

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 11 (140)

ноябрь

2012

Редакционный совет:

БОЛОТНИК Н. Н.
 ВАСИЛЬЕВ С. Н.
 КАЛЯЕВ И. А.
 КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.
 КУЗНЕЦОВ Н. А.
 ЛЕОНОВ Г. А.
 МАКАРОВ И. М.
 МАТВЕЕНКО А. М.
 МИКРИН Е. А.
 ПЕШЕХОНОВ В. Г.
 РЕЗЧИКОВ А. Ф.
 СЕБРЯКОВ Г. Г.
 СИГОВ А. С.
 СИРОТКИН О. С.
 СОЙФЕР В. А.
 СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
 ФЕДОРОВ И. Б.
 ЧЕНЦОВ А. Г.
 ШЕРБАТЮК А. Ф.
 ЮСУПОВ Р. М.

Главный редактор:
 ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Заместители гл. редактора:
 ПОДУРАЕВ Ю. В.
 ПУТОВ В. В.
 ЮЩЕНКО А. С.

Ответственный секретарь:
 БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.
 АНТОНОВ Б. И.
 АРШАНСКИЙ М. М.
 БУКОВ В. Н.
 ВИТТИХ В. А.
 ВОСТРИКОВ А. С.
 ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.
 ГРАДЕЦКИЙ В. Г.
 ИВЧЕНКО В. Д.
 ИЛЬЯСОВ Б. Г.
 КОЛОСОВ О. С.
 КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.
 КУЗЬМИН Н. Н.
 ЛЕБЕДЕВ Г. Н.
 ЛОХИН В. М.
 НОРЕНКОВ И. П.
 ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
 ПРОХОРОВ Н. Л.
 РАПОПОРТ Э. Я.
 СЕРГЕЕВ С. Ф.
 ТИМОФЕЕВ А. В.
 ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
 ФРАДКОВ А. Л.
 ФУРСОВ В. А.
 ЮРЕВИЧ Е. И.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Тягунов О. А.** Развитие технологий прямых корневых методов в задачах исследования систем управления. 2
Матвеев М. Г., Семёнов М. Е., Шевлякова Д. В., Канищева О. И. Зоны устойчивости и периодические решения перевернутого маятника с гистерезисным управлением . . . 8

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Тюрин И. Ю., Вылегжанин А. С., Кольбова Э. В., Скобелев П. О., Шепилов Я. Ю.** Опыт разработки и внедрения мультиагентной системы для оперативного управления инструментальным цехом ОАО "Ижевский мотозавод — Аксион-Холдинг" 15

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семёнов Е. А., Суханов А. Н.** Применение разгрузочных элементов в конструкции робота-экзоскелета 20
Павловский В. Е., Панченко А. В. Модели и алгоритм управления движением малого шестиногого робота 23

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

- Мельник Э. В., Горелова Г. В.** Эффект выравнивания вычислительной нагрузки процессорных устройств в высоконадежных распределенных информационно-управляющих системах. 29
Гагарин Ю. А. Методы повышения отказоустойчивости элементов памяти вычислительных и управляющих систем 35
Ву Дык Лунг, Падерно П. И., Сатторов Ф. Э. Человеческий фактор в корпоративных сетях. Часть 2. Управление 41

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- Шароватов В. Т., Лошицкий П. А.** Математическая модель силового оболочкового бесштокового пневмоцилиндра одностороннего действия с возвратной пружиной . 45
Кузовкин В. А., Филатов В. В., Чумаева М. В. Моделирование процессов управления бесконтактным двигателем постоянного тока 49
Гулуев Г. А., Пашаев А. Б., Пашаев Ф. Г., Рзаев Ас. Г., Сабзиев Э. Н. Алгоритм определения усилия на шток по потребляемой мощности электропривода во время работы станка качалки. 55

Журнал в журнале "УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Кулифеев Ю. Б., Афанасьев Ю. Н.** Алгоритмизация автоматической посадки самолета в условиях метеоминимума 60
Сапунков Я. Г., Молоденков А. В. Решение модифицированной задачи оптимального разворота космического аппарата 66
Contents 71

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

УДК 62-50:519.6

О. А. Тягунов, д-р техн. наук, проф.,
tyagunov@mirea.ru,
Московский государственный
технический университет радиотехники,
электроники и автоматики

Развитие технологий прямых корневых методов в задачах исследования систем управления

Рассматривается задача разработки алгоритмического и программного обеспечения на основе прямых корневых методов для исследования устойчивости и синтеза управляющих устройств систем управления. Полученные результаты позволяют исследовать процессы управления в линеаризованных моделях сложных систем большой размерности.

Ключевые слова: система управления, исследование устойчивости и качества, прямые корневые методы

Введение

Исследование процессов в сложных системах управления в последнее время приобретает все более важное значение. Под сложными будем понимать такие системы, у которых для описания процессов приходится использовать системы дифференциальных уравнений (СДУ) большой размерности (десятки, сотни и даже тысячи).

Методы исследования сложных систем можно разбить на две группы. В рамках *первой*, наиболее многочисленной, группы для облегчения исследования сложной динамической системы ее математическое описание обычно подвергают предварительным преобразованиям, таким как *декомпозиция* (расчленение сложной системы на несколько более простых), *агрегатирование* (объединение нескольких простейших частей в более сложные укрупненные блоки), *трансформация* (преобразование, не изменяющее порядка уравнения, но приводящее схему к более удобному виду). Чаще всего использование методов первой группы основано на построении приближенных моделей исходных сложных систем. Это имеет место, например, при введении "макропеременных" при построении моделей сложных экономических систем по исходному описанию на "микроуровне" [2]; при использовании моделей сравнения с последующей процедурой построения векторных функций Ляпунова [3]; при использовании метода структурных сингулярных возмущений [4] и т. д. Несмотря на достаточно

широкое распространение на практике этой группы методов, актуальной является проблема обобщения их применимости.

Методы *второй* группы основаны на непосредственном (прямом) использовании тех или иных методов, в том числе и численных, для изучения свойств систем. Эти методы могут быть полезны как для изучения свойств систем, так и для проверки (верификации) эффективности первой группы. Эта группа методов наиболее эффективна при использовании подхода, связанного с выделением базовых режимов работы, линеаризацией исходной системы дифференциальных уравнений в окрестности этих режимов, исследованием устойчивости этих режимов и синтезом управляющих устройств, обеспечивающих заданное качество процессов в системе.

Отмеченную группу методов исследования в случае линейных систем можно разбить на два класса — *прямые методы*, заключающиеся в нахождении корней характеристического уравнения (собственных чисел матриц) системы, и *косвенные методы*, не использующие в явном виде процедуры нахождения корней характеристического уравнения (собственных чисел матриц).

Исторически сложилось так, что основные усилия исследователей, работавших над решением задач устойчивости систем автоматического управления, были сосредоточены на развитии *косвенных методов*. В значительной степени это можно объяснить стремлением получить удобные для практического использования инженерные методики. Помимо чисто алгебраических методов (использующих критерии Рауса, Гурвица, Льенара—Шипара, Шура—Кона, построение областей устойчивости, метод *D*-разбиения и др.), развивались и другие косвенные методы. Наибольшие успехи были достигнуты в развитии частотных методов исследования устойчивости и качества систем управления.

С помощью косвенных методов были решены задачи расчета и проектирования большого числа систем управления в различных предметных областях [5—8]. Начиная с 60-х гг. XX века объектом пристального внимания исследователей становятся новые классы объектов управления:

1) сложные электромеханические системы (многозвенные роботы-манипуляторы, управляемые конструкции космических станций и т. д.) [9—12];

2) сложные объекты с распределенными параметрами, для управления которыми используется распределенное управление (задачи управления плазменными установками различного назначения) [13—15].

Использование косвенных методов для решения основных задач исследования систем управле-

ния перечисленного класса, описываемых дифференциальными уравнениями высокого порядка, оказалось *неэффективным*. Поэтому в последние годы возрастает интерес к использованию прямых методов для исследования систем управления.

Краткая история развития прямых методов

Ограниченность использования прямых методов в инженерной практике исследования и проектирования систем была очевидна с момента зарождения теории управления (70—80 гг. XIX века, Дж. К. Максвелл, Н. А. Вышнеградский) и связана со знаменитой теоремой Н. Абеля о неразрешимости алгебраических уравнений высоких степеней (выше или равной 5) в радикалах. Усилиями Э. Галуа были заложены основы теории групп и решена проблема разрешимости алгебраических уравнений в радикалах. Параллельно развивалось направление, связанное с нахождением собственных чисел матриц, используемых для описания динамики механических систем (К. Якоби).

Появление средств вычислительной техники в середине XX века дало мощный импульс развитию прямых методов. Наряду с известными ранее методами Лобачевского и Бернулли решения алгебраических уравнений появились новые методы, основанные на приведении исходного полинома к виду произведения полиномов более низких степеней (методы Лина, Фридмана, Берстоу—Хичкока, Лагерра, Дженкинса—Трауба и т. д.). Были разработаны программные средства, реализующие известные алгоритмы нахождения корневых алгебраических уравнений. Обширный опыт решения задач исследования линейных систем с использованием существующих прямых методов показал их эффективность для сравнительно небольшого порядка (не более 20). При больших значениях размерности возникают проблемы, связанные со сложностью решения соответствующих вычислительных алгоритмов линейной алгебры (обращение матриц, решение алгебраических уравнений с применением итеративных методов и т. д.).

При использовании прямых методов могут быть использованы два класса алгоритмов:

- 1) вычислительные алгоритмы нахождения собственных чисел матриц (алгоритмы Якоби, Ланцоша, *QR*- и *QL*-алгоритмы и т. д.);
- 2) алгоритмы нахождения решения характеристических уравнений матриц.

Первый класс алгоритмов имеет свои достоинства и недостатки, изучался во многих публикациях [16, 17] и в данной статье рассматриваться не будет.

Развитие прямых методов исследования систем

Методы нахождения решений алгебраических уравнений можно разбить на два класса — прямые точные и прямые приближенные методы.

Прямые точные методы — это методы, основанные на нахождении решений уравнений в виде конечной совокупности функциональных зависимостей. Здесь наиболее известны многочисленные исследования, посвященные разрешимости алгебраических уравнений в радикалах (Лагранж, Абель, Галуа и др.) [18]. Менее известны результаты Эрмита, Кронекера, Клейна, Умемур, Билардинелли и др. исследователей о разрешимости алгебраических уравнений в классах гиперэллиптических функций и гипергеометрических функций [19—20].

Несмотря на явно ограниченные возможности прямых точных методов, они обладают рядом достоинств. Во-первых, эти методы заключаются в реализации конечной совокупности функциональных операций и позволяют находить решения с произвольной точностью, а во-вторых, в них не используются итеративные циклы, поэтому нет проблем с расходимостью итеративного процесса из-за накопления ошибок вычислений. В целом можно отметить перспективность этих методов при решении уравнений высокого порядка, однако практически отсутствуют работы, посвященные исследованию вычислительных аспектов этой группы методов.

Прямые приближенные методы [21—23] базируются на различных итеративных алгоритмах приближенного нахождения решений. К их достоинствам можно отнести универсальность, однако при высоких порядках уравнений очень часто имеет место расходимость итеративного процесса, вызываемая, как правило, накоплением ошибок вычислений.

Основные направления развития прямых точных корневых методов. Прямые точные методы — это методы, основанные на нахождении решений уравнений с помощью конечного числа сравнительно простых вычислительных операций. В случае арифметических рациональных операций и операций извлечения корней (радикалов) обычно говорят о *разрешимости Абеля—Галуа*. Наиболее значительный вклад в решение этой проблемы был внесен Лагранжем, Абелем и Галуа. В частности, разрешимыми являются алгебраические уравнения низких порядков (≤ 4). Существует ряд способов построения разрешимых уравнений степени 5 [24]. Можно отметить общий способ построения группы Галуа произвольного уравнения [25], интересный не столько практически, сколько теоретически.

К разрешимым классам уравнений относятся так называемые абелевы уравнения, частным случаем которых являются двухчленные уравнения [24]

$$x^m - a = 0. \quad (1)$$

Следует заметить, что разрешимость в радикалах общего уравнения степени n над полем k означает возможность выразить *единообразно*, т. е. одной и той же формулой, корни любого уравнения степени n над полем k через его коэффициенты и фиксированные элементы поля k с помощью арифме-

тических операций и извлечения корней. Отсутствие такой формулы не означает невозможности решения в радикалах конкретных уравнений. Например, любое алгебраическое уравнение над полем комплексных чисел разрешимо в радикалах, так как его корни лежат в этом поле. По-видимому, задача перечисления классов разрешимых уравнений для произвольной степени уравнений, основанная на концепции Абеля-Галуа, не имеет решения, по крайней мере, в настоящее время. Поэтому рассмотрим другую, более узкую, постановку задачи о разрешимости алгебраических уравнений.

В работе [1] решалась практически важная задача нахождения класса уравнений над полем действительных или комплексных чисел, которые обладают следующим свойством — для нахождения решений уравнения требуется конечное число арифметических и радикальных операций. Будем называть такие уравнения *разрешимыми в вычислительном отношении*.

Рассмотрим алгебраическое уравнение n -й степени над полем комплексных или действительных чисел

$$F(x) = x^n + a_1x^{n-1} + \dots + a_n = 0. \quad (2)$$

Дадим следующее определение [1].

Определение. *Алгебраическое уравнение с действительными коэффициентами будет обладать свойством вычислительной разрешимости, если с помощью конечного числа рациональных операций над коэффициентами уравнения и операции извлечения корня n -й степени можно найти корни этого уравнения без использования итеративных методов нахождения корней уравнений.*

Следует заметить, что все перечисленные операции над коэффициентами уравнения должны выполняться с высокой (произвольной) точностью.

В работе [1] было показано, что уравнение с единственным действительным корнем α кратности n обладает свойством вычислительной разрешимости.

К сожалению, остается *открытым вопросом* о возможности распространения развитой методики на остальные случаи — действительные корни кратности, большей или равной трем, кратные комплексные корни различной размерности. Следует отметить, что развитие подобного подхода, заключающегося во введении понятия вычислительной разрешимости уравнений и разработке нового класса алгоритмов решения алгебраических уравнений, представляется *крайне перспективным*, поскольку позволяет построить новый класс вычислительных алгоритмов, имеющих атрибуты *интеллектуальности*. На необходимость построения подобных алгоритмов указывали еще такие признанные авторитеты, как Уилкинсон [26] и Трауб [27], полагавшие, что такие алгоритмы будут иметь большую эффективность по сравнению с их чисто вычислительными версиями.

Рассмотрим еще один из *вариантов построения прямого метода* нахождения решения алгебраиче-

ских уравнений, основанный на использовании предпосылок, отличных от принятых в теории Абеля—Галуа. Дело в том, что в теории Галуа используется сравнительно узкий класс допустимых вычислительных операций — арифметические и радикальные операции над коэффициентами алгебраического уравнения. В 1858 г. практически одновременно Эрмит и Кронекер доказали [20], что решение уравнения 5-й степени может быть получено с помощью эллиптической модулярной функции. В работе [20] было показано, что *решение алгебраических уравнений может быть получено через модулярную функцию Зигеля, которая явно выражается через этта-константы*.

Мы не будем рассматривать базовую теорему о структуре решения, доказанную Умемурой [20], а лишь отметим вычислительные аспекты ее использования.

1. Теорема Умемуры предполагает наличие лишь простых корней алгебраического уравнения, что несколько снижает ее практическую значимость.

2. Для нахождения решения необходимо находить матрицы периодов гиперэллиптической кривой исходного алгебраического уравнения. К сожалению, в существующей литературе этот вопрос практически не рассматривался. Можно лишь отметить появляющиеся в последнее время работы по вычислительным аспектам алгебраической геометрии [29], в которых этот вопрос только начинает рассматриваться.

3. Для нахождения решения необходимо занумеровать корни алгебраического уравнения. Но эти значения корней априорно неизвестны, в этом случае достаточно эти корни разделить. При этом можно использовать, например, теоремы Штурма о разделении корней действительных или комплексных корней алгебраического уравнения. Возможно использование рассмотренных ниже методов и алгоритмов построения границ локализации корней уравнений и методов выбора начальных приближений, которые используются в прямых приближенных методах решения уравнений.

Основные направления развития прямых приближенных корневых методов. Проблемам использования численных методов для находлений корней алгебраических уравнений посвящены монографии Уилкинсона [26, 30]. В частности, выделены два фактора, ограничивающие возможность использования численных методов при высоких степенях уравнений. Это, прежде всего, плохая обусловленность, особенно в случае кратных корней. Отмечена также роль ошибок округления, неизбежных при реализации численных алгоритмов на ЭВМ. Исследования показали [26, 30], что имеет место значительная чувствительность корней к вариациям в коэффициентах уравнения, которые могут появляться в результате естественных операций округления в ЭВМ. В частности, Уилкинсоном было рассмотрено семейство уравнений, для которых имеет место отмеченное свойство плохой обусловленности. Эти

уравнения используются в качестве тестовых при исследовании эффективности тех или иных итеративных алгоритмов отыскания корней.

К сожалению, следует заметить, что отдельные пессимистические выводы Уилкинсона относительно перспектив применения итеративных методов при решении алгебраических уравнений были некритически восприняты научной общественностью, особенно в нашей стране. В итоге интерес к этим методам значительно ослаб [28].

Вместе с тем, Уилкинсоном [26] была высказана целесообразность выполнения исследований по совершенствованию как численных алгоритмов, так и рациональных форм организации вычислительных процессов при отыскании корней алгебраических уравнений.

Прямые приближенные методы можно разбить на следующие четыре класса:

1. Методы, основанные на использовании операции квадрирования исходного алгебраического уравнения. В данном случае речь идет о хорошо известном методе Лобачевского—Греффе и различных его модификациях.

2. Методы, основанные на использовании итеративных процедур отыскания действительных корней уравнений. Здесь можно отметить методы секущих, Ньютона, интерполяции, Лагерра и т. д.

3. Методы, основанные на процедурах выделения линейных и квадратичных сомножителей исходного уравнения — методы Лина, Фридмана, Берстоу-Хичкока и т. д. К этой группе методов можно отнести и метод Дженкинса—Трауба.

4. Методы нахождения решения алгебраического уравнения, основанные на оптимизационных процедурах.

Опыт использования методов приближенного нахождения корней показал, что практически для всех методов, за исключением метода Лобачевского—Греффе, ключевыми вопросами, от которых зависит эффективность использования итеративных методов, являются *регулируемая точность вычислений и выбор начальных приближений*.

Решение задачи *регулируемой точности вычислений* может быть получено за счет использования вычислений с изменяемой мантиссой и порядком представляемых чисел [31].

Отметим другую, чрезвычайно важную задачу — *выбор наилучших начальных приближений* для итеративных вычислительных процессов нахождения решения алгебраических уравнений. Эта проблема очень слабо обсуждалась в научной литературе, а от успешного ее решения зависит эффективность алгоритмов отыскания корней. В лучшем случае для выбранного итеративного алгоритма можно предложить те или иные соображения по выбору начального приближения конкретной решаемой задачи. Дело в том, что при использовании итеративных алгоритмов происходит практически неизбежная потеря точности вычислений, особенно при высоких порядках уравнений. В частности, для метода Бер-

стоу—Хичкока характерной является двухуровневая структура итеративного процесса. На верхнем уровне происходит выбор начальных значений коэффициентов p и q квадратного трехчлена $x^2 + px + q$, который должен делить без остатка текущий полином. На нижнем уровне происходит итеративный процесс $p \rightarrow p^*$ и $q \rightarrow q^*$ отыскания таких значений p^* и q^* , для которых процесс деления выполняется без остатка. Тогда происходит процесс понижения порядка текущего полинома (deflation), и все повторяется уже для нового полинома. Пусть в среднем требуется k итераций для нахождения значений p^* и q^* , тогда оценка для общего числа итераций, необходимых для нахождения нулей полинома степени n , равна km , где m — целое число из интервала $[n/2, n]$. Поэтому крайне важно добиваться возможно меньшего значения числа итераций на нижнем уровне k .

В работе [1] был предложен один из возможных вариантов решения этой задачи. Суть метода заключается в последовательном решении двух задач.

1. Построение наилучших (наиболее точных) границ локализации корней уравнений (нулей полиномов).

2. Построение оптимальных стратегий выбора начальных приближений для коэффициентов p и q квадратного трехчлена $x^2 + px + q$.

Построение наилучших границ локализации корней уравнений

При решении задачи построения области, в которой локализуются корни алгебраических уравнений, используются два подхода. *Первый* связан с вычислением классических оценок для минимального r_{\min} и максимального r_{\max} значений модулей корней уравнений, восходящим к работам Гаусса и Коши. Область локализации корней в этом случае представляется в виде кругового кольца на комплексной плоскости с радиусами r_{\min} и r_{\max} . Существует достаточно много вариантов оценок этого типа, в частности, в работе [1] перечислены все существующие в настоящее время варианты классических оценок.

