Control Systems: Proceedings of International workshop NCTCS-95. - Pereslavl-Zalessky, 1995. - P.75.

9. Яскевич А.В. Автоматизированное формирование алгоритмов максимального быстродействия для уравнений движения управляемых механических систем //Интеллектуальные системы: Труды II международного симпозиума INTELS'96. - СПб., 1996. - Т. 1. - С.238-241.

10. Яскевич А.В., Сыромятников В.С. Разработка алгоритмов расчета динамики упругого манипулятора для моделирования операции стыковки в реальном масштабе времени //Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении: Материалы международной конференции. - Саратов, 1997. - С.97-98.

11. Использование 6-степенного динамического стенда для отработки ручных режимов и тренировки операторов при управлении космическим манипулятором, выполняющим сборочные операции / В.В. Кудрявцев, Л.Н. Остроухов, В.С. Сыромятников, А.В. Яскевич //Пилотируемые полеты в космос: Тезисы докладов III международной конференции. - Звездный городок, 1997. - С.110.

Подписано к печати 19.04.99г. Зак.71

Объем 1,0 п.л. Тираж 100

Типография МГТУ им.Н.Э.Баумана