Второй подход к нахождению границ локализации нулей полиномов базируется на использовании методов локализации собственных значений матриц с комплексными элементами. Фундаментальные результаты были получены здесь Адамаром, Гершгориным и другими учеными. Этот подход обладает большей общностью, чем первый. В этом случае удается не только получать оценки для значений r_{\min} и r_{\max} кругового кольца, но и построить более детальную картину области, в которой располагаются собственные значения матрицы. При этом задача построения границ локализации корней исходного алгебраического уравнения сводится к эквивалентной задаче нахождения области локализации собственных значений сопровождающей матрицы уравнения.

Для полинома (2) построим сопровождающую матрицу

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_2 & -a_1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Существуют несколько вариантов построения оценок локализации нулей полиномов (оценки Гершгорина, Брауэра, Островского, Фань Цзы и др.) [32]. В работе [1] перечислены существующие и разработаны ряд новых вариантов оценок этого класса.

Автором с помощью методов математического моделирования было выполнено исследование различных вариантов оценок локализации нулей полиномов. Во всех вычислительных экспериментах были использованы различные классы полиномов, нули которых априорно известны. Приведем основные результаты исследования.

1. К сожалению, не существует единой оценки, одинаково удобной для изучаемых полиномов.

2. Был сформулирован следующий принцип формирования вычислительных оценок границ локализации нулей полиномов. Для заданного полинома среди всех возможных классических оценок сверху границы локализации нулей $r_{\max}(i)$, где i — номер оценки, находится оценка $r_{\max}^*(i^*)$ из условия $r_{\max}^*(i^*) = \min_i r_{\max}(i)$; соответственно, для оценок снизу границы локализации нулей $r_{\min}(j)$, где j — номер оценки, находится оценка $r_{\min}^*(j^*)$ из условия $r_{\min}^*(j^*) = \max_j r_{\min}(j)$. Важно отметить, что номера оценок i^* и j^* , соответствующие наилучшим оценкам, часто не совпадают. Вычисленные значения $r_{\max}^*(i^*)$ и $r_{\min}^*(j^*)$ определяют область локализации корней — круговое кольцо с радиусами $r_{\max}^*(i^*)$ и $r_{\min}^*(j^*)$ и с центром в начале координат.

3. Использование наряду с классическими оценками границ $r_{\max}^*(i^*)$ и $r_{\min}^*(j^*)$ оценок Гершгорина и Брауэра позволяет в ряде случаев уменьшить размеры области локализации нулей.

Построение оптимальных стратегий выбора начальных приближений

При решении этой задачи в работе [1] были использованы результаты, полученные в активно развитой в 40...80-е гг. XX века теории поиска [33—34]. Были выделены два варианта постановки задачи поиска точек начального приближения в зависимости от уровня априорной информации об области расположения (локализации) нулей полинома.

В первом варианте отсутствует дополнительная, по сравнению с уже имеющейся, информация об области расположения нулей полиномов. В этом случае логично предположить, что объекты (нули полинома) могут быть расположены в любой из точек области, в которой расположены нули полинома; при этом не исключен вариант, когда все объекты (нули полинома) расположены (спрятаны) в одной точке (это случай кратных нулей полинома). В случае, когда коэффициенты полинома действительны, область локализации нулей может быть уменьшена в два раза, так как нули полинома будут комплексно сопряженными. Особенностью второго варианта является дополнительная (более детальная) информация об области локализации нулей. Постановка задачи будет рассмотрена позже.

В рамках первого варианта можно говорить о двух возможных постановках задачи поиска — непрерывной и дискретной задачах.

В случае непрерывной задачи поиска речь идет о выборе точки из множества (области локализации нулей полинома), мощность которого равна континууму. Во втором случае (дискретная задача поиска) область локализации нулей полинома подвергается предварительной операции дискретизации.

Будем сначала рассматривать случай непрерывной задачи поиска. В этом случае вполне естественно предполагать, что искомые объекты (нули полинома) могут располагаться независимо и равновозможно друг от друга в любой точке области локализации нулей. С формальной точки это можно описать двумерной плотностью распределения вероятностей $f(x, y)$, одинаковой во всех точках x, y области локализации нулей. Более удобным оказалось задание $f(x, y)$ в цилиндрической системе координат, а именно, в виде $f(r, \varphi)$, где r — расстояние от точки до начала комплексной плоскости корней, а φ — аргумент комплексного числа $x + jy$.

С учетом сделанных выше предположений о независимости и равновозможности расположения искомой точки в области локализации нулей двумерная плотность распределения вероятностей $f(r, \varphi)$ является постоянной в любой точке области локализации. В ряде работ [26] отмечалась целесообразность выбора начальных приближений, которые соответствовали нахождению нулей с меньшими модулями, что обеспечивает большую устойчивость итеративного процесса отыскания нулей. В этом случае двумерная плотность распределения вероятностей $f(r, \varphi)$ становится неравномерной с условием $\frac{\partial f(r, \varphi)}{\partial r} < 0$. Итак, пусть задана двумерная плотность распределения вероятностей $f(r, \varphi)$ точек области локализации нулей полиномов.

Тогда алгоритм выбора начальной точки приближения для итеративного метода отыскания нулей полинома будет заключаться в выборе точки с координатами r_1 и φ_1 с вероятностью $f(r_1, \varphi_1)$.

В случае постоянной по аргументам r и φ равномерной функции $f(r, \varphi)$ достаточно хорошо зарекомендовали себя ЛПТ-последовательности, которые подробно были исследованы И. М. Соболев. Эти последовательности обладают замечательным свойством — они наиболее равномерно заполняют изучаемую область [35, 36].

В работе [1] был рассмотрен *дискретный вариант задачи поиска*. В этом случае исходная область локализации корней заменяется тем или иным образом *дискретной областью (дискретным аналогом)*. В нашем случае область локализации нулей полиномов, представляемую чаще всего в виде кругового кольца, мы делим концентрическими окружностями радиуса r , удовлетворяющим условию $r_{\min} < r < r_{\max}$, и лучами, проходящими через начало координат комплексной плоскости. Рассматривались варианты равномерного и неравномерного разбиения по r и φ исходной области локализации.

Разработанные Староверовым [37] и Аркиным [38] алгоритмы поиска единственного объекта, находящегося в конечном или счетном числе ячеек, были *модифицированы для выбора начальных приближений* для различных итеративных алгоритмов отыскания корней алгебраических уравнений.

Для *второго варианта* характерно наличие дополнительной, более детальной информации об области локализации корней. Например, этот случай соответствует наличию единственного кратного корня уравнения. Область локализации корней в этом случае является кругом с центром в точке $\pm\alpha$ на действительной оси и радиусом ρ , который зависит от значений невязки. Этот метод, основанный на использовании свойства вычислительной разрешимости, является эвристическим и дает весьма хорошие результаты в случае кратных корней уравнений.

Полученные результаты были использованы при разработке программного комплекса для решения задачи нахождения корней алгебраических уравнений.

Особенности программного комплекса для решения алгебраических уравнений высоких порядков

Автором разработан программный комплекс, позволяющий решать задачи нахождения корней алгебраических уравнений произвольно высокого порядка. Особенностью программного комплекса является использование современных технологий искусственного интеллекта (в данном случае экспертных систем) для оптимального построения вычислительного процесса. Тем самым реализована высказанная Дж. Х. Уилкинсоном [25] идея разработки оптимальных (рациональных) форм организации вычислительных процессов в целях повышения порядка решаемых уравнений.

Важной особенностью программного комплекса является подсистема проверки точности полученного решения, для чего используется режим вы-

числений с регулируемой точностью вычислений — вычисления выполняются с точностью, превышающей стандартные возможности ЭВМ. Для этого разработана библиотека подпрограмм, позволяющая проводить вычисления с произвольной точностью — размер мантиссы и порядка представляемых чисел произволен.

Большое число вычислительных экспериментов, проведенных для тестовых полиномов, рассмотренных в работах Дж. Х. Уилкинсона, показало эффективность рассмотренных модификаций различных итеративных алгоритмов, в том числе Бэрстоу—Хичкока. При этом размерность уравнений достигала достаточно больших значений ($10^3 \dots 10^4$).

Данный комплекс использовали при решении ряда задач исследования устойчивости, качества и оптимизации параметров систем управления высокой размерности, например оптимизации параметров многомерных мехатронных систем.

Список литературы

1. **Тягунов О. А.** Развитие технологий анализа, многокритериальной оптимизации и моделирования многосвязных мехатронных систем управления // Автореф. дисс. докт. техн. наук. М.: МИРЭА, 2009.
2. **Петров А. А., Поспелов И. Г., Шананин А. А.** Опыт математического моделирования экономики. М.: Энергоатомиздат, 1996.
3. **Воронов А. А.** Введение в динамику сложных управляемых систем. М.: Наука, 1985.
4. **Первозванский А. А., Гайцгори В. Г.** Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация. М.: Наука, 1979.
5. **Ким Д. П.** Теория автоматического управления, т. 1. М.: Физматлит, 2003.
6. **Бесекецкий Е. П., Попов Е. П.** Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975.
7. **Воронов А. А.** Основы теории автоматического управления. М.: Энергия, 1966.
8. **Цыпкин Я. З.** Основы теории автоматических систем. М.: Наука, 1977.
9. **Механика** больших космических конструкций // Н. В. Баничук, И. И. Карпов, Д. М. Климов и др. М.: Факториал, 1997.
10. **Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н.** Неадаптивное и адаптивное управления манипуляционными роботами. М.: Мир, 1989.
11. **Фу К., Гонсалес Р., Ли К.** Робототехника. М.: Мир, 1989.
12. **Зенкевич С. Л., Ющенко А. С.** Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
13. **Бутковский А. Г.** Структурная теория распределенных систем. М.: Наука, 1977.
14. **Егоров А. И.** Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. М.: Наука, 1978.
15. **Рапопорт Э. Я.** Структурное моделирование объектов управления и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003.
16. **Фаддеев Д. К., Фаддеева В. Н.** Вычислительные методы линейной алгебры. М.: Физматгиз, 1963.
17. **Парлетт Б.** Симметричная проблема собственных значений: Численные методы. М.: Мир, 1983.
18. **Постников М. М.** Теория Галуа. М.: Факториал, 2003.
19. **Прасолов В. В., Соловьев Ю. П.** Эллиптические функции и алгебраические уравнения. М.: Факториал, 1997.
20. **Мамфорд Д.** Лекции о тэта-функциях. М.: Мир, 1988.
21. **Калиткин Н. Н.** Численные методы. М.: Наука, 1978.
22. **Березин И. С., Жидков Н. П.** Методы вычислений. Т. II. М.: Физматгиз, 1960.
23. **Хемминг Р. В.** Численные методы. М.: Наука, 1972.
24. **Граве Д. А.** Элементы высшей алгебры. Киев, 1914.
25. **Ван дер Варден Б. Л.** Алгебра. М.: Физматлит, 1976.

26. Уилкинсон Дж. Х. Алгебраическая проблема собственных значений. М.: Наука, 1970.
 27. Трауб Дж. Итерационные методы решения уравнений. М.: Мир, 1985.
 28. Дидук Г. А. Машинные методы исследования автоматических систем. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
 29. Algorithms in real algebraic geometry // ed. By Arnon D. S., Buchberger B. Lon: Acad. Press, 1988.
 30. Wilkinson J. H. Rounding Errors in Algebraic Processes. L.: Prentice-Hall, 1963.
 31. Бабенко К. И. Основы численного анализа. М.: Наука, Физматлит, 1986.
 32. Пароди М. Локализация характеристических чисел матриц и ее применения. М.: ИЛ, 1960.

33. Ким Д. П. Методы поиска и преследования подвижных объектов. М.: Наука, 1989.
 34. Хеллман О. Введение в теорию оптимального поиска. М.: Наука, 1985.
 35. Соболев И. М. Многомерные квадратурные формулы и функции Хаара. М.: Наука, 1969.
 36. Соболев И. М. О распределении точек в кубе и сетках интегрирования // Успехи. матем. наук. 1966. Т. 21. № 5.
 37. Староверов О. В. Об одной задаче поиска // Теория вероятностей и ее применение. 1963. Т. 8. № 2.
 38. Аркин В. И. Задачи оптимального распределения поисковых усилий // Теория вероятностей и ее применения. 1964. Т. 9, вып. 1.

УДК 534

М. Г. Матвеев¹, д-р техн. наук, проф.,
 mgmatveev@yandex.ru,

М. Е. Семёнов², д-р физ.-мат. наук, проф.,
 mk1150@mail.ru,

Д. В. Шевлякова¹, аспирантка,
 frezziy@mail.ru,

О. И. Канищева², канд. физ.-мат. наук, доц.,
 oleka-olesya@mail.ru,

¹ Воронежский государственный университет,
² Военный авиационный инженерный университет,
 г. Воронеж

Зоны устойчивости и периодические решения перевернутого маятника с гистерезисным управлением*

Представлена математическая модель стабилизации перевернутого маятника с вертикально осциллирующим основанием и гистерезисным управлением. Найдены критерии устойчивости для линеаризованного уравнения движения маятника. Построены двумерные проекции зон устойчивости трехмерного пространства параметров. Получены зависимости между начальными условиями и параметрами управления, обеспечивающими периодические колебания маятника. Построены области начальных значений в фазовом пространстве, соответствующие периодическим решениям.

Ключевые слова: перевернутый маятник, гистерезисная нелинейность, люфт, устойчивость, периодические решения

Введение

Модель перевернутого маятника с осциллирующей нижней точкой подвеса (рис. 1) была детально изучена П. Л. Капицей [1, 2]. Уравнение движения маятника имеет вид

$$\ddot{\varphi} - \frac{1}{l} (g + \ddot{f}(t)) \sin \varphi = 0, \quad (1)$$

* Работа поддержана грантами РФФИ 11-08-00032-а, 12-07-00252-а.

где φ — угол отклонения маятника от вертикали; l — длина маятника; g — ускорение свободного падения; $f(t)$ — закон движения подвеса.

В 1951 г. П. Л. Капицей было дано физическое объяснение динамической стабилизации и получена оценка снизу частоты вибрации, при которой верхнее положение становится устойчивым.

При движении нижней точки подвеса по гармоническому закону уравнение (1) сводится к уравнению Матье, детально изученному в работе [3].

Для адекватного описания динамики реальных физических и механических систем необходимо учитывать эффекты гистерезисной природы — люфты, упоры [4]. Математические модели этих нелинейностей в соответствии с классическими схемами М. А. Красносельского и А. В. Покровского [5] сводятся к операторам, трактуемым как преобразователи, действующие в соответствующих функциональных пространствах, динамика которых описывается соотношениями вход-состояние и состояние-выход.

В данной статье исследуется перевернутый маятник, управляющим воздействием на который является выход гистерезисного преобразователя — люфта.

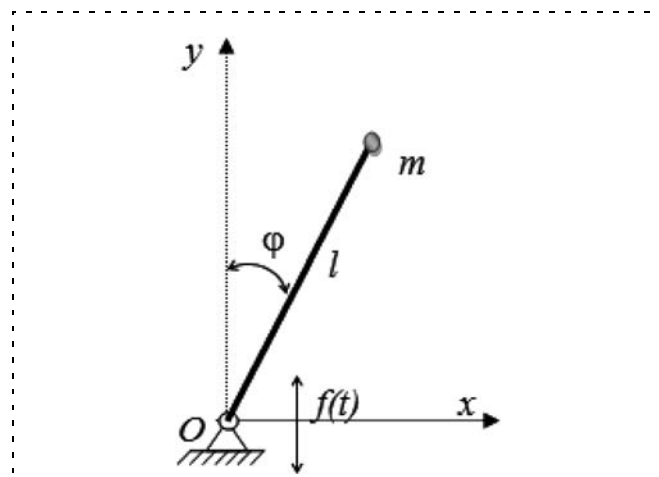


Рис. 1. Модель вертикального маятника с осциллирующим подвесом

Математическая модель маятника с осциллирующим подвесом и гистерезисной нелинейностью

Рассмотрим систему, где основанием маятника является физическая система (P, S) , образованная из цилиндра длины H и поршня P , которые могут перемещаться в направлении вертикальной оси и расположены так, как показано на рис. 2.

Положение поршня будем определять координатой $f(t)$, а положение цилиндра — координатой $u(t)$. Будем считать P ведущим звеном системы, а цилиндр S — ведомым. Тогда систему (P, S) можно рассматривать как преобразователь Γ с входным сигналом $f(t)$ — переменным положением поршня и выходным сигналом $v(t)$ — переменным положением цилиндра. Такой преобразователь называют *люфтом*. Множеством его возможных состояний является полоса $f(t) \leq v(t) \leq f(t) + H$ ($-\infty < f(t) < \infty$). Переменное положение $u(t)$ цилиндра определяется равенством $v(t) = \Gamma[t_0, v(t_0)]f(t)$ при $(t > t_0)$, где $\Gamma[t_0, v(t_0)]$ — оператор, определенный при каждом $v_0 = v(t_0)$ на множестве всех непрерывных входов $f(t)$ ($t > t_0$), для которых $v_0 - H < f(t) < v_0$ [5].

Будем считать, что поршень осуществляет движение так, что его ускорение периодически с частотой ω меняется с $-a\omega^2$ на $a\omega^2$. Это соответствует тому, что линейризованное уравнение движения вертикального маятника с описанным выше подвесом будет иметь вид

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi} - \frac{1}{l}(g + a\omega^2 G(t, H)w(t))\varphi &= 0; \\ w(t) &= -\text{sign}(\sin(\omega t)); \\ \varphi(0) &= \varphi_{10}, \quad \dot{\varphi}(0) = \varphi_{20}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\omega(t)$ — ускорение поршня; $G(t, H)w(t)$ — ускорение основания маятника,

$$G(t, H) = \begin{cases} 0, & t \in (t^*, t^* + \Delta t), \\ 1, & t \notin (t^*, t^* + \Delta t); \end{cases}$$

t^* — моменты времени, после которых ускорение меняет знак; $\Delta t = \sqrt{\frac{2H}{a\omega^2}}$ — время, затрачиваемое поршнем на прохождение цилиндра.

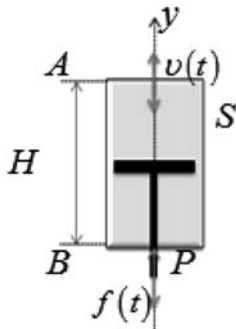


Рис. 2. Цилиндр в основании маятника

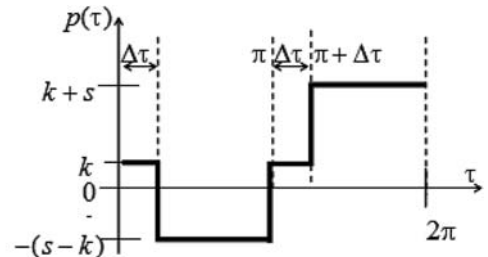
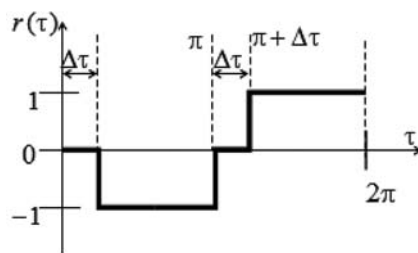


Рис. 3. Графики функций $f(\tau)$ и $p(\tau)$

Исследование устойчивости линейризованного уравнения

Перейдем к безразмерным единицам, сделав в (2) следующую замену:

$$\tau = \omega t, \quad k = \frac{g}{l\omega^2}, \quad s = \frac{a}{l}, \quad \Delta\tau = \sqrt{\frac{2H}{sl}}.$$

В результате получим уравнение, аналогичное уравнению Мейсснера [3], но с отрицательными коэффициентами и гистерезисной нелинейностью:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - (k - sG(\tau, H)\text{sign}(\sin\tau))x &= 0; \\ G(\tau, H) &= \begin{cases} 0, & \tau \in (\tau^*, \tau^* + \Delta\tau); \\ 1, & \tau \notin (\tau^*, \tau^* + \Delta\tau); \end{cases} \\ x(0) &= x_{10}, \quad \dot{x}(0) = x_{20}. \end{aligned} \quad (3)$$

Запишем уравнение (3) в виде эквивалентной системы:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = p(\tau)x_1; \end{cases} \quad (4)$$

$$x_1(0) = x_{10}, \quad x_2(0) = x_{20}.$$

Ее матрица имеет вид

$$\mathbf{P}(\tau) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ p(\tau) & 0 \end{pmatrix},$$

где $p(\tau) = k - sG(\tau, H)\text{sign}(\sin\tau)$.

В силу сделанных предположений матрица $\mathbf{P}(\tau)$ является периодической функцией времени с периодом 2π : $\mathbf{P}(\tau + 2\pi) \equiv \mathbf{P}(\tau)$.

Будем говорить, что уравнение (3) устойчиво или неустойчиво по Лагранжу, если устойчива или, соответственно, неустойчива система (4), т. е. все решения $x(\tau)$ устойчивого уравнения (3) ограничены на $[\tau_0, \infty)$ вместе с их производными $\dot{x}(\tau)$.

Из результатов Флоке [6] следует, что задача исследования устойчивости для такого рода систем сводится к нахождению фундаментальной матрицы решений в момент 2π — *матрицы монодромии* — и к оценке ее собственных значений, называемых *мультипликаторами*. Для устойчивости периодической системы необходимо и достаточно, чтобы все

ее мультипликаторы находились внутри единичного круга $|\rho| < 1$.

В силу того, что матрица $\mathbf{P}(\tau)$ — кусочно-постоянная, фундаментальная система решений и, следовательно, матрица монодромии могут быть построены в замкнутом виде. Для этого рассмотрим поведение кусочно-постоянной функции $r(\tau) = -G(\tau, H)\text{sign}(\sin(\tau))$ с периодом 2π и функции $p(\tau)$ (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что система (4) на промежутке $(0, 2\pi)$ может быть описана четырьмя линейными системами с постоянными коэффициентами:

$$\begin{cases} \dot{x}_1^1 = x_2^1, \\ \dot{x}_2^1 = kx_1^1, \tau \in [0, \Delta\tau]; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1^2 = x_2^2, \\ \dot{x}_2^2 = -(s-k)x_1^2, \tau \in [\Delta\tau, \pi]; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1^3 = x_2^3, \\ \dot{x}_2^3 = kx_1^3, \tau \in [\pi, \pi + \Delta\tau]; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1^4 = x_2^4, \\ \dot{x}_2^4 = (k+s)x_1^4, \tau \in [\pi + \Delta\tau, 2\pi]. \end{cases} \quad (8)$$

Поскольку фундаментальная матрица должна быть непрерывна, то решения систем (5)–(8) должны совпадать в соответствующих точках:

$$\mathbf{X}^1(0) = \mathbf{E}, \mathbf{X}^i(\tau_i^*) = \mathbf{X}^{i+1}(\tau_i^*),$$

где $i = 1, 2, 3$, τ_i^* — моменты перемены управления на периоде, \mathbf{E} — единичная матрица.

Последовательно интегрируя системы (5)–(8), найдем фундаментальные матрицы решений:

$$\mathbf{X}^1(\tau) = \begin{pmatrix} \text{ch}(\sqrt{k}\tau) & \frac{1}{\sqrt{k}}\text{sh}(\sqrt{k}\tau) \\ \sqrt{k}\text{sh}(\sqrt{k}\tau) & \text{ch}(\sqrt{k}\tau) \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{X}^2(\tau) = \mathbf{X}^1(\Delta\tau) \begin{pmatrix} \cos(k_2(\tau - \Delta\tau)) & \frac{1}{k_2}\sin(k_2(\tau - \Delta\tau)) \\ -k_2\sin(k_2(\tau - \Delta\tau)) & \cos(k_2(\tau - \Delta\tau)) \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{X}^3(\tau) = \mathbf{X}^2(\pi) \begin{pmatrix} \text{ch}(\sqrt{k}(\tau - \pi)) & \frac{1}{\sqrt{k}}\text{sh}(\sqrt{k}(\tau - \pi)) \\ \sqrt{k}\text{sh}(\sqrt{k}(\tau - \pi)) & \text{ch}(\sqrt{k}(\tau - \pi)) \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{X}^4(\tau) = \mathbf{X}^3(\pi + \Delta\tau) \begin{pmatrix} \text{ch}(k_1(\tau - \pi)) & \frac{1}{k_1}\text{sh}(k_1(\tau - \pi)) \\ k_1\text{sh}(k_1(\tau - \pi)) & \text{ch}(k_1(\tau - \pi)) \end{pmatrix}.$$

Тогда, полагая в $\mathbf{X}^4(\tau)$ $\tau = 2\pi$, получим матрицу монодромии системы (4) в следующем виде:

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}(2\pi) = \begin{pmatrix} \text{ch}(\sqrt{k}\Delta\tau) & \frac{1}{\sqrt{k}}\text{sh}(\sqrt{k}\Delta\tau) \\ \sqrt{k}\text{sh}(\sqrt{k}\Delta\tau) & \text{ch}(\sqrt{k}\Delta\tau) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(k_2\gamma) & \frac{1}{k_2}\sin(k_2\gamma) \\ -k_2\sin(k_2\gamma) & \cos(k_2\gamma) \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \text{ch}(\sqrt{k}\Delta\tau) & \frac{1}{\sqrt{k}}\text{sh}(\sqrt{k}\Delta\tau) \\ \sqrt{k}\text{sh}(\sqrt{k}\Delta\tau) & \text{ch}(\sqrt{k}\Delta\tau) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{ch}(k_1\gamma) & \frac{1}{k_1}\text{sh}(k_1\gamma) \\ k_1\text{sh}(k_1\gamma) & \text{ch}(k_1\gamma) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $k_1^2 = k + s$ и $k_2^2 = s - k$, так как $s > k$, $\gamma = \pi - \Delta\tau$.

Составим для нее характеристическое уравнение:

$$\det(\mathbf{A} - \rho\mathbf{E}) = \begin{vmatrix} a_{11} - \rho & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - \rho \end{vmatrix} = \rho^2 + \alpha\rho + \beta = 0, \quad (10)$$

где $\alpha = -(a_{11} + a_{22})$, $\beta = 1$.

Произведение корней ρ_1 и ρ_2 уравнения (10) равно единице, поэтому движение будет устойчиво только при $|\alpha| < 2$, когда модули обоих мультипликаторов равны единице, а сами они различны. Таким образом, получаем следующее условие устойчивости решений уравнения (3):

$$|a_{11} + a_{22}| < 2. \quad (11)$$

С учетом (9) условие (11) эквивалентно условию

$$\left[2\text{ch}(2\sqrt{k}\Delta\tau)\text{ch}(k_1\gamma) + \left(\frac{\sqrt{k}}{k_1} + \frac{k_1}{\sqrt{k}} \right) \times \right. \\ \left. \times \text{sh}(2\sqrt{k}\Delta\tau)\text{sh}(k_1\gamma) \right] \cos(k_2\gamma) + \left[\left(\frac{\sqrt{k}}{k_2} - \frac{k_2}{\sqrt{k}} \right) \times \right. \\ \left. \times \text{sh}(2\sqrt{k}\Delta\tau)\text{ch}(k_1\gamma) + \left(\frac{k_1}{k_2} - \frac{k_2}{k_1} \right) \text{ch}^2(\sqrt{k}\Delta\tau)\text{sh}(k_1\gamma) + \right. \\ \left. + \left(\frac{k}{k_2k_1} - \frac{k_2k_1}{k} \right) \text{sh}^2(\sqrt{k}\Delta\tau)\text{sh}(k_1\gamma) \right] \sin(k_2\gamma) < 2. \quad (12)$$

Таким образом, область устойчивости системы (4) в пространстве ее параметров определяется неравенством (12).

Построение зон устойчивости

Рассмотрим уравнение (3) при $H = 0$, т. е. без гистерезисной нелинейности:

$$\ddot{x} - (k + s(-\text{sign}(\sin\tau)))x = 0, \quad (13)$$

тогда $\Delta\tau = 0$, и неравенство (12) принимает вид

$$\left| \text{ch}(k_1\pi)\cos(k_2\pi) + \frac{1}{2} \left(\frac{k_1}{k_2} - \frac{k_2}{k_1} \right) \text{sh}(k_1\pi)\sin(k_2\pi) \right| < 1. \quad (14)$$

Численно построим решение неравенства (14) относительно параметров k и s (рис. 4, а). На рис. 4, б приведены зоны устойчивости для уравнения Мейсснера, полученного Chikara Sato [8].

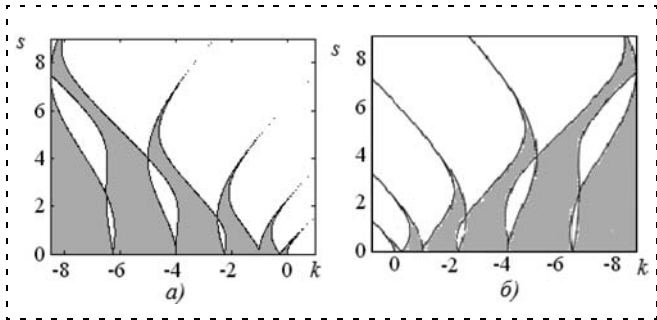


Рис. 4. Диаграмма устойчивости для (13) (а) и для уравнения Мейсснера (б)

Эти диаграммы являются зеркальным отражением друг друга в силу противоположности знаков коэффициентов при x в соответствующих уравнениях.

Построим область устойчивости для системы (9). Пространство ее параметров трехмерно, так как она зависит от безразмерных величин k и s и длины поршня H . Положим длину маятника $l = 1$ м.

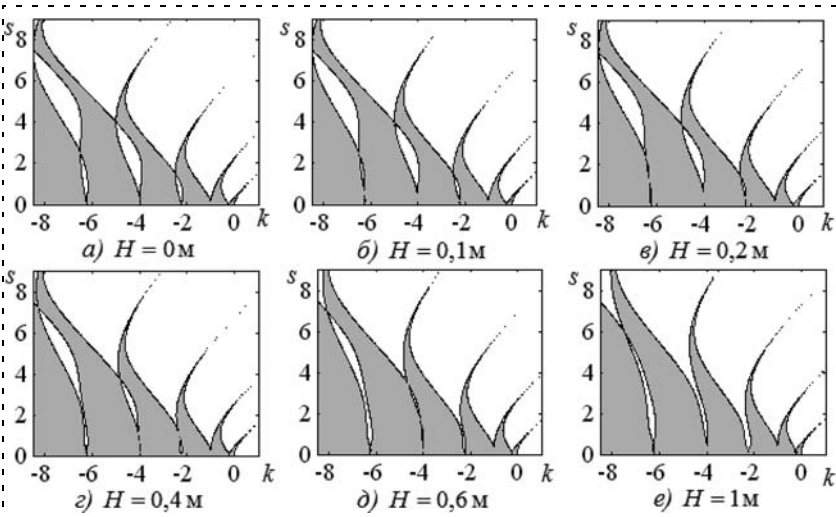


Рис. 5. Диаграммы устойчивости при различных длинах поршня H

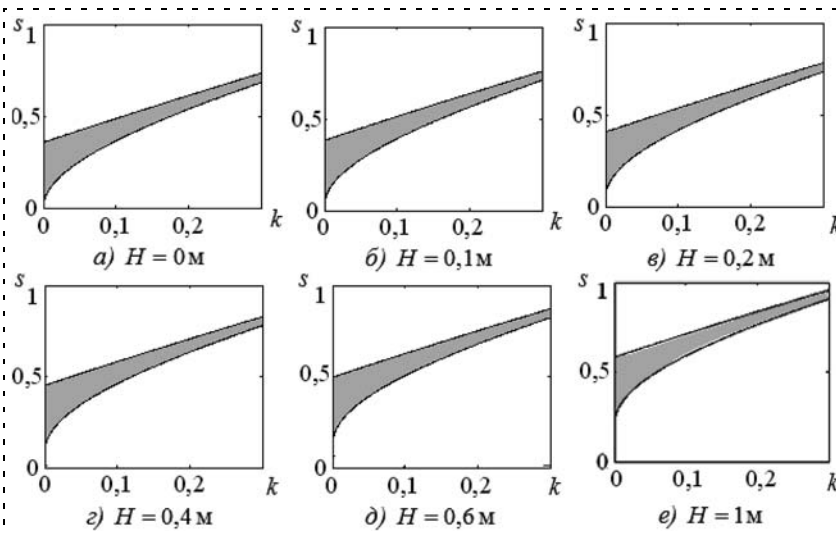


Рис. 6. Диаграмма в положительной полуплоскости при различных H

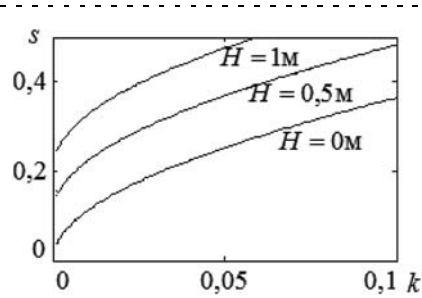


Рис. 7. Нижняя граница области устойчивости при различных H

Из рис. 5 следует, что области устойчивости качественно не меняются, а лишь слегка деформируются с ростом H .

Заметим, что в рассматриваемой задаче k и s могут принимать только положительные значения, причем непосредственно в окрестности нулевой точки $k = s = 0$, поскольку колебание точки

подвеса осуществляется с малой амплитудой a и большой частотой осцилляций ω относительно собственной частоты колебаний маятника ω_0 . Изменение области устойчивости в положительной полуплоскости показано на рис. 6.

На рис. 7 показано, как с увеличением параметра H поднимается нижняя граница области устойчивости.

Зоны устойчивости в пространстве исходных параметров уравнения (2) приведены на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что площадь областей устойчивости принципиально не изменяется с увеличением длины поршня H , а лишь смещается по оси параметра a , т. е. при любом $H \in [0, 1]$ найдется, по крайней мере, пара значений для a и ω , обеспечивающих устойчивость вертикального положения перевернутого маятника с осциллирующим подвесом и гистерезисной нелинейностью.

Это хорошо видно и на рис. 9, где построены графики изменения минимально возможной частоты колебаний, обеспечивающей устойчивость решений уравнения (6) в зависимости от длины поршня H при различных значениях амплитуды колебаний.

Также из рис. 9 видно, что даже при больших значениях H можно стабилизировать вертикальное положение маятника, незначительно увеличив амплитуду, при этом не увеличивая сильно частоту колебаний. Иными словами, большим увеличе-

нием амплитуды минимальная частота, необходимая для стабилизации, значительно уменьшается, даже при увеличении раствора цилиндра H .

Отметим, что параметрам, удовлетворяющим неравенству (12), соответствуют почти периодические колебания [9] маятника относительно верхнего положения. Для подтверждения полученных резуль-

татов приведем графики характеристик колебания линеаризованной модели вертикального маятника длиной $l = 1$ м с осциллирующим основанием и гистерезисной нелинейностью при $H = 0,05$ м (рис. 10). Амплитуду и частоту колебаний поршня примем равными $a = 0,15$ м и $\omega = 30$ Гц, а начальные условия — $\varphi(0) = 0,2$ град, $\dot{\varphi}(0) = 1$ рад/с.

Построение периодических решений

Рассмотрим поведение движения маятника при параметрах, лежащих на границах области устойчивости, что, возвращаясь к характеристическому уравнению матрицы монодромии (10), относится к двум случаям, когда $\alpha = -2$ — левая граница и $\alpha = 2$ — правая граница. Тогда мультипликаторы будут принимать значения $\rho_1 = \rho_2 = 1$ и $\rho_1 = \rho_2 = -1$ соответственно.

Если $\rho_1 = \rho_2 = 1$, то соответствующее нормальное решение будет удовлетворять равенству $\mathbf{X}(t + 2\pi) = \mathbf{X}(t)$, следовательно, уравнение (2) имеет периодическое решение, период которого совпадает с периодом его коэффициентов $T_1 = \frac{2\pi}{\omega}$.

Если $\rho_1 = \rho_2 = -1$, то соответствующее нормальное решение будет удовлетворять равенству $\mathbf{X}(t + 2\pi) = -\mathbf{X}(t)$, а еще через один период $\mathbf{X}(t + 4\pi) = -\mathbf{X}(t + \pi) = \mathbf{X}(t)$. Из этого следует, что при наличии мультипликаторов, равных -1 , уравнение (2) имеет периодическое решение, период которого вдвое больше периода коэффициентов исходного уравнения $T_2 = \frac{4\pi}{\omega}$.

В обоих случаях решения периодические, а значит и ограниченные; будем говорить, что они устойчивы по Лагранжу. Будем считать, что для обеспечения периодических режимов колебания маятника все его параметры должны удовлетворять условию

$$\begin{aligned} a_{11} + a_{22} &= 2 \\ \text{для периода колебаний } T_1; \\ a_{11} + a_{22} &= -2 \\ \text{для периода колебаний } T_2. \end{aligned} \quad (15)$$

Однако эти условия лишь необходимые, но не достаточные, в силу того, что не для любых ненулевых начальных значений при заданном управлении с параметрами, удовлетворяющими одному из этих равенств, будут существовать периодические решения.

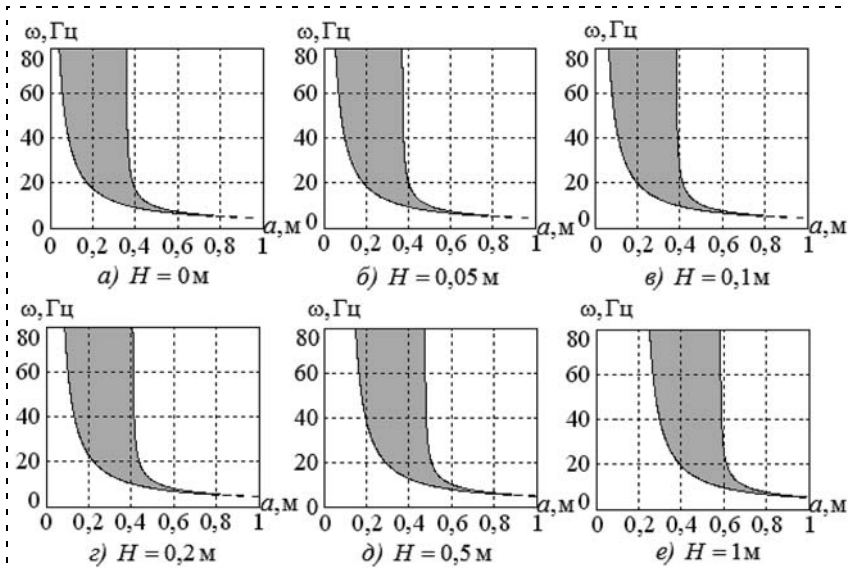


Рис. 8. Графики областей устойчивости при различных длинах поршня H

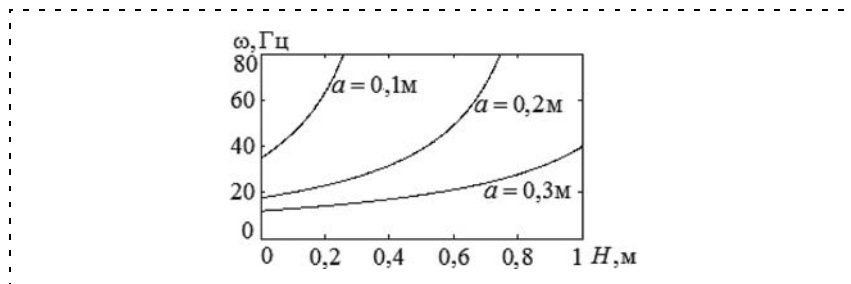


Рис. 9. Графики зависимости параметров ω и H при различных a

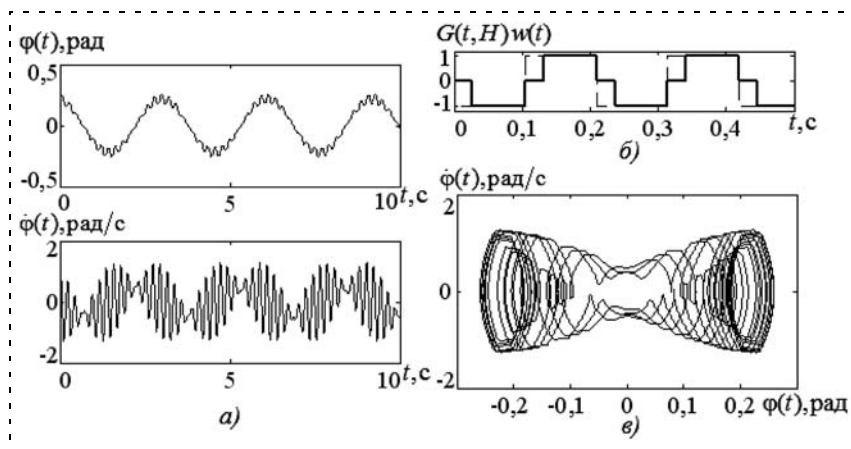


Рис. 10. Графики характеристик колебания линеаризованной модели вертикального маятника: a — характеристики движения маятника; b — ускорение (сплошная линия — ускорение с гистерезисом, штриховая — без гистерезиса); c — фазовая плоскость

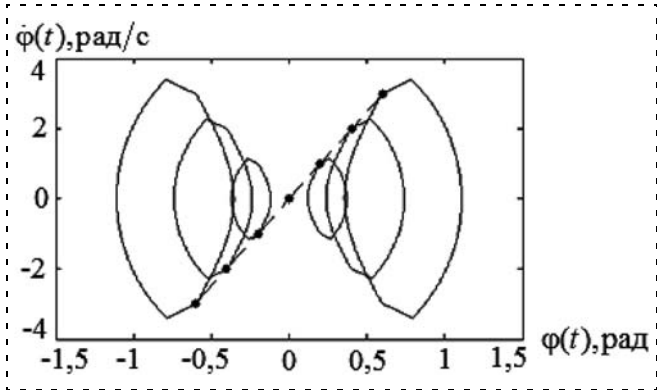


Рис. 11. Фазовый портрет решений с периодом $2\pi/\omega$, начальные условия которых лежат на одной прямой $z_1: \dot{\varphi} = 5\varphi$

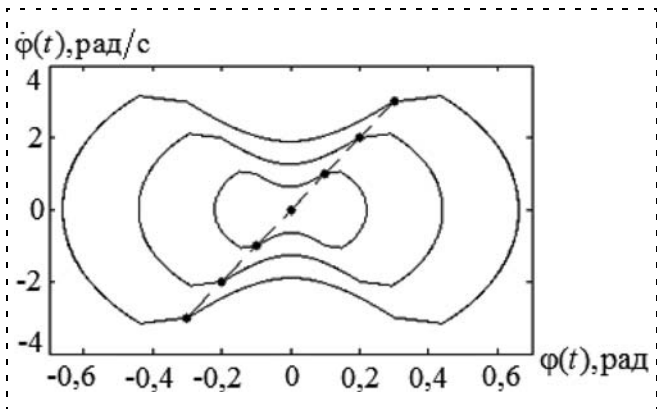


Рис. 12. Фазовый портрет решений с периодом $4\pi/\omega$, начальные условия которых лежат на одной прямой $z_2: \dot{\varphi} = 10\varphi$

Необходимо отметить, что для рассматриваемого здесь управления, описываемого функцией $v(t) = -a\omega^2 G(t, H) \text{sign}(\sin(\omega t))$, начальные условия лежат в I-й и III-й четвертях.

Положим начальное условие $(\varphi_{10}, \varphi_{20})$ и рассмотрим случай периодических колебаний с периодом T_1 . Тогда должно быть справедливо равенство $\mathbf{X}(0 + T) = \mathbf{A}\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}(0)$ и

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_{10} \\ \varphi_{20} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_{10} \\ \varphi_{20} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Отсюда получаем, что начальные условия должны удовлетворять условию

$$\varphi_{10} = \frac{a_{12}}{1 - a_{11}} \varphi_{20}, \quad \varphi_{20} = \frac{a_{21}}{1 - a_{22}} \varphi_{10}, \quad (17)$$

т. е. лежать на прямой $z_1: \dot{\varphi} = K_1\varphi$, где коэффициент

$$K_1 = \frac{1 - a_{11}}{a_{12}} = \frac{a_{21}}{1 - a_{22}}. \quad (18)$$

Данное равенство как раз обеспечивает выполнение условия (14). Если для начальных условий $(\varphi_{10}, \varphi_{20})$ можно найти пару параметров a и ω , лежащих на границе области устойчивости при фиксированном H , удовлетворяющую равенству (17), то эта пара единственна. Обратное также верно.

Аналогично получаем, что периодические решения с периодом T_2 существуют для начальных условий, удовлетворяющих равенствам

$$\varphi_{10} = -\frac{a_{12}}{1 + a_{11}} \varphi_{20}, \quad \varphi_{20} = -\frac{a_{21}}{1 + a_{22}} \varphi_{10}, \quad (19)$$

т. е. лежащих на прямой $z_2: \dot{\varphi} = K_2\varphi$ с коэффициентом

$$K_2 = -\frac{1 + a_{11}}{a_{12}} = -\frac{a_{21}}{1 + a_{22}}. \quad (20)$$

На рис. 11 и 12 построены периодические решения уравнения (2) с периодами T_1 и T_2 соответственно, чьи начальные условия лежат на прямых $\dot{\varphi} = 5\varphi$ и $\dot{\varphi} = 10\varphi$, а пара параметров a и ω для каждой из них найдена из условий (18), (20) при $H = 0,05$ м.

В отсутствие гистерезисной нелинейности, т. е. при $H = 0$, сектор Z_1 , в котором лежат все возможные прямые z_1 , очень мал (рис. 13), а с ростом H на интервале $(0, 0.6]$ увеличивается, но при больших значениях раствора цилиндра $H \in (0.6, 1]$ уменьшается, хотя и не столь значительно.

Из рис. 13 видно, что не существуют такие начальные условия $(\varphi_{10}, \varphi_{20})$, для которых можно найти периодические решения при всех H , так как сектор Z_1 при увеличении H не только увеличивается или уменьшается, но и поворачивается по часовой стрелке и $Z_1|_{H=0} \cap Z_1|_{H=1} = \emptyset$. Однако, если рассмотреть случай, когда $H \in [0.01, 1]$, причем $Z_1|_{H=0,01} \cap Z_1|_{H=1} = Z_{1\text{общ}} \neq \emptyset$, то можно заметить, что для любого фиксированного $(\varphi_{10}, \varphi_{20}) \in Z_{1\text{общ}}$ с увеличением H частота вибраций поршня, обес-

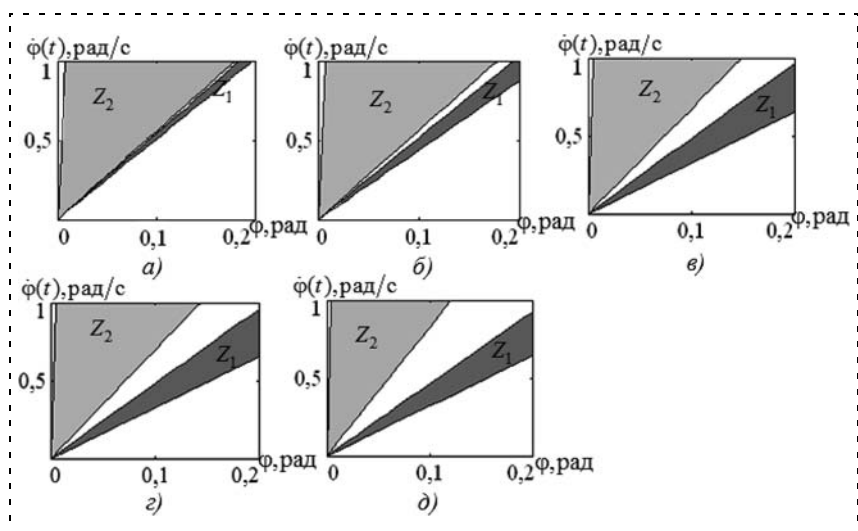


Рис. 13. Области начальных условий периодических решений при: а — $H = 0$; б — $H = 0,05$; в — $H = 0,5$; г — $H = 1$

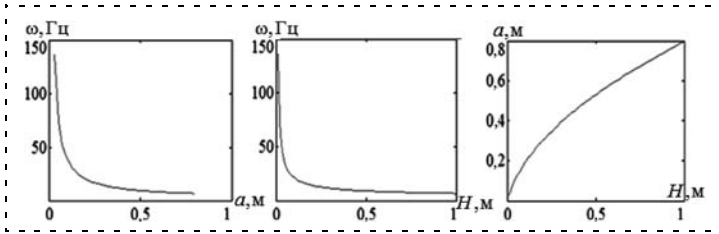


Рис. 14. Графики изменения параметров, необходимых для периодических колебаний маятника для фиксированного начального условия $(0.1, 0.44) \in Z_{1общ}$

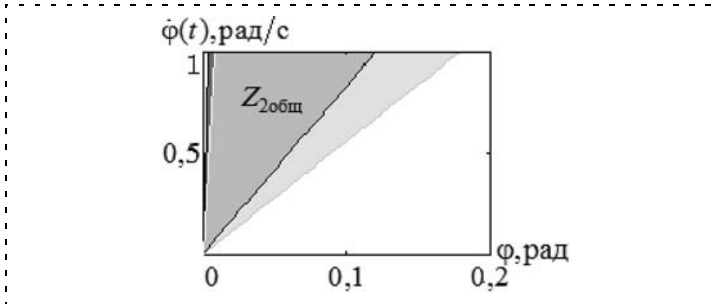


Рис. 15. Область пересечения областей $Z_2|_{H=0}$ и $Z_2|_{H=1}$

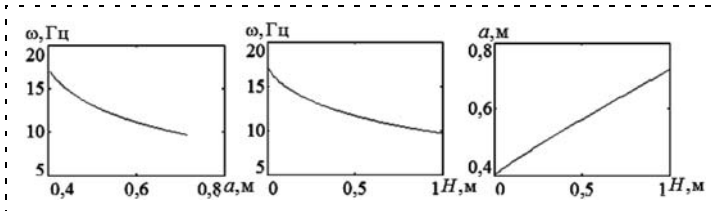


Рис. 16. Графики изменения параметров, необходимых для периодических колебаний маятника для фиксированного начального условия $(0.1, 1.5) \in Z_{2общ}$

печивающая периодические колебания маятника, сильно уменьшается, а соответствующая ей амплитуда увеличивается (рис. 14).

Для периодических решений T_2 имеет место обратное утверждение: в отсутствии гистерезисной нелинейности сектор Z_2 , в котором лежат все возможные прямые z_2 , обладает наибольшей площадью (см. рис. 13), а с появлением люфта и ростом H на всем интервале $(0, 1]$ уменьшается. При этом существует достаточно большая область $Z_{2общ} = Z_2|_{H=0} \cap Z_2|_{H=1}$, содержащая все начальные ус-

ловия $(\varphi_{10}, \varphi_{20})$, для которых можно найти периодические решения при всех $H \in [0, 1]$ (рис. 15).

Численные эксперименты показали, что для любого фиксированного $(\varphi_{10}, \varphi_{20}) \in Z_{2общ}$ с увеличением H частота вибраций поршня, обеспечивающая периодические колебания маятника, тоже уменьшается, а соответствующая ей амплитуда увеличивается (рис. 16).

Заключение

Таким образом, динамика обратного маятника с гистерезисным управлением качественно отличается от динамики маятника с обычным управлением. Наличие гистерезисного звена затрудняет изучение динамики механических систем. Большая часть результатов работы получена в результате численных экспериментов. Отметим, что близкие конструкции использовали при изучении систем автоматического регулирования с гистерезисными нелинейностями [10].

Список литературы

1. Капица П. Л. Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса // ЖЭТФ 21. 1951. С. 588–597.
2. Капица П. Л. Маятник с вибрирующим подвесом // УФН 44. 1951. С. 7–20.
3. Магнус К. Колебания: Введение в исследование колебательных систем / К. Магнус: Пер. с нем. В. И. Сидорова, В. В. Филатова. М.: Мир, 1982. 304 с.
4. Нелепин Р. А. Методы исследования нелинейных систем автоматического управления / Под ред. Р. А. Нелепина. М.: Наука, 1979. 447 с.
5. Красносельский М. А., Покровский А. В. Системы с гистерезисом. М.: Наука, 1983. 271 с.
6. Плисс В. А. Нелокальные проблемы теории колебаний. М.: Наука, 1964. 367 с.
7. Меркин Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения: учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1987. 304 с.
8. Chikara Sato. Correction of stability curves in Hill-Meissner's equation // Math. Comp. 1966. V. 20. P. 98–106.
9. Красносельский М. А., Бурд В. Ш., Колесов Ю. С. Нелинейные почти периодические колебания. М.: Наука, 1970. 304 с.
10. Семенов М. Е., Канищева О. И., Гулин А. Н., Прохоров Д. М. Корректные периодические режимы в системах управления с монотонными гистерезисными нелинейностями // Научные технологии. 2010. № 12. С. 67–72.

Внимание читателей

В журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" № 9, 2012 г. в статье В. И. Краснощеченко "Синтез регулятора с ограниченным управлением для неустойчивого объекта с определением границы области стабилизации на основе гомотопии векторных полей" по вине редакции была допущена опечатка: везде в тексте статьи вместо слов "l-форма" следует читать "1-форма".

Редакция журнала приносит извинения автору статьи и читателям за допущенную опечатку.

УДК 658.56

И. Ю. Тюрин¹, директор по экономике и финансам,
aksioninstr@mail.ru,

А. С. Вылегжанин¹, зам. начальника цеха,
aksioninstr@mail.ru,

Э. В. Кольбова², аналитик,
kolbova@smartsolutions-123.ru,

П. О. Скобелев^{3, 4}, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.,
Президент/Генеральный конструктор,
petr.skobelev@gmail.com,

Я. Ю. Шепилов², разработчик,
shepilov@smartsolutions-123.ru,

¹ ОАО "Ижевский мотозавод "Аксион-холдинг",

² ООО "НПК "Разумные решения",

³ Институт проблем управления
сложными системами РАН,

⁴ Группа компаний "Генезис знаний"

Опыт разработки и внедрения мультиагентной системы для оперативного управления инструментальным цехом ОАО "Ижевский мотозавод — Аксион-Холдинг"

Описываются результаты разработки и внедрения мультиагентной системы оперативного управления инструментальным цехом для ОАО "Ижевский мотозавод — Аксион-Холдинг".

Ключевые слова: мультиагентная система, оперативное планирование, реальное время, результаты внедрения, перспективы

Введение

Разработка мультиагентных систем для оперативного управления ресурсами цехов промышленных предприятий в реальном времени является новой инновационной сложной задачей, и потому особо большое значение имеет практический опыт освоения и внедрения такого рода систем, позволяющий на практике оценить преимущества подхода и его перспективы.

Разработанный подход к созданию и реализации указанных систем, их функциональные возможности и особенности взаимодействия с пользователями подробно рассмотрены в работах [1–5].

В данной статье рассматриваются полученный опыт и результаты выполнения проекта по созданию и внедрению мультиагентной системы оперативного управления ресурсами в Инструментальном цехе № 11 ОАО "Ижевский мотозавод "Аксион-Холдинг", крупнейшего предприятия России по выпуску электронной продукции. Проект реализован в тесном творческом сотрудничестве специалистов завода и разработчиков рассматриваемых систем.

Приобретенный опыт позволяет оценить объем и трудоемкость решаемых задач, сроки выполнения проекта, разработки и внедрения рассматриваемых систем, основные проблемы и трудности, с которыми сталкиваются разработчики и пользователи подобных систем, дать оценку эффективности разработки, наметить перспективы развития и использования системы.

История проекта

Рассмотрим основные этапы проекта, которые представляются характерными для проектов подобной сложности.

Разработка Технического задания на доработку базовой системы (ТЗ): март — июнь 2010 г. (3 месяца). Проект был начат в марте 2010 г. с разработки уточненного Технического задания, что позволило в течение трех месяцев относительно точно специфицировать все требования к доработке системы, изначально разработанной для одного из цехов ФГУП "ЦСКБ-Прогресс" и далее внедренной на ОАО "Сызрань Тяжмаш" [1–2].

Создание специализированной версии системы для управления инструментальным цехом: июль — декабрь 2010 г. (6 месяцев). На основе разработанного ТЗ в течение следующих шести месяцев были развернуты работы по доработке системы, которые включали создание и наполнение справочников системы, развитие самой подсистемы планирования (в первую очередь, в части поддержки правил выбора рабочих на операции по специальным теграм, показывающим, в дополнение к разрядам, их уровень квалификации и умений для конкретных операций), создание необходимых дополнительных автоматизированных рабочих мест пользователей (АРМ), интеграцию с системой "Адем", дающей состав изделий и порядок выполнения технологических операций, и АСУ предприятия, построение требуемых отчетов.

Основные экраны системы представлены на рис. 1–3 (см. вторую сторону обложки). Заказы цеха на экране планово-диспетчерского бюро цеха

(рис. 1) отображаются с указанием их текущего статуса, который подкреплён окраской строк для визуального выделения значимой информации, например: подготовлен, но не начат, на технологической проработке, на нормировании, требует обеспечения материалами и инструментом, в работе, запланирован, выполнен, снят с производства, сдан. На рис. 2 показан технологический процесс изготовления изделия и конструкторско-технологический состав этого изделия, который может выгружаться из системы "Адем".

Очередь событий, представленная на рис. 3, предоставляет начальникам производства и мастерам производственных смен возможность видеть информацию о событиях, происходящих в цехе (приход нового заказа, поломка станка, отгул рабочего, опоздание поступления комплектующих или материалов и т. п.), и перестраивать расписание в условиях текущей ситуации, сложившейся в цехе.

На рис. 4 показана форма работы с расписанием цеха, представленным в виде комбинации диаграмм Ганта и Перта, где отображено распределение технологических операций на конкретных рабочих с указанием взаимосвязей различных отдельных операций. Пользователь при этом может выбрать любую операцию на диаграмме и с помощью мыши

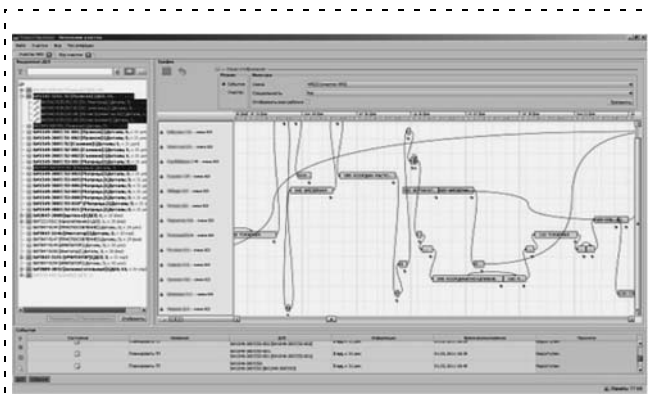


Рис. 4. Интерактивная доводка плана цеха

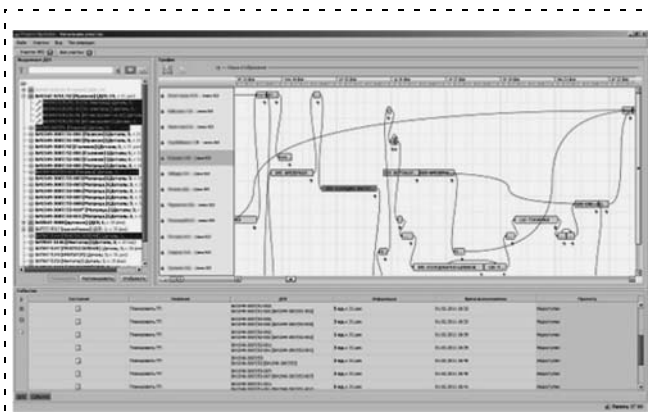


Рис. 5. Агент операции сигнализирует об ошибке в выборе исполнителя для операции

перенести ее на другого рабочего, изменить ее длительность, склеить или разъединить несколько операций. Каждое такое изменение контролируется системой. Например, если пользователь перенес операцию на рабочего, который не обладает нужной специальностью или необходимым уровнем квалификации, система сообщит об этом и окрасит новое положение операции в красный цвет (рис. 5).

Сменно-суточное задание (ССЗ), формируемое системой, может иметь традиционный вид бумажного отчета, но также выводится на сенсорный терминал для непосредственного доведения задания до рабочего в режиме реального времени, где каждая следующая задача определяется динамически в результате анализа ситуации в цехе и состояния работ других рабочих.

Внедрение системы: январь — август 2011 г. (7 месяцев). Внедрение системы началось с тотального оснащения цеха необходимым оборудованием и больших усилий руководства цеха, направленных на перевод конструкторской и технологической документации из бумажной формы в электронную, что составляет важную часть входных данных для планирования работы цеха. Фактически, одновременно с внедрением мультиагентной системы на заводе форсированным образом пошло обучение работников цеха основам компьютерной грамотности. Кроме того, постоянно уточняли требования к системе, прежде всего, в части удобства работы пользователей, а также на больших объемах конкретных производственных данных выявляли и устраняли ошибки программирования, неизбежно возникающие в столь сложных проектах, что в целом привело к задержке завершения проекта почти на четыре месяца против исходного срока.

Причины такой задержки проекта связаны в первую очередь с инновационным характером разработки (в мире нет прямых аналогов), и потому часть требований выяснялась, изменялась и уточнялась в ходе работы (в общей сложности за время создания и внедрения системы получено 352 замечания, из них 221 — новые требования для доработки системы), что позволило максимально удовлетворить требованиям конкретного производственного цеха.

Доработки системы по итогам внедрения: сентябрь — декабрь 2011 г. (4 месяца). По результатам внедрения было подготовлено дополнительное ТЗ на новые функциональные возможности системы, необходимость в которых выявилась непосредственно в ходе создания системы, что в основном касалось поддержки работы с архивом, дополнительных функций АРМ (например, для распределителей работ планово-диспетчерского бюро (ПДБ) — более удобный учет выполненных работ), процессов учета брака и перепланирования соответствующих работ, учета матрицы транспортировки, частичной сдачи заказа, ускорения работы системы и т. д.

Созданная система была доработана "на ходу" без остановки ее ежедневного использования в цехе.

Результаты внедрения

В настоящее время около 30 пользователей используют систему ежедневно в своей работе и любой, даже небольшой, сбой может вызвать нарушение бизнес-процесса работы цеха.

В числе основных пользователей: руководство цеха, ПДБ, нормировщики, распределители работ, мастера, технологи, контролеры и ряд других сотрудников цеха и предприятия в целом.

В ходе внедрения системы были получены следующие основные результаты:

- проведен полный переход от бумажной к электронной технологии управления цехом;
- прозрачность работы цеха достигла около 100 %, что позволило наладить контроль и оптимизировать работы;
- введенные данные по объектам и технологическим процессам используются повторно, что приводит к росту производительности труда технологов и нормировщиков;
- система цеха полностью интегрирована в информационное пространство предприятия: заказы импортируются в мультиагентную систему из системы управления предприятия, заработная плата рабочим начисляется на основе данных мультиагентной системы и передается в систему ИС;
- благодаря интеграции с системой управления предприятия снижается нагрузка на ПДБ цеха и увеличивается оперативность (скорость реакции) при поступлении новых заказов, что, в свою очередь, ускоряет производство новых изделий;
- в системе поддерживается полный цикл управления: от ввода событий — к планированию и контролю результатов через отметки факта выполнения работ и анализу "план против факта";
- план работы цеха может теперь в любой момент перестраиваться и пересчитываться быстро, гибко и с учетом индивидуальных особенностей каждого заказа и ресурса;
- принимаемые решения становятся более надежными, обоснованными и точными, избавленными от ошибок людей;
- автоматизированы все основные рутинные операции, что снижает трудоемкость управления: например, ССЗ формируются автоматически, но могут быть удобно и просто доработаны в любом направлении;
- стратегическое планирование также становится более простым, быстрым и удобным: АРМ "Мастер план" строит производственное расписание на горизонт до двух лет за время около 10...15 мин;
- важные субъективные знания мастеров о станках, технологиях и рабочих (плохо формализуемые) становятся объективными и могут быть использованы для повышения качества планирования;
- создана платформа для развития производственных ресурсов цеха без роста численности управленческого персонала.

По мнению руководства завода и цеха, главными результатами проекта стало достижение полной прозрачности в планировании деятельности цеха, что позволяет с опережением видеть "узкие места" производства и своевременно, гибко и оперативно перераспределять ресурсы и планировать работу цеха в реальном времени, что приводит к значительному повышению эффективности управления работой цеха.

Изначально для руководства предприятия данный цех во многом представлял собой закрытый "черный ящик", по вине которого регулярно срывались сроки важных заказов, но оплата была относительно высока в силу наличия очень высококвалифицированных рабочих. Переход к оперативному планированию позволил выявить ряд проблем, включая диспропорцию между структурой заказов и квалификацией существующего персонала, сузить возможности для "приписок", сократить простой и дефицит ресурсов и т. д.

Ниже представлены наиболее важные преимущества для руководства цеха, начальников участков и смен, мастеров, которые уже сегодня могут быть выражены в цифрах:

- за счет использования системы стало возможным повысить объем валовой продукции цеха на 5...10 %;
- сократилась "беготня" по коридорам между ПДБ, бюро труда и зарплаты, техническим бюро и участками в поисках документов. До внедрения системы этим занимались семь человек по два часа ежедневно — экономия составляет 14 нормо-часов рабочего времени ежедневно;
- сократились затраты на коммуникацию и поиск информации по заказам и изготовленным изделиям для анализа готовности работ по заказу. До внедрения системы для этого требовалось в среднем не менее одного часа рабочего времени заместителя начальника цеха по производству;
- анализ срока сдачи заказа в поле всех заказов позволяет более четко оценивать риски и получать прогнозы на несколько месяцев вперед — экономия составляет 128 нормо-часов в месяц для всех участников;
- анализ технологического процесса и его норм в любое время без поиска бумажных документов дает экономию 23 нормо-часов в месяц;
- анализ цикла производства по этапам (выдача технологии, нормирование, поступление материала и выдача его в работу, сдача заказа), что особенно важно для выявления причин невыполнения заказа в срок, позволяет сэкономить 256 нормо-часов в месяц;
- анализ загруженности и производительности труда рабочих дает экономию 48 нормо-часов в месяц;
- автоматическое формирование ССЗ на месяц впереди экономит 64 нормо-часов рабочего времени ежемесячно (до внедрения системы этот процесс отнимал два рабочих дня четырех человек);

- автоматизированы все основные рутинные операции, которые могут быть удобно и просто доработаны в любом направлении, что снижает трудоемкость управления (например, автоматически рассчитываются расценки, объемы незавершенного производства, автоматически формируется ССЗ) — экономия дает 528 нормо-часов в месяц;
- справка по планам загрузки по основным видам работ дает возможность опережающего анализа потребности в рабочих той или иной специальности и экономит 36 нормо-часов в месяц.

В результате экономия от внедрения системы для одного цеха составляет не менее 1163 нормо-часов в месяц, или 7 человеко-месяцев, что соответствует $84 \cdot 40\,000 = 3\,360\,000$ руб. в год (без учета выпуска дополнительной продукции при той же численности работников цеха).

Перспективы развития системы

Созданная в ходе проекта система "скользящего планирования" в реальном времени уже сегодня существенно отличается от известных на рынке, обеспечивая адаптивное планирование по любым непредвиденным событиям в сочетании с контролем исполнения планов, когда отметки о выполненных работах также приводят к изменению и уточнению сменно-суточных заданий рабочим в реальном времени.

Кроме того, в систему с перспективой заложен ряд таких новых функциональных возможностей, которые на сегодня пока опережают потребности "обычного" производства, но могут быть легко возвращены так, чтобы превратить цех и все предприятие в настоящую "фабрику будущего":

- сенсорные экраны рабочих и планшеты (айпады) мастеров, большой экран в цехе, отражающий ход работ на местах в динамике — рабочий может получать сменно-суточное задание не целиком на день, а отдельно по операциям, получая следующую операцию после подтверждения выполнения предыдущей, что может мотивировать квалифицированных рабочих к сдельной оплате труда, перевыполнению норм и росту производительности труда;
- полный цикл производства от ввода заказа до отметки о выполнении операций позволяет постоянно в реальном времени актуализировать состояние производства, что, в свою очередь, дает возможность для принятия управленческих решений в темпе производства;
- экономика реального времени — любой новый заказ может считаться системой с учетом "удара" по другим заказам, которые могут быть задержаны из-за срочности данного, при этом известна цена каждой операции, каждого компонента изделия, каждой минуты станка и рабочего с учетом энергопотребления, ремонтов и т. д.;

- управление на основе знаний — основой системы становится пополняемая база знаний о цехе, которая содержит помимо обычных справочных данных описание особых умений рабочих и особенностей станков, нюансов технологических операций и т. д.;
- развитие мультикритериальной оптимизации за счет учета и поиска баланса интересов новых агентов (важность клиента, себестоимость, занятость и рост квалификации рабочих, электропотребление, экология и др.). При этом многокритериальное планирование может быть гомеостатическим: система может ситуативно "оптимизировать" план под ряд противоречивых критериев (чем хуже ситуация по критерию, тем важнее добиться улучшения), обеспечивая эластичность по критериям;
- обучение из опыта: система может обучаться из опыта и, например, не назначать микронные операции рабочему, который несколько раз "сорвал" их выполнение, или рекомендовать такому рабочему пройти специальные курсы обучения;
- трансфер знаний: система может поддерживать передачу знаний от квалифицированных рабочих молодым, используя гибкие схемы мотивации и оплаты наставничества;
- создание сетцентрической платформы для построения адаптивной р2р-сети взаимодействия цехов предприятия;
- подключение к производственному планированию различных служб предприятия: продавцов, финансистов, экономистов, снабженцев, кадровиков и т. п. для получения сбалансированного и прозрачного решения по производству;
- создание интеллектуального интерактивного стратегического планировщика завода по объемному планированию на большой горизонт планирования на основе мультиагентной технологии;
- наличие системы, позволяющей моделировать процесс выполнения предполагаемых заказов на различном оборудовании, с учетом дополнительных смен и сверхурочных работ, при увеличении численности или квалификации рабочих и т. п. Благодаря данной системе становится возможным моделирование управленческого решения и его последствий сразу же в момент возникновения данной необходимости, что, в свою очередь, снижает риски и возможные негативные последствия;
- создание "бизнес-радар" руководства для скользящего анализа ситуации в цехе и получения опережающих прогнозов в целях раннего выявления и согласованного преодоления "узких мест";
- разработка высокоуровневого проблемно-ориентированного языка управления планировщиками цехов для программистов предприятия;
- повышение производительности системы и использование принципов облачных вычислений (cloud computing).

Заключение

Переход к распределению ресурсов в реальном времени обеспечивает для предприятий возможность повышения гибкости и оперативности в принятии решений, увеличения эффективности использования ресурсов, сокращения оборотных средств и складских остатков, исключения простоя ресурсов и аварийных дефицитов и "нехваток" в последнюю минуту и т. п.

Вместе с тем, наш опыт разработки и внедрения подобных систем показывает, что внедрение рассматриваемых систем является не менее сложным и трудоемким процессом, чем сама разработка, что необходимо обязательно учитывать в планировании новых крупных проектов.

При этом полученный опыт внедрения показывает, что эти усилия для заказчика могут окупаться в течение самого короткого времени.

Список литературы

1. Андреев М. В., Иващенко А. В., Кривенко С. А. Мультиагентная система распределения производственных ресурсов в тяжелом машиностроении // Программные продукты и системы. 2010. № 3. С. 56–62.
2. Городецкий В. И., Иващенко А. В., Карсаев О. В., Скобелев П. О., Юсупов Р. М., Царев А. В. Мультиагентные технологии для оперативного управления ресурсами в реальном времени // Третья мультиконференция по проблемам управления. 12–14 октября 2010 г. СПб., 2010. С. 226–230.
3. Скобелев П. О., Иващенко А. В., Андреев А. В., Бабанин И. О. Мультиагентные технологии для управления распределением производственных ресурсов в реальном времени / Вычислительные технологии в естественных науках. Перспективные компьютерные системы: устройства, методы и концепции // Труды семинара. Таруса, 24 марта 2011. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 110–122.
4. Андреев М. В., Бабанин И. О., Вылегжанин А. С., Иващенко А. В., Кольбова Э. В., Скобелев П. О. Мультиагентная система управления инструментальным цехом // Тр. XIII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, 2011. С. 451–459.
5. Андреев М. В., Иващенко А. В., Симонова Е. В., Скобелев П. О., Царев А. В. Автоматизация адаптивного управления производством на промышленном предприятии: учеб. пособ. Самара: ПГУТИ, 2009. 184 с.

ИНФОРМАЦИЯ



**Весной 2012 г. в Санкт-Петербурге
на базе ГНЦ РФ ОАО «Концерн «Электроприбор»
состоится конференция и симпозиум:**

- ♦ с 27 по 29 мая 2013 г. XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (МКИНС 2013)

Тематика конференции

- Системы навигации, управления и наведения и их элементы
- Интегрированные навигационные системы для морских, наземных и аэрокосмических объектов
- Инерциальные системы и датчики
- Спутниковые системы GLONASS, GPS, Galileo и их дополнения
- Микромеханические системы
- Алгоритмы и программное обеспечение
- Испытания и метрология

- ♦ с 17 по 20 сентября 2013 г. симпозиум Международной ассоциации по геодезии (IAG)
«Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижном и подвижном основаниях»

Тематика конференции

- ♦ Средства и методы наземных абсолютных и относительных измерений гравитационного поля на неподвижных и подвижных основаниях
- ♦ Абсолютные баллистические гравиметры и относительные гравиметры;
- ♦ Гравитационные градиентометры
- ♦ Новые результаты измерений гравиметрических сетей, новые гравиметрические сети и измерения в новых районах
- ♦ Вопросы метрологии в гравиметрии, результаты сличений абсолютных гравиметров и применения гравиметрии в метрологии
- ♦ Стандартизация и базы данных абсолютных измерений гравитационного поля
- ♦ Гравитационные эксперименты

*Подробную информацию о конференции см. сайте:
<http://www.elektropribor.spb.ru/cnf/rconf>*

УДК 62-1

В. Г. Градецкий¹,

д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,

И. Л. Ермолов², канд. техн. наук, доц.,
ermolov@stankin.ru,

М. М. Князьков¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

Е. А. Семёнов¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

А. Н. Суханов², студент,

¹ Институт проблем механики
им. А. Ю. Ишлинского РАН,

² Московский государственный
технологический университет СТАНКИН

Применение разгрузочных элементов в конструкции робота-экзоскелета*

Рассмотрены технические устройства типа "робот-экзоскелет", проведен анализ работы приводной системы робота-экзоскелета, основанной на пневматике, при применении разгрузочных элементов.

Ключевые слова: экзоскелет, робототехнические устройства, математическая модель, многозвенные системы, параметрический анализ, пневматические приводы

Стремительное развитие антропоморфных роботов в последнее время привело к расширению границ робототехники как научной и технологической дисциплины. Появляются все более надежные системы технического зрения и осязания роботов. Увеличение числа степеней подвижности позволяет создавать более маневренные и гибкие платформы, что, в свою очередь, необходимо для решения многих практических задач. Основными целями создания роботов антропоморфного типа являются изучение динамики поведения подобных механизмов в разных средах и ситуациях, а также проведение работ там, где необходимы маневренность и большая подвижность роботизированных платформ. В то же самое время человечество нуждается в увеличении производительности труда, в добыче большего количества полезных ископаемых, ищет пути быстрой ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и техногенных катастроф и решает задачу восстановления двигательных функций людей с ограниченными возможностями.

В соответствии с вышеизложенным данная статья поднимает важный вопрос о необходимости создания

* Работа проводилась при поддержке Гранта РФФИ № 11-01-12110-офи-м-2011.

универсальной антропоморфной роботизированной платформы для решения названных задач, отвечающей всем требованиям безопасности, надежности, практичности и функциональности, которые предъявляют данные области человеческой деятельности.

Робот-экзоскелет — техническое устройство, способное работать в нескольких режимах:

1) режим увеличения мускульной силы человека за счет приводов, расположенных на внешнем каркасе;

2) режим мобильной платформы высокой проходимости:

- с дистанционным управлением человеком-оператором;
- в режиме автономного функционирования.

Можно выделить следующие научные проблемы и задачи, стоящие перед разработчиками экзоскелетных систем:

- создание эффективного энергетического компонента экзоскелета;
- создание надежной системы управления;
- обеспечение высокой подвижности экзоскелета;
- уменьшение нагрузки на оператора посредством повышения эргономичности системы;
- повышение жесткости и легкости конструкции за счет использования современных композитных материалов.

Решение поставленных задач позволит создать надежную и удобную в использовании систему, которая позволит улучшить условия труда рабочих, занимающихся тяжелым, утомительным физическим трудом и находящимся в опасных для здоровья средах [2, 3].

Обобщенная структура экзоскелета

Один из вариантов обобщенной структуры системы "пользователь—экзоскелет" представлен на рис. 1.

В такой системе оператор, используя человеко-машинный интерфейс, дает команды приводам экзоскелета через систему управления. В составе экзоскелета в качестве человеко-машинного интерфейса может выступать набор задающих устройств и датчиков, интегрированных в конструкцию экзоскелета. Система управления, руководствуясь информацией от датчиков и пользователя, осуществляет настройку регуляторов скорости, тока и положения в системе с электроприводами или выдает управляющие воздействия на клапаны в пневмо- или гидросистеме. Сигналы с датчиков давления и расходомеров, входящих в состав гидро- или пневмосистемы питания, а также датчиков заряда аккумуляторов поступают через человеко-машинный интерфейс оператору для осуществления контроля

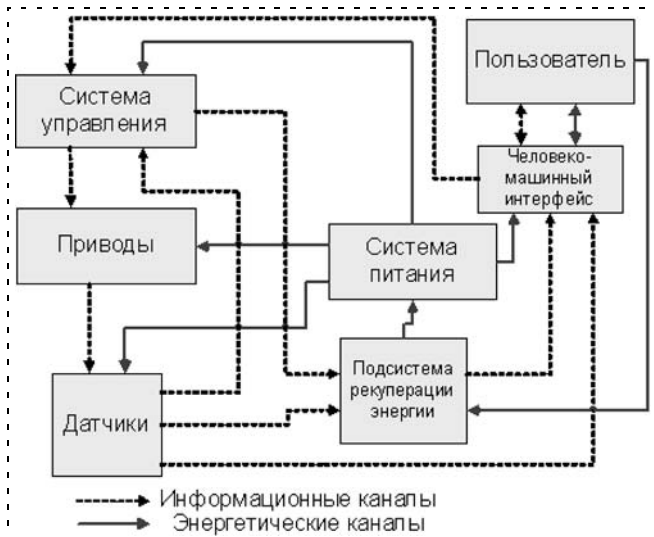


Рис. 1. Обобщенная структурная схема экзоскелетной системы

за работоспособностью системы экзоскелета. Питание экзоскелета может быть основано на электричестве, сжатом газе или жидкости. Ввиду долговременного использования экзоскелета целесообразно применение рекуперации энергии в составе системы питания. Подсистема рекуперации энергии должна быть непосредственно связана с источником энергии и датчиками для отслеживания текущего действия оператора и своевременного увеличения запаса энергии в системе питания экзоскелета за счет действий оператора.

Математическая модель ноги робота-экзоскелета

На рис. 2 приведена предлагаемая кинематическая система экзоскелета ноги. Для осуществления движения звеньев предлагается использовать при-

воды линейного перемещения (гидро- или пневмоприводы).

В данной схеме (рис. 2) представлены три звена, соединенные между собой плоскими шарнирами. Число приводов в приводной системе может быть обусловлено числом операций, которые эта система будет выполнять.

При проектировании нижних конечностей экзоскелета были рассмотрены крутящие моменты, возникающие в сочленениях звеньев конструкции. Для осуществления движения звеньев "ног" экзоскелета было предложено применить приводную систему, основанную на пневмоцилиндрах [4]. На рис. 3 приведена одна из предложенных конструкций.

Конструкция экзоскелета достигает равновесного состояния, если выполняются условия, заданные следующей системой уравнений (1):

$$\begin{cases} M_1 = -\frac{m_1 L_1 g}{2} \cos \gamma - m_2 g \left[L_1 \cos \gamma + \frac{L_2}{2} \cos \beta \right] - \\ - m_3 g \left[L_1 \cos \gamma + L_2 \cos \beta + \frac{L_3}{2} \cos \delta \right] - \\ - P [L_1 \cos \gamma + L_2 \cos \beta + L_4 \cos \delta]; \\ M_2 = -m_2 g \frac{L_2}{2} \cos \beta - m_3 g \left[L_2 \cos \beta + \frac{L_3}{2} \cos \delta \right] - \\ - P [L_2 \cos \beta + L_4 \cos \delta]; \\ M_3 = -m_3 g \frac{L_3}{2} \cos \delta - P L_4 \cos \delta, \end{cases} \quad (1)$$

где M_1 , M_2 и M_3 — моменты сил в сочленениях звеньев системы; P — вес полезной нагрузки; m_1 , m_2 и m_3 — массы звеньев; g — ускорение свободного падения; γ , β и δ — углы между звеньями и горизонтом; L_1 , L_2 , L_3 и L_4 — геометрические параметры звеньев.

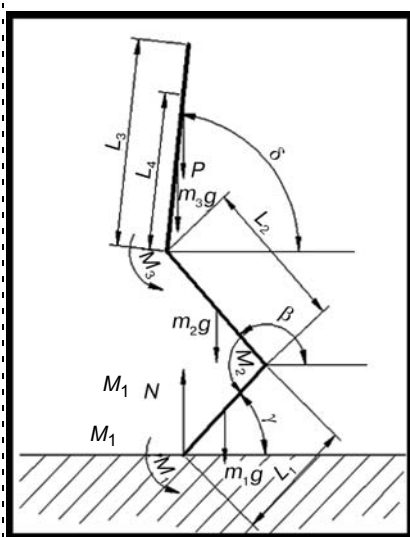


Рис. 2. Кинематическая схема трехзвенника с действующими на него силами и моментами

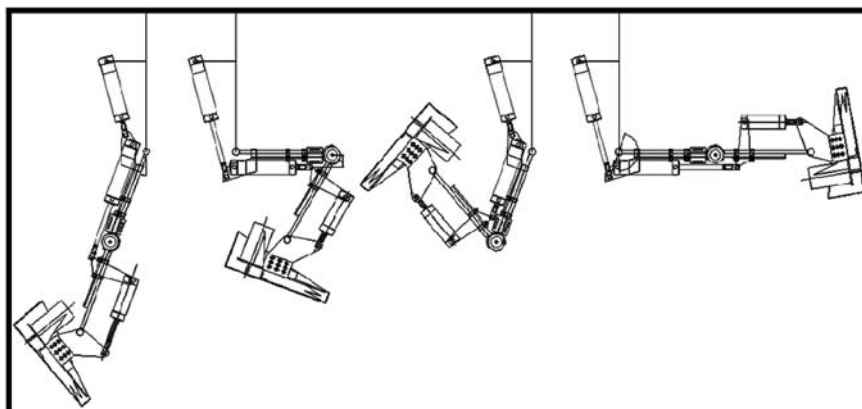


Рис. 3. Многозвенная система ноги экзоскелета

Усилия, создаваемые пневмоприводами в данной системе, равны

$$\begin{cases} F_1 = \frac{M_1}{L_{arm1}}; \\ F_2 = \frac{M_2}{L_{arm2}}; \\ F_3 = \frac{M_3}{L_{arm3}}, \end{cases} \quad (2)$$

где L_{arm1} , L_{arm2} и L_{arm3} — плечи действия сил, создаваемых приводной системой экзоскелета.

Зависимости моментов и сил от изменения угла между звеном спины и горизонтом в положении "сидя" показаны на рис. 4 и рис. 5, соответственно.

В соответствии с принятой конструкцией экзоскелета плечо действия силы в ступне является постоянной величиной, а плечи сил приводов голени и бедра изменяются в зависимости от углов в колене и бедре, соответственно (рис. 6).

Увеличение грузоподъемности технического устройства типа "робот-экзоскелет" несомненно актуально для оценки эффективности его использования. В рамках данной статьи рассматривается решение поставленной задачи путем применения разгрузочных элементов. В качестве таких элементов предлагается использовать пружины, интегрированные в приводную систему, а именно установленные на штоки пневматических приводов. Данное расположение пружинящих элементов позволит использовать штоки пневматических цилиндров в качестве направляющих, что обеспечит продольное



Рис. 4. График изменения моментов сил в системе

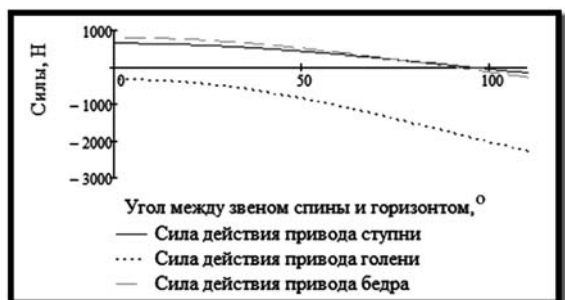


Рис. 5. График изменения усилий приводной системы экзоскелета

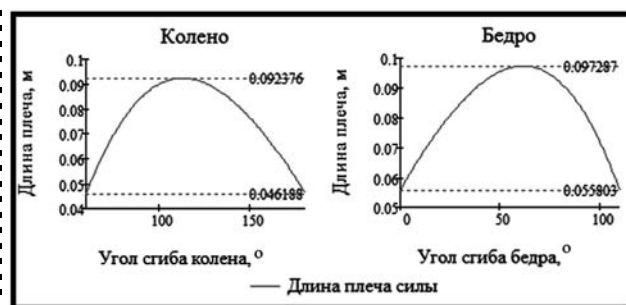


Рис. 6. Графики изменения длины плеч сил



а)



б)

Рис. 7. Плечо силы привода коленного сустава, модифицированного пружиной (а), момент в коленном суставе (б)

воздействие силы упругости пружины на элементы экзоскелетной системы и нивелирует поперечную составляющую этой силы. Коэффициент жесткости этой пружины по закону Гука будет равен

$$k_{\text{пруж}} = \frac{F_{\text{пруж}}}{\Delta x}, \quad (3)$$

где Δx — деформация пружины. В данном случае деформация пружины равна ходу штока пневматического цилиндра. На рис. 7 показаны изменения силы привода коленного сустава и момента при использовании амортизации.

На рис. 8 и 9 (см. третью сторону обложки) изображены графики изменения моментов сил пневмоприводов без использования амортизационного эффекта (рис. 8) и с применением пружин (рис. 9).

Из результатов экспериментов видно (рис. 8, 9, см. третью сторону обложки), что интеграция пружины в приводную систему позволяет расширить диапазон изменения угла наклона спины при приседании или увеличить массу переносимого груза. Результат трехмерного моделирования экзоскелетона приведен на рис. 10 (см. третью сторону обложки).

Заключение

Сочетая в себе легкие материалы и возможности современных приводов, экзоскелет может найти применение во многих областях деятельности человека. В данной статье была приведена обобщенная структурная схема экзоскелета, предложена кинематическая модель ноги экзоскелетона и составлена ее математическая модель. Были получены характеристики изменения моментов на сочленениях звеньев экзоскелетона и сил приводной системы при заданных параметрах нагрузки и энергопотребления. Был предложен и обоснован метод функционального улучшения конструкции,

закрывающийся в интеграции амортизирующих элементов в приводную систему экзоскелетона.

Список литературы

1. **Вукобратович М.** Передвижение роботов и антропоморфных механизмов. М.: Мир, 1976. С. 541.
2. **Vukobratović M., Stokić D.** Control of Manipulation Robots: Theory and Application // Scientific Fundamentals of Robotics. Springer-Verlag, 1982. V. 2.
3. **Vukobratović M., Borovač B., Surla D., Stokić D.** Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application // Scientific Fundamentals of Robotics. Springer-Verlag, 1989. V. 7.
4. **Gradetsky V., Kalinichenko S., Kravchuk L., Lopashov V.** Modular Design and Mechatronic Approaches to the Exoskeleton System. Lecture Notes of the ICB Seminars Biomechanics, Biomechanics of the Musculoskeletal System Medical Robotics. Polska Akademia Nauk, Warsaw, 2000. P. 260—269.
5. **Word J., Sugar Th., Standeven J., Engsborg J.** Stroke Survivor Gait Adaptation and Performance After Training on a Powered Ankle Foot Arthroisis // Proc. of 2010 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation, May 3—8. 2010. Anchorage, Alaska, USA. P. 211—216.
6. **Ермолов И. Л., Князьков М. М., Суханов А. Н.** Разработка математической модели экзоскелета ноги // Матер. студен. науч.-практ. конф. "Автоматизация и информационные технологии". Секция "Автоматизация и управление", 30 марта 2011, Москва. С. 28—34.

УДК 531.1

В. Е. Павловский,

гл. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук, проф.,
vpavl@mail.ru,

Институт прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН, Москва,

А. В. Панченко, аспирант,
PanchenkoAV@var.ru,
МГУ им. М. В. Ломоносова

Модели и алгоритм управления движением малого шестиногого робота

Построена динамическая модель шестиногого шагающего аппарата. Рассмотрены различные кинематические схемы ног аппарата. Приведен аналитический алгоритм синтеза управления движением робота для регулярной походки по плоскости. Работоспособность алгоритма подтверждена с помощью компьютерной модели.

Ключевые слова: шагающая машина, моделирование, динамика

Введение

Шагающие машины — это сложные системы с большим числом степеней свободы и сложным управлением [1—3]. Отметим, что при проектировании шагающих аппаратов центральной проблемой является синтез алгоритма управления. Кроме того, возникает также проблема выбора кинемати-

ческой схемы аппарата и исполнительных механизмов двигательной системы. Возможные динамические нагрузки на аппарат вносят коррективы в выбор двигателей.

В ИПМ им. М. В. Келдыша РАН разработан малый шестиногий робот HexMini, его модели, макет и алгоритм управления движением для произвольного движения по плоскости рассматриваются в данной статье.

Конструкция и кинематическая схема

За отправную точку создания модели был выбран робот АНЗ-R (рис. 1) фирмы LynxMotion [4]. Отличительная черта схемы этого робота — центральная симметрия корпуса. Точки крепления ног

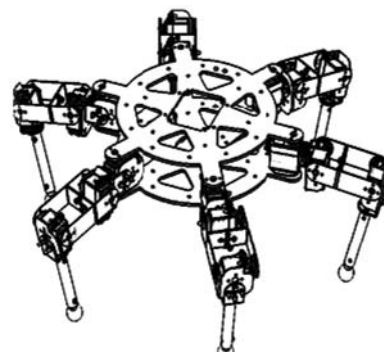


Рис. 1. CAD модель робота в SolidWorks

образуют правильный шестиугольник. Ноги имеют инсектоморфную [1] кинематическую схему (рис. 2).

Конструкция робота имеет модульную структуру. Ноги робота также являются модульными (рис. 3). Каждый модуль собирается из унифицированных деталей, допускающих различные соединения между собой. На сайте разработчиков [4] выложена в открытый доступ обширная библиотека компонентов. Детали изготавливаются из листового мате-

риала с помощью лазерной резки на станке с ЧПУ, либо печатаются на 3D-принтере. Все вышеперечисленное позволяет легко перестраивать робота и проводить исследование новой кинематики или синтезировать кинематику робота под определенную задачу. Например, можно вставлять дополнительные степени свободы, если есть необходимость добавить подвижность в сегмент. Такая модульная конструкция является удобной платформой для отработки алгоритмов управления шагающих аппаратов.

Приведем примеры кинематических схем ног аппарата, которые можно реализовать на базе указанных унифицированных модулей.

◆ *Колесно-шагающая конструкция ноги* (рис. 4) позволяет переключаться из обычного режима ходьбы в колесный режим (в качение). Колеса могут быть как пассивными, т. е. свободно вращающимися, так и активными, с электромоторами. В пассивном колесном режиме движение может осуществляться за счет волнообразного движения колес относительно контактной поверхности, наподобие того, как разгоняются бегуны на роликовых коньках [5].

◆ *Ноги со специальными устройствами зацепления* (рис. 5) на концах ног позволяют аппарату закрепляться на вертикальных поверхностях [6]. При синтезе шагового цикла для такой ноги необходимо учитывать принцип работы зацепного механизма ноги.

◆ *Инсектоморфная нога с одной дополнительной степенью свободы* показана на рис. 6. В схему ноги добавлен вращательный шарнир, позволяющий поворачивать плоскость ноги вокруг звена длины p_1 . Пара соседних ног с такой подвижностью может быть использована в качестве манипулятора и позволяет роботу захватывать объекты, в то время как оставшиеся четыре ноги обеспечивают роботу необходимую устойчивость.

◆ *Инсектоморфная нога с двумя дополнительными степенями свободы* приведена на рис. 7. В схеме имеется до-

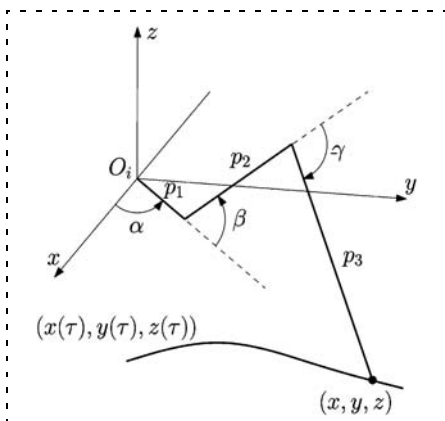


Рис. 2. Инсектоморфная кинематическая схема ноги

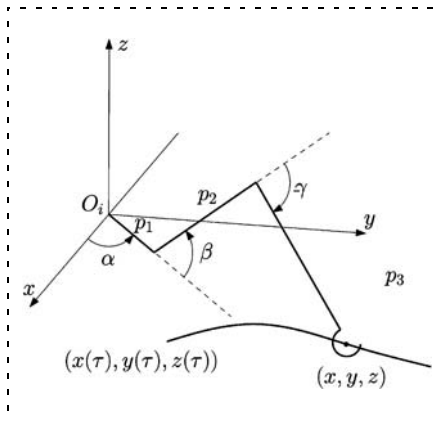


Рис. 5. Схема с зацепляющим устройством

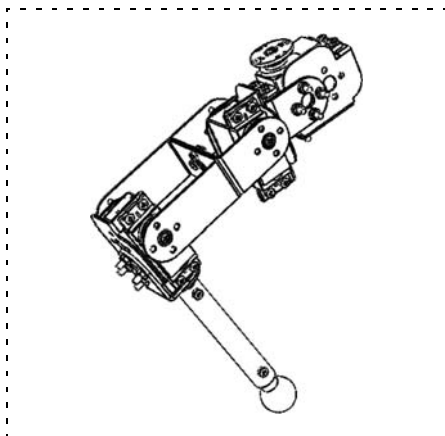


Рис. 3. CAD модель ноги робота

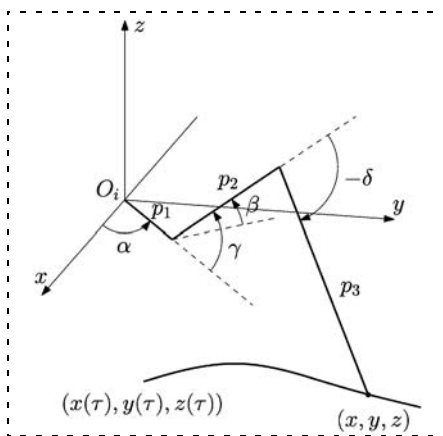


Рис. 6. Четыре степени свободы

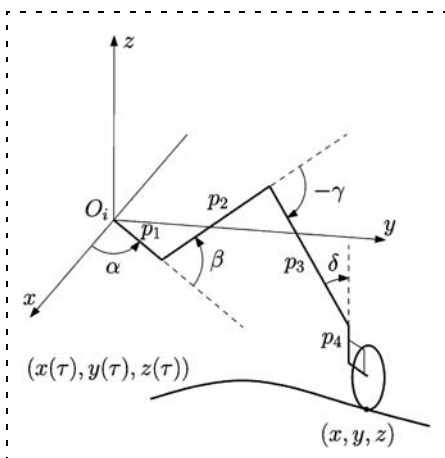


Рис. 4. Колесно-шагающая схема

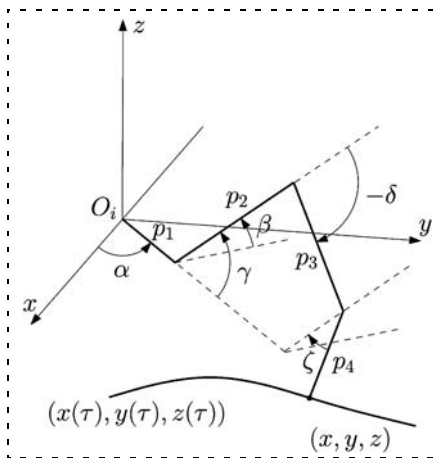


Рис. 7. Пять степеней свободы

полнительное звено на конце ноги. Угол поворота плоскости ноги и дополнительное звено позволят роботу ориентировать конец ноги под любым углом к контактной поверхности. Это может быть полезно в задачах по преодолению аппаратом различных препятствий и в задачах по манипуляции различными объектами сложной формы. Далее в статье будем рассматривать только инсектоморфную схему ноги.

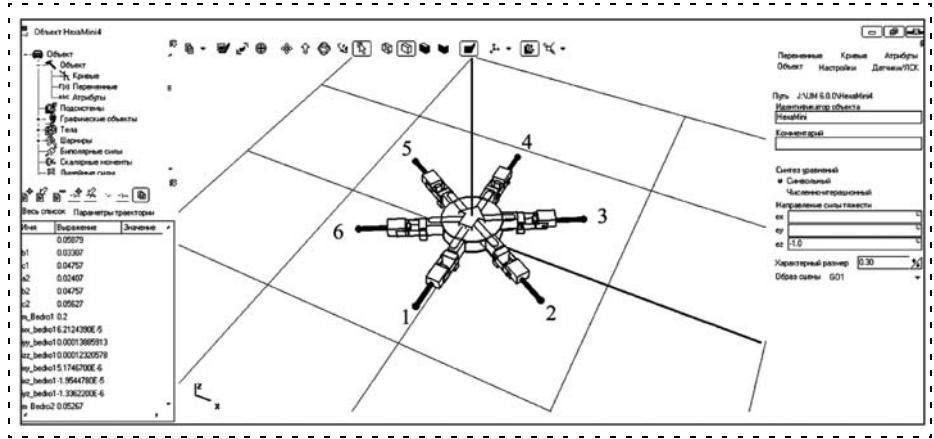


Рис. 8. Модель аппарата в ПК УМ

Создание динамической модели

С помощью САПР SolidWorks проводится предварительное исследование модели. Исследуется геометрия робота, составляется точная 3D-модель робота, находятся и оптимизируются габаритные размеры каждого сегмента. Рассчитываются все динамические параметры робота: массы сегментов, моменты инерции, центры масс сегментов. Исследуется кинематика ног: находятся допустимые углы поворота, расположение шарнирных осей в сегментах и их взаимное расположение.

После всех подготовительных работ выполняется экспорт модели в программный пакет "Универсальный Механизм" (ПК УМ). В терминах этого программного комплекса механическая система рассматривается как система твердых тел. Взаимодействие тел задается с помощью различных шарниров и контактных сил. Уравнения движения синтезируются автоматически. После синтеза уравнений движения динамическая модель готова к запуску.

Походка

Существует множество вариантов возможных походок. Рассмотрим так называемую походку трешками. Ноги разбиваются на две группы с четными и нечетными номерами ног (рис. 8). В то время как группа ног с нечетными номерами находится в фазе опоры, группа с четными номерами выполняет фазу переноса. После завершения фазы группы меняются ролями и т. д.

Прямая и обратная задача кинематики

Рассмотрим инсектоморфную схему ноги (см. рис. 2). Нога робота состоит из трех звеньев с длинами p_1, p_2, p_3 . Звенья соединены вращательными шарнирами. Звено длины p_1 i -й ноги крепится к корпусу аппарата в точке O_i . Ось Oz направлена перпендикулярно горизонтальной плоскости корпуса, ось Oy направлена вдоль радиуса OO_i , проведенного из центра корпуса через точку крепления ноги.

Прямую кинематическую задачу для ноги можно записать в виде

$$\begin{cases} x = \cos\alpha(p_1 + p_3\cos(\beta + \gamma) + p_2\cos\beta); \\ y = \sin\alpha(p_1 + p_3\cos(\beta + \gamma) + p_2\cos\beta); \\ z = p_3\sin(\beta + \gamma) + p_2\sin\beta. \end{cases}$$

Обратная задача кинематики имеет четыре возможных решения. Из практических соображений выбирается решение, соответствующее верхнему расположению коленного сустава и естественному повороту сегмента p_1 .

В явном виде решение системы выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \alpha = \arctg\left(\frac{y}{x}\right); \\ \beta = -\arccos\left(\frac{xcos\alpha + ysin\alpha - p_1}{((xcos\alpha + ysin\alpha - p_1)^2 + z^2)^{1/2}}\right) + \\ + \arccos\left(\frac{p_2^2 + (xcos\alpha + ysin\alpha - p_1)^2 + z^2 - p_3^2}{2p_2((xcos\alpha + ysin\alpha - p_1)^2 + z^2)^{1/2}}\right); \\ \gamma = -\arccos\left(\frac{(xcos\alpha + ysin\alpha - p_1)^2 + z^2 - p_2^2 - p_3^2}{2p_2p_3}\right). \end{cases}$$

Шаговый цикл

В качестве шагового цикла (рис. 9) выберем половину эллиптической дуги и замыкающую его

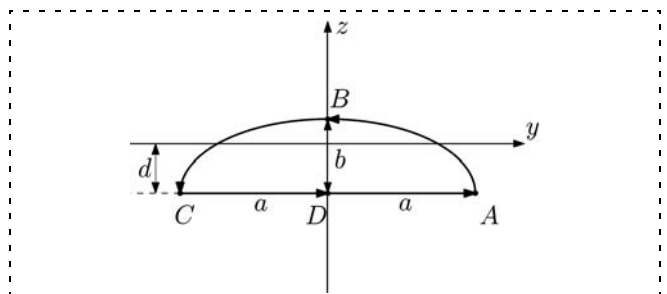


Рис. 9. Шаговый цикл

прямую. Параметры эллипса: a, b — полуоси, d — смещение вдоль оси z .

Траектория переноса ноги лежит в плоскости, параллельной плоскости Oyz , смещенной на фиксированное расстояние x_c вдоль оси Ox от точки крепления ноги. Стрелками схематически изображено движение по циклу. Замыкающая кривая CDA соответствует опорной фазе и параллельна плоскости Oxy . В зависимости от выполняемого движения корпуса траектория движения стопы во время опорной фазы должна удовлетворять условию не проскальзывания точки контакта ноги.

Рассмотрим движение точек опоры в подвижной системе координат, жестко связанной с корпусом робота. Относительно подвижной системы координат контактная поверхность движется как твердое тело. Опорные точки перемещаются вместе с опорной плоскостью как одно целое. Для твердого тела существует распределение скоростей, подчиняющееся формуле Эйлера:

$$\vec{V}_B = \vec{V}_A + \vec{\omega} \times \vec{AB}.$$

По заданному движению корпуса аппарата находится распределение скоростей на опорной плоскости в подвижной системе координат. Траектории ног в опорной фазе — это огибающая кривая поля скоростей относительного движения плоскости в подвижной системе координат, связанной с корпусом робота.

Параметризация шагового цикла

Параметрические уравнения для фазы переноса выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} x = x_c = \text{const}; \\ y = a \cos \tau; \\ z = b \sin \tau, \end{cases}$$

где $\tau = \frac{\pi}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{W}\right)$, t — время, W — полупериод одного шага.

График параметра τ (рис. 10) имеет горизонтальные касательные в точках $t = iW$, $i \in Z$. Такой выбор параметризации траектории переноса позволяет выполнять постановку и снятие ноги с опорной поверхности с нулевой конечной и начальной скоростями соответственно, таким образом, в системе не происходят удары.

Рассмотрим поступательное движение по плоскости. Плоскости, в которых расположены траекто-

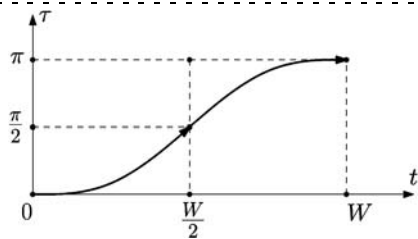


Рис. 10. График параметра τ

рии движения ног, при поступательном перемещении робота должны быть параллельны векторному полю скоростей точек поверхности в движении относительно робота. Рассчитаем преобразования опорной траектории для i -й ноги при поступательном движении робота под углом ξ к оси абсцисс.

Угол, на который нужно повернуть плоскость траектории ноги, равен $\theta_i = \xi + \frac{\pi}{2} - \eta_i$, $i = 1 \dots 6$. Вращение нужно выполнить вокруг центра эллипса.

После всех преобразований имеем:

$$\begin{cases} \hat{x} = x_c - y \sin \theta_i; \\ \hat{y} = y \cos \theta_i; \\ \hat{z} = z. \end{cases}$$

Опорные траектории — это отрезки длины $2a$, проходящие через точку $(x_c, 0)$ и повернутые на угол θ_i .

Усложним модель: пусть теперь во время движения в заданном направлении робот будет вращаться вокруг своего центра с угловой скоростью $\omega = \dot{\psi}$ (рис. 11).

Найдем положение мгновенного центра скоростей в подвижной системе координат в случае $\omega \neq 0$:

$$\begin{cases} \tilde{x} = -\frac{|V| \sin(\xi - \psi)}{\omega}; \\ \tilde{y} = \frac{|V| \cos(\xi - \psi)}{\omega}. \end{cases} \quad (1)$$

В системе координат i -й ноги центр скоростей будет иметь координаты

$$\begin{cases} \tilde{x}_i = \tilde{x} \cos \eta_i + \tilde{y} \sin \eta_i - \frac{d_b}{2}; \\ \tilde{y}_i = -\tilde{x} \sin \eta_i + \tilde{y} \cos \eta_i, \end{cases} \quad (2)$$

где d_b — диаметр корпуса.

Траектория i -й ноги в фазе опоры — это окружность с центром в точке $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ и радиусом

$$R_i = (r_i^2 + a_i^2)^{\frac{1}{2}}, \text{ где } r_i = ((\tilde{x}_i - x_c)^2 + \tilde{y}_i^2)^{\frac{1}{2}} \text{ и } a_i = \frac{W|\omega|r_i}{2}, \omega \neq 0.$$

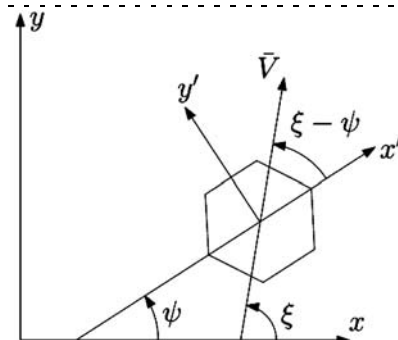


Рис. 11. Движение корпуса с вращением

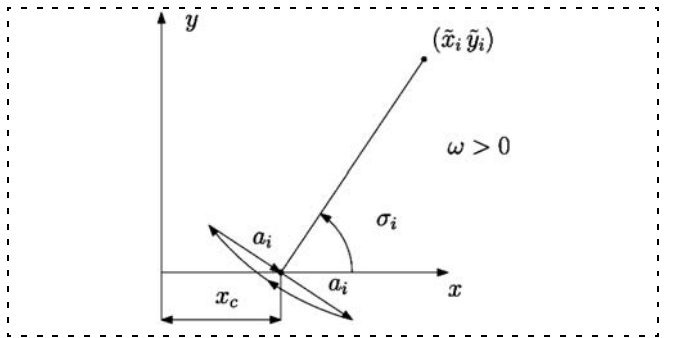


Рис. 12. Опорные траектории при повороте

Опорные траектории (рис. 12) выражаются в явном виде:

$$\begin{cases} \hat{x}_i = \cos \sigma_i \text{sign} \omega (r_i - (R_i^2 - y^2)^{\frac{1}{2}}) - y \sin \sigma_i + x_c; \\ \hat{y}_i = \sin \sigma_i \text{sign} \omega (r_i - (R_i^2 - y^2)^{\frac{1}{2}}) + y \cos \sigma_i, \end{cases}$$

где $y = a_i \cos t$.

Исследуем поведение опорных траекторий при $\omega \rightarrow 0$.

Найдем предел

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} a_i = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{W \omega r_i}{2} = \frac{W}{2} \lim_{\omega \rightarrow 0} \omega ((\tilde{x}_i - x_c)^2 + \tilde{y}_i^2)^{\frac{1}{2}}.$$

Для этого подставим в (2) выражения (1) для \tilde{x} и \tilde{y} . После всех преобразований находим, что предел для a_i существует и верно следующее равенство:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} a_i = \frac{WV}{2}.$$

Аналогично находятся пределы

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} r_i - (R_i^2 - y^2)^{\frac{1}{2}} = 0;$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \sigma_i = \theta_i = \xi - \psi + \frac{\pi}{2};$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \hat{x}_i = -y \sin \sigma_i + x_c;$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \hat{y}_i = y \cos \sigma_i.$$

Из этого следует, что случай поступательного движения является предельным случаем движения робота с вращением корпуса при $\omega \rightarrow 0$.

Доопределим угол поворота опорной траектории:

$$\sigma_i = \begin{cases} \arctan \left(\frac{\tilde{y}_i}{\tilde{x}_i - x_c} \right), \omega > 0; \\ \theta_i = \xi - \psi - \eta_i + \frac{\pi}{2}, \omega = 0; \\ \arctan \left(\frac{\tilde{y}_i}{\tilde{x}_i - x_c} \right) + \pi, \omega < 0. \end{cases}$$

Аналогично доопределим длину шага i -й ноги:

$$a_i = \begin{cases} \frac{W|\omega|r_i}{2}, \omega \neq 0; \\ \frac{WV}{2}, \omega = 0. \end{cases}$$

При таком определении параметров шагового цикла они непрерывно зависят от управления (ξ, V, ω) .

Моделирование

Модельные эксперименты — движение робота по окружности. Возможны два случая: поступательное движение корпуса и вращательное, когда корпус вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через его центр.

Поступательное движение по окружности (рис. 13) задается изменением курсового угла движения с постоянной скоростью и нулевой угловой скоростью корпуса:

$$\xi = \frac{2\pi t}{30}; V = 0,04 \text{ м/с}; \omega = 0.$$

Движение по окружности с поворотом корпуса:

$$\omega = \frac{2\pi}{30}; \xi = \omega t; V = 0,057 \text{ м/с}.$$

На рис. 14—17 приведены зависимости различных характеристик для поступательного движения.

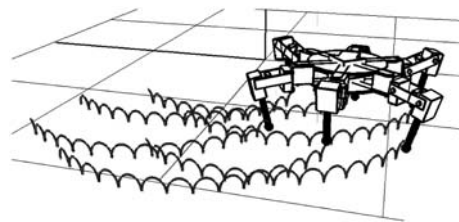


Рис. 13. Траектории переноса ног в абсолютной системе координат при поступательном движении

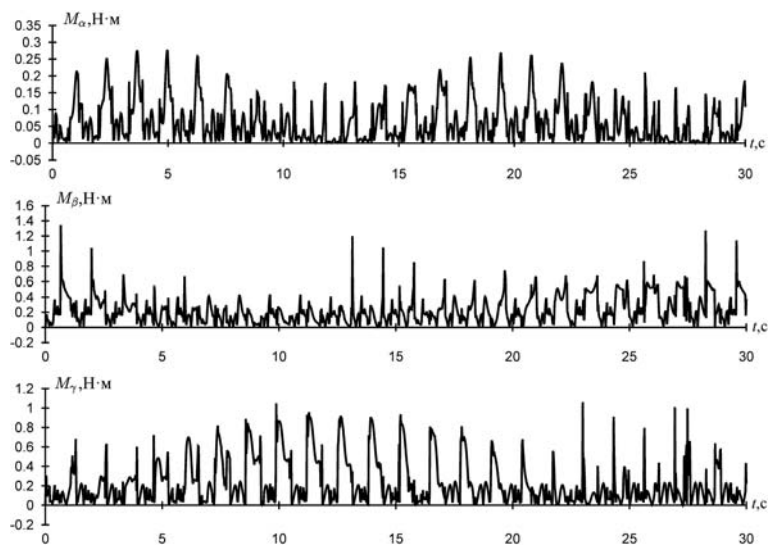


Рис. 14. Управляющие шарнирные моменты углов α, β, γ

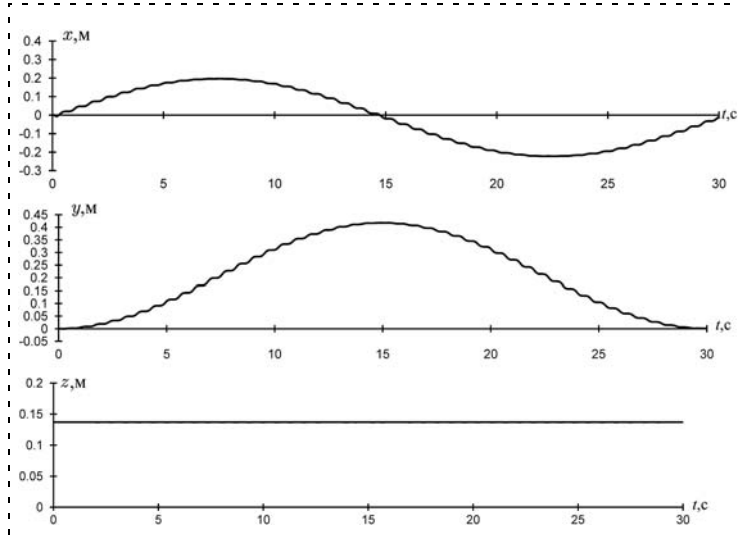


Рис. 15. Координаты центра корпуса: x , y , z

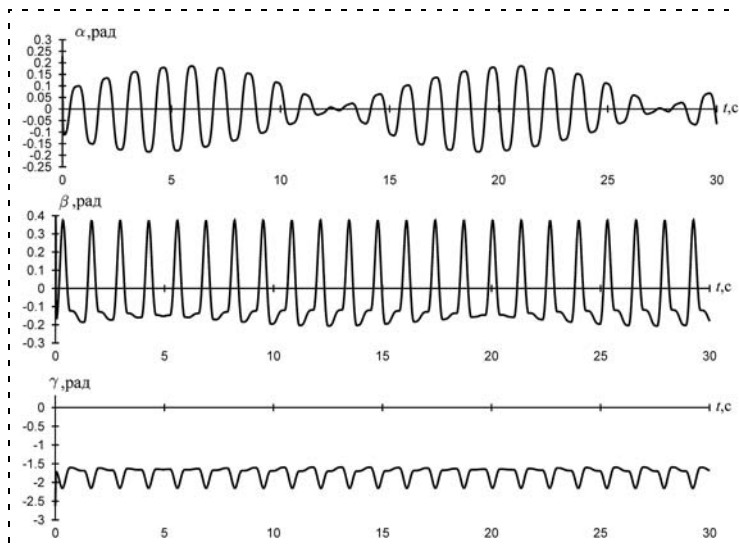


Рис. 16. Шарнирные углы α , β , γ

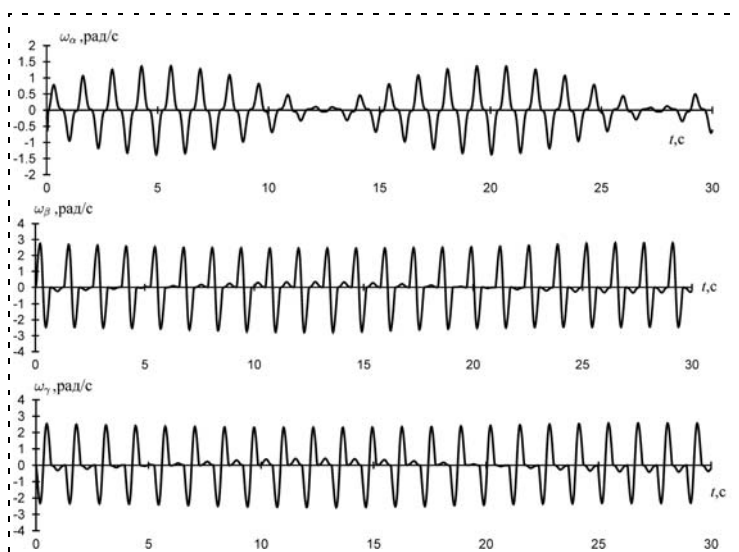


Рис. 17. Угловые скорости шарниров α , β , γ

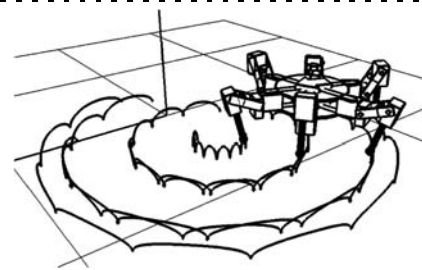


Рис. 18. Траектории переноса ног в абсолютной системе координат при движении с вращением корпуса

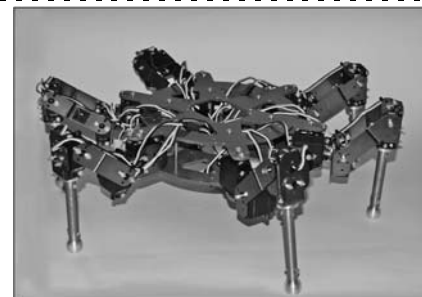


Рис. 19. Робот HexMini

В случае движения по окружности с поворотом корпуса (рис. 18) моделирование дает аналогичные зависимости.

Заключение

Моделирование показало эффективность построенного алгоритма управления, который достаточно прост в теории и не требует больших вычислительных мощностей. Возможно обобщение алгоритма построения опорных траекторий для аппаратов с отличной от инсектоморфной кинематикой ног и с произвольным расположением точек крепления ног.

Планируется реализация алгоритма на макете робота HexMini (рис. 19). Диаметр робота около 50 см, сухая масса 4 кг.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-07-00409, 10-01-00160.

Список литературы

1. Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984. 310 с.
2. Голубев Ю. Ф. Основы теоретической механики. М.: Изд-во МГУ, 2000. 720 с.
3. Буданов В. М. Алгоритмы планирования движений шестиногого шагающего аппарата // Фундаментальная и прикладная математика. 2005. Т. 11. № 7. С. 197–206.
4. Lynxmotion Robotics Kits, URL: <http://www.lynxmotion.com>
5. Fucushima Robotics Lab, Leg-Wheel Walking Machine "Roller Walker" URL: http://www-robot.mes.titech.ac.jp/home_e.html
6. Boston Dynamics, Climbing Robot RiSe, URL: http://www.bostondynamics.com/robot_rise.html
7. Погорелов Д. Ю. О численных методах моделирования движения систем твердых тел // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1995. № 4. С. 501–506.

УДК 681.513.2; 519.244.2

Э. В. Мельник, канд. техн. наук, зав. лаб.,

НИИ многопроцессорных
вычислительных систем ЮФУ,

Г. В. Горелова, д-р техн. наук, проф.,

Технологический институт ЮФУ в г. Таганроге

Эффект выравнивания вычислительной нагрузки процессорных устройств в высоконадежных распределенных информационно-управляющих системах¹

Рассмотрены вопросы повышения надежности распределенных информационно-управляющих систем (РИУС) за счет выравнивания вычислительной нагрузки. Предложен метод исследования вероятности безотказной работы таких систем, основанный на планировании серий вычислительных экспериментов. Представлены результаты анализа влияния распределения вычислительной нагрузки на характеристики надежности системы. Показан существенный эффект от применения выравнивания нагрузки, позволяющий говорить о целесообразности ее использования в высоконадежных РИУС.

Ключевые слова: программное устройство, надежность РИУС, вероятность безотказной работы, планирование серий вычислительных экспериментов, выравнивание вычислительной нагрузки

Введение. Распределенные информационно-управляющие системы (РИУС) находят в настоящее время широкое применение в различных технических областях, в том числе при построении мехатронных и робототехнических комплексов. РИУС можно представить как набор процессорных узлов (ПУ), объединенных коммутационной сетью. Особенностью функционирования РИУС в мехатронных и робототехнических комплексах является тот факт, что они решают ограниченный набор задач управления. Задачи управления представляются в виде графа, в котором вершинами являются подзадачи, а ребрами — информационные потоки между ними. При использовании РИУС в мехатронных и робо-

¹ Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант 11-07-00542-а "Разработка научных основ создания сетевых информационных-управляющих систем".

тотехнических комплексах предъявляются повышенные требования к надежности.

Известно, что эффективным методом повышения надежности является резервирование. При этом в качестве одного из способов резервирования [1] было предложено применять резервирование производительности ПУ РИУС. В данной статье рассмотрены вопросы повышения надежности РИУС за счет выравнивания вычислительной нагрузки между ПУ. В процессе проведенного исследования выясняли, насколько эффективен этот способ и при каких условиях. Кроме того, анализировали, может ли выравнивание нагрузки привести к использованию меньшего числа ПУ (или более дешевых ПУ) без снижения общей надежности РИУС и, следовательно, к снижению стоимости РИУС.

Поскольку в исследовании необходимо было проанализировать влияние многих факторов, изменяющихся в широких диапазонах, и влияние взаимодействия факторов, был разработан метод исследования эффекта от применения выравнивания нагрузки, а также поиска эффективных конфигураций РИУС.

1. К постановке задачи исследования повышения надежности РИУС за счет выравнивания вычислительной нагрузки. Формализация задачи исследования — определения условий, при которых эффективно выравнивание нагрузки между ПУ, — основывалась на следующих теоретических положениях.

В качестве оценки эффекта от выравнивания нагрузки была принята разность вероятностей

$$\Delta P = P_{\text{нр}} - P_{\text{р}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{нр}}$ и $P_{\text{р}}$ — вероятности безотказной работы без выравнивания и с выравниванием нагрузки. ΔP должна позволить судить о наличии или отсутствии искомого эффекта.

Вероятность P безотказной работы резервированной и реконфигурируемой РИУС зависит от вероятности безотказной работы каждого ПУ. Определим ее.

При увеличении интенсивности работы (нагрузки) ПУ происходит выделение тепла. Обычно этому фактору не уделяется должного внимания, хотя разница в температурах нагруженного и ненагруженного ПУ может достигать нескольких десятков градусов. Это существенно сказывается на характеристиках надежности. В работе проведена оценка влияния данного фактора.

Предположим, что выделение тепла пропорционально увеличению нагрузки. При этом температура T процессорного узла при нагрузке будет равна

$$T = T_0 + \Delta T = T_0 + k_D D, \quad (2)$$

где D — нагрузка, T_0 — "базовая" температура (температура ПУ при нулевой нагрузке, когда ПУ не выполняет никаких действий по решению задачи); ΔT — разность температур процессорного узла при работе с нагрузкой и без нее; k_D — коэффициент пропорциональности между увеличением нагрузки и температурой.

Как показывает анализ работ [2—4], увеличение температуры ПУ уже ведет к непропорциональному увеличению интенсивности отказов. Зависимость увеличения интенсивности отказов λ от температуры является степенной, причем упрощенно можно считать, что при увеличении температуры на 10°C

интенсивность отказов удваивается, т. е. $\lambda = \lambda_0 \cdot 2^{\frac{\Delta T}{10}}$, где λ_0 — интенсивность отказов при некоторой заданной температуре (обычно 40°C).

Вероятность безотказной работы ПУ при постоянной интенсивности отказов рассчитывается по формуле $P_{\text{ПУ}} = e^{-\lambda t}$, где t — время работы.

Если эту формулу переписать с учетом разности температур, то получим

$$P_{\text{ПУ}} = e^{-\lambda_0 \cdot 2^{\frac{\Delta T}{10}} t} = P_{\text{ПУ}0}^{2^{\frac{\Delta T}{10}}} \text{ или } P_{\text{ПУ}} = P_{\text{ПУ}0}^{k(\Delta T)}, \quad (3)$$

где $P_{\text{ПУ}0}$ — вероятность безотказной работы ПУ при "базовой" температуре.

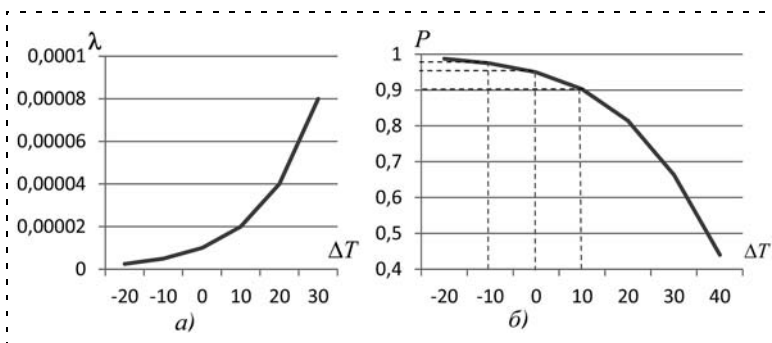


Рис. 1. Графики зависимости интенсивности отказов (а) и вероятности безотказной работы (б) от разности температур

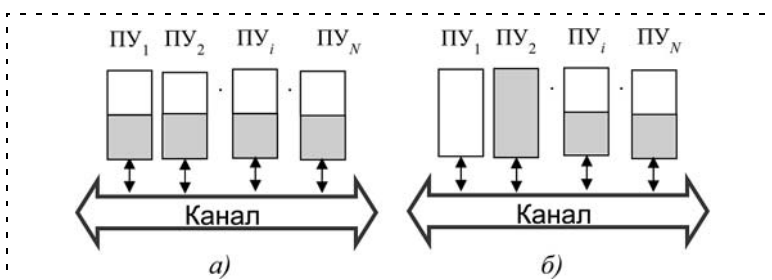


Рис. 2. РИУС с равномерно и неравномерно нагруженными ПУ

На рис. 1 представлены графики зависимости, соответственно, интенсивности отказов (рис. 1, а) и вероятности безотказной работы (рис. 1, б) от разности температур. График (рис. 1, б) показывает, насколько будут отличаться вероятности безотказной работы ПУ, работавшего при "базовой" T_0 температуре, и ПУ, работавшего при температуре, отличающейся на ΔT .

Обратим внимание на тот факт, что равное отклонение температуры от "базовой" в сторону увеличения и уменьшения приводит к неодинаковому изменению вероятности безотказной работы, причем увеличение температуры приводит к большему изменению, чем уменьшение ($P(-10) - P(0) < P(0) - P(10)$). Поскольку температура ПУ зависит в том числе и от нагрузки, то логично предположить, что при равной суммарной нагрузке РИУС с равномерно и неравномерно нагруженными ПУ будут иметь разную вероятность безотказной работы.

Таким образом, можно прийти к выводу, что, "правильно" распределяя нагрузку по ПУ, можно повысить вероятность безотказной работы РИУС.

Покажем это. Пусть в состав РИУС входит N процессорных узлов, причем возможно парирование B отказов. Рассмотрим два случая распределения нагрузки:

- равномерное распределение (рис. 2, а), т. е. суммарное число вычислительных операций D , выполняемых каждым из N процессорных узлов, одинаково и равно $D = \frac{D_{\text{общ}}}{N}$, где $D_{\text{общ}}$ — суммарное число вычислительных операций решаемой задачи;

- неравномерное распределение (рис. 2, б), предполагающее наличие трех групп ПУ по нагрузке — с повышенной D_+ (из N_+ ПУ в группе), со средней D_p (из N_p ПУ в группе) и с пониженной нагрузкой D_- (из N_- ПУ в группе), причем

$$N_+ + N_p + N_- = N,$$

где D_- — нагрузка на один ПУ в группе с пониженной нагрузкой; D_p — нагрузка на один ПУ в группе со средней нагрузкой; D_+ — нагрузка на один ПУ в группе с повышенной нагрузкой. При этом отдельные ПУ в группах имеют следующую нагрузку и температуру:

$$D_- = \frac{D_{\text{общ}}}{N} - \frac{\Delta D_{\pm}}{N_-}, \quad T_- = T_0 + k_D D_-;$$

$$D_p = \frac{D_{\text{общ}}}{N}, \quad T_p = T_0 + k_D D_p;$$

$$D_+ = \frac{D_{\text{общ}}}{N} + \frac{\Delta D_{\pm}}{N_+}, \quad T_+ = T_0 + k_D D_+, \quad (4)$$

где ΔD_{\pm} — разница в нагрузке между ПУ с повышенной (пониженной) нагрузкой и таким же числом ПУ со средней нагрузкой.

Второй случай распределения нагрузки легко может быть сведен к первому, если положить, что $N_+ = N_- = 0$ и исключить выражения для расчета D_- и D_+ , поэтому если записать формулу для расчета вероятности безотказной работы для второго случая, то она будет пригодна и для первого. Такую формулу можно вывести из формулы для расчета вероятности безотказной работы для резервированной и реконфигурируемой РИУС [1, 5], представляющей собой сумму вероятностей перехода во все работоспособные конфигурации:

$$P = \sum_{k=0}^B C_N^{N-k} P_{\text{ПУ}}^{N-k} (1 - P_{\text{ПУ}})^k.$$

Необходимо только учесть наличие трех групп ПУ с разной вероятностью безотказной работы:

$$P = \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_+} \sum_{k=0}^{N_-} f(P_{\text{ПУ}}, \Delta T, N_p, N_+, N_-, B), \quad (5)$$

где $f(P_{\text{ПУ}}, \Delta T, N_p, N_+, N_-, B) =$

$$= \begin{cases} C_{N_p}^{N_p-i} P_{\text{ПУ}}^{N_p-i} (1 - P_{\text{ПУ}})^i C_{N_+}^{N_+-j} P_+^{N_+-j} (1 - P_+)^j \times \\ \times C_{N_-}^{N_- - k} P_-^{N_- - k} (1 - P_-)^k \text{ при } i + j + k \leq B, \\ 0 \text{ при } i + j + k > B; \end{cases}$$

$$P_+ = (P_{\text{ПУ}})^{k(\Delta T)}; P_- = (P_{\text{ПУ}})^{k(-\Delta T)};$$

$C_{N_p}^{N_p-i} P_{\text{ПУ}}^{N_p-i} (1 - P_{\text{ПУ}})^i$ — выражение для учета вклада в значение вероятности $P_{\text{ПУ}}$ безотказной работы РИУС ПУ со средней нагрузкой;

$C_{N_+}^{N_+-j} P_+^{N_+-j} (1 - P_+)^j$ — выражение для учета вклада в значение вероятности P_+ безотказной работы РИУС ПУ с повышенной нагрузкой;

$C_{N_-}^{N_- - k} P_-^{N_- - k} (1 - P_-)^k$ — выражение для учета вклада в значение вероятности P_- безотказной работы РИУС ПУ с пониженной нагрузкой.

Данная формула может быть модифицирована для любого числа групп устройств с различной вероятностью безотказной работы (с различной температурой/нагрузкой применительно для рассматриваемого случая). Для этого необходимо для каждой i -й группы определить вероятность безотказной работы P_i ПУ, добавить выражение для учета вклада в значение вероятности P РИУС данной группы $C_{N_i}^{N_i - k_i} P_i^{N_i - k_i} (1 - P_i)^{k_i}$ и соответствующую сумму по i .

2. Метод исследования вероятности безотказной работы РИУС, основанный на планировании серий вычислительных экспериментов. Как отмечалось, для оценки эффекта от выравнивания нагрузки ПУ РИУС предлагается использовать в качестве критерия разность вероятностей (1) безотказной работы

для РИУС с выравниванием нагрузки и без выравнивания в широком диапазоне значений факторов, от которых зависит вероятность безотказной работы (формулы (1)—(5)). При этом должны быть решены задачи:

1) определения путем расчета ΔP характера зависимости получаемого эффекта от выравнивания нагрузки при вариациях различных факторов и различных сочетаний N и B ;

2) поиска конфигураций РИУС, обеспечивающих значения P не ниже 0,999 (с расчетом, чтобы эффект от выравнивания был не менее 10 % от веса младшего значащего разряда);

3) исследования эффекта от применения выравнивания нагрузки с учетом увеличения гамма-процентной наработки на отказ.

Решение названных задач в условиях, когда необходимо анализировать действия многих факторов, изменяющихся в широком диапазоне, требует применения метода, который позволил бы при сокращенном числе вычислительных опытов (по сравнению с прямым перебором всех возможных состояний) получать достоверные и точные результаты. Поэтому был предложен метод исследования вероятности безотказной работы РИУС, основанный на планировании [6] серий вычислительных экспериментов.

Первая серия опытов предназначена для подтверждения (опровержения) факта наличия эффекта (повышения надежности РИУС) от выравнивания нагрузки ПУ РИУС и выделения областей допустимых значений параметров (определение пространства эксперимента для последующих серий опытов).

Вторая серия опытов предназначена для поиска лучших конфигураций (по наименьшему числу N ПУ, обеспечивающему заданную вероятность безотказной работы P). Эту задачу можно отнести к классу задач условной оптимизации, решаемых с помощью вычислительного эксперимента, так как аналитические выражения функции эффективности и ограничений не известны.

Третья серия опытов предназначена для проверки и уточнения результатов в выделенной локальной области эксперимента и оценки эффекта от применения выравнивания нагрузки с учетом увеличения гамма-процентной наработки на отказ в условиях скользящего резервирования (резервирование замещением, при котором группа основных элементов резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой из отказавших элементов данной группы).

Пространство эксперимента в процессе исследований определялось следующими факторами: N — общее число ПУ; число ПУ с повышенной и пониженной нагрузкой $N_{\pm} = N_+ = N_-$; ΔT_{\pm} — разность температур ПУ с повышенной (T_+) и пониженной (T_-) нагрузкой по отношению к ПУ со средней нагрузкой T_p (температура ПУ при равной

нагрузке); D — нагрузка — число вычислительных операций решаемой задачи ($D_{\text{общ}}$ — суммарное число вычислительных операций решаемой задачи, D_- — нагрузка на один ПУ в группе с пониженной нагрузкой, D_p — нагрузка на один ПУ в группе со средней нагрузкой, D_+ — нагрузка на один ПУ в группе с повышенной нагрузкой); число парируемых отказов B .

3. Результаты вычислительного эксперимента

Этап 1. Определение характера зависимости получаемого эффекта от выравнивания нагрузки при вариациях факторов (первая серия опытов). В целях выявления присутствия эффекта от выравнивания нагрузки был проведен вычислительный

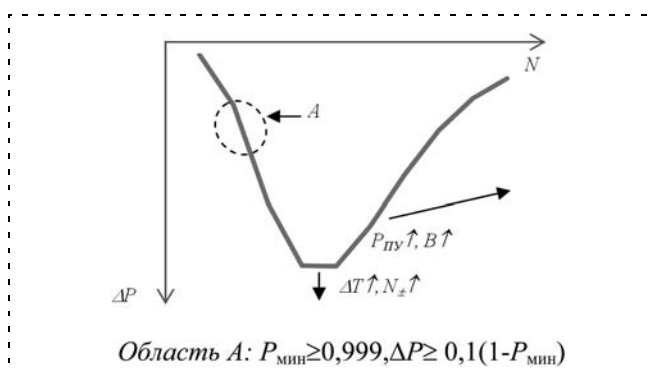


Рис. 3. Вид зависимости разности вероятностей безотказной работы РИУС с выравниванием и без выравнивания нагрузки при различном числе ПУ

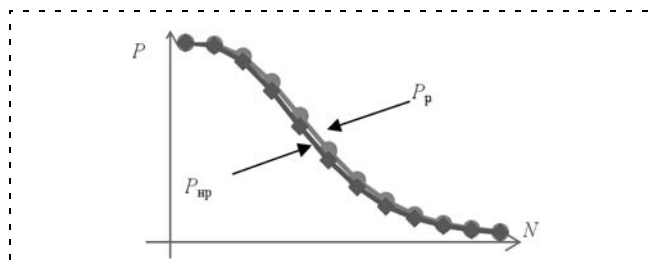


Рис. 4. Вид графиков вероятностей безотказной работы РИУС с выравниванием и без выравнивания нагрузки при различном числе ПУ

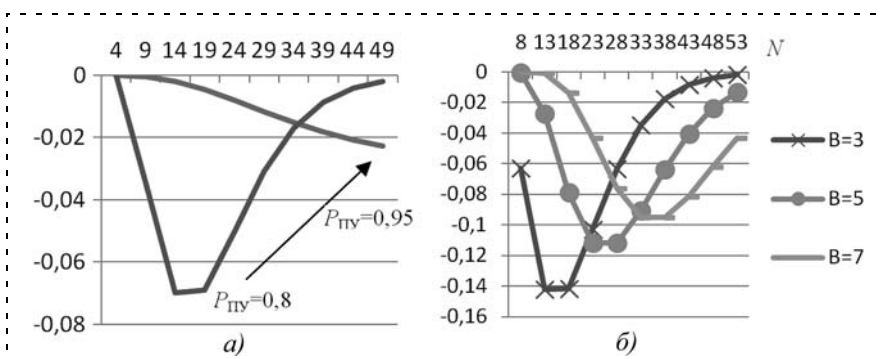


Рис. 5. Влияние $P_{\text{пу}}$ на разность вероятностей безотказной работы РИУС с выравниванием и без выравнивания нагрузки ($\Delta T_{\pm} = 15^\circ\text{C}$, $B = 3$, $N_{\pm} = 2$) (а); влияние B на разность вероятностей безотказной работы РИУС с выравниванием и без выравнивания нагрузки ($\Delta T_{\pm} = 15^\circ\text{C}$, $P_{\text{пу}} = 0,8$, $N_{\pm} = 4$) (б)

эксперимент по определению вероятности безотказной работы системы с нагрузкой и без нее по разности вероятностей ΔP .

Расчет разности вероятностей безотказной работы для РИУС проводили в широком диапазоне значений факторов: $N \in [2, 150]$; $N_{\pm} \in [2, 8]$; $\Delta T_{\pm} \in [5, 25^\circ\text{C}]$ (диапазоны значений выбирали с учетом значений, актуальных для существующих и перспективных конфигураций РИУС); $P_{\text{пу}} = 0,8; 0,9; 0,95$ (данные значения приблизительно соответствуют времени работы ПУ 1000, 10 000 и 20 000 ч при $\lambda = 0,00001$ 1/ч).

Проведенные исследования показали, что:

- в большинстве случаев равномерное распределение нагрузки позволяет повысить вероятность безотказной работы РИУС (исключение — РИУС, в которых допустимое число отказов (число парируемых отказов) B близко к N ($N = 2, B = 1$; $N = 5, B = 4$; $N = 11, B = 10$ и т. п.));
- в общем виде зависимость разности вероятностей ΔP безотказной работы для систем без выравнивания и с выравниванием нагрузки имеет вид, представленный на рис. 3;
- при увеличении ΔT_{\pm} и N_{\pm} увеличивается эффект от применения выравнивания нагрузки (рис. 3);
- максимальная разница между зависимостями $P_{\text{пу}}$ и P_p от числа ПУ в РИУС при постоянном числе парируемых отказов (рис. 4) имеет место при средних величинах N , графики "выходят" из одной точки и "сходятся" также в одной точке;
- при уменьшении вероятности безотказной работы ПУ и числа допустимых отказов максимальный эффект от выравнивания нагрузки увеличивается, при этом, чем больше $P_{\text{пу}}$ и B , тем большему N соответствует максимум разности вероятностей безотказной работы РИУС с выравниванием и без выравнивания нагрузки (см. рис. 3 и рис. 5).

Таким образом, выравнивание нагрузки можно эффективно применять в РИУС длительной эксплуатации (в которых вероятность безотказной работы с течением времени снижается), а также при использовании в составе РИУС ПУ с относительно высокой интенсивностью отказов.

Расчет вероятности безотказной работы для РИУС с выравниванием нагрузки в точках максимального эффекта показал, что в рассматриваемом диапазоне параметров значение данного параметра не превышает 0,97 (лежит в пределах 0,5...0,97, в среднем равно 0,7). Такая вероятность безотказной работы неприемлема для РИУС ответственного применения, поэтому на *втором этапе исследований* был выполнен поиск конфигураций, обеспечивающих значения P не ниже 0,999.

Этап 2. Поиск конфигураций, обеспечивающих значения $P \geq 0,999$. Поиск конфигураций происходил с таким расчетом, чтобы эффект от выравнивания был не менее 10 % от веса младшего значащего разряда (например, для вероятности безотказной работы 0,999 пороговой величиной будет значение 0,0001). Выбранное пороговое значение сопоставимо со значением приращения вероятности безотказной работы, обеспечиваемым добавлением в состав РИУС одного ПУ и увеличением на 1 числа парируемых отказов (например, при $P_{ПУ} = 0,9$ приращение составляет от 20 до 80 % веса младшего значащего разряда минимально допустимой вероятности безотказной работы). В табл. 1 приведены данные о наиболее эффективных с точки зрения разности вероятности безотказной работы конфигурациях РИУС при $P_{ПУ0} = 0,8; 0,9; 0,95, \Delta T_{\pm} = 10, 15^{\circ}\text{C}, N_{\pm} = 3$.

Следует обратить внимание на тот факт, что на графике разности вероятностей безотказной работы (см. рис. 3) участок, для которого выполняются приведенные выше ограничения, располагается в области А, т. е. при увеличении N величина ΔP будет увеличиваться. Следовательно, чтобы найти N и B , для которых эффект от использования выравнивания нагрузки будет максимальным при выполнении ограничений по безотказной работе РИУС, необходимо найти максимальное N , для

которого данные ограничения будут выполняться при заданном B (табл. 2).

Отметим, что при больших N при фиксированном B повышается эффективность использования ресурсов РИУС, так как снижается доля резерва в их общем объеме. Однако при этом вероятность безотказной работы РИУС снижается, поэтому при определенном числе ПУ вероятность P примет значение, меньшее, чем минимально допустимое. Поскольку значениям $P_{\text{мин}}$ порядка 0,999 соответствует начало "ямы" (см. рис. 3), то по мере увеличения N будет увеличиваться и ΔP . Приведенные в табл. 2 данные показывают, что эффект от выравнивания нагрузки (в плане повышения вероятности безотказной работы) сопоставим с эффектом от добавления дополнительного резервного ПУ.

Таким образом, выравнивание нагрузки можно применять для повышения эффективности использования ресурсов РИУС.

Этап 3. Оценка эффекта от применения выравнивания нагрузки с учетом увеличения гамма-процентной наработки на отказ. Во многих случаях требования к надежности РИУС задаются в виде периода работы, в течение которого вероятность безотказной работы должна быть выше некоторого минимального значения, т. е. в виде гамма-процентной наработки на отказ. Как известно, гамма-процентная наработка на отказ t_{γ} — это наработка, в течение которой отказ объекта не возникнет с заданной вероятностью, выраженной в процентах.

На основе результатов первых двух этапов исследования были выбраны следующие исходные данные для анализа гамма-процентной наработки на отказ при выравнивании нагрузки:

- $N = 7, 11, 15$ — число ПУ; $B \in [1, N - 2]$ (для B верхнее ограничение установлено равным $(N - 2)$, так как большие значения малоприменимы на практике) — число парируемых отказов; $N_{\pm} = 1, 2, 3$ — число ПУ с повышенной (N_{+}) и пониженной (N_{-}) нагрузкой по отношению к ПУ со средней нагрузкой;
- $\Delta T_{\pm} = 0, 5, 10, 15^{\circ}\text{C}$ — разность температур ПУ с повышенной и пониженной нагрузкой по отношению к ПУ со средней нагрузкой T_p ;
- $P_{\text{мин}} = 0,999; 0,9999; 0,99999$ — вероятности безотказной работы.

Таблица 1
Эффективные конфигурации РИУС

B	N									
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	#	#	#	#	#	#				
4	&	& #	& #	& #	#	#		#	#	#
5		&	&	& #	& #	& #	& #	& #	#	#
6				&	* &	* &	&	&	&	&
7					*	*	* &	&	&	&
8							*	*	*	*
9									*	*

Обозначения:
 * — $\Delta P \geq 0,1(1 - P_{\text{мин}})$ для $P_p = 0,999; 0,9999; 0,99999$
 при $P_{ПУ} = 0,8$;
 & — $\Delta P \geq 0,1(1 - P_{\text{мин}})$ для $P_p = 0,999; 0,9999; 0,99999$
 при $P_{ПУ} = 0,9$;
 # — $\Delta P \geq 0,1(1 - P_{\text{мин}})$ для $P_p = 0,999; 0,9999; 0,99999$
 при $P_{ПУ} = 0,95$.

Таблица 2

Эффект от выравнивания нагрузки РИУС

P	ΔT	$P_{ПУ}$	N_{\pm}	B	ΔP		
					10^{-4} (N = 8)	10^{-4} (N = 9)	10^{-4} (N = 10)
$\geq 0,999$	15 °C	0,9	1	4	10^{-4} (N = 8)	$1,1 \cdot 10^{-4}$ (N = 9)	
$\geq 0,999$	15 °C	0,95	1	3	$1,1 \cdot 10^{-4}$ (N = 8)	$1,9 \cdot 10^{-4}$ (N = 9)	
$\geq 0,999$	15 °C	0,8	3	7	10^{-4} (N = 11)	$3,2 \cdot 10^{-4}$ (N = 12)	
$\geq 0,999$	15 °C	0,8	3	8	$2,2 \cdot 10^{-4}$ (N = 8)	$4,8 \cdot 10^{-4}$ (N = 9)	
$\geq 0,999$	10 °C	0,9	3	5	$1,1 \cdot 10^{-4}$ (N = 11)	$2 \cdot 10^{-4}$ (N = 12)	$3,3 \cdot 10^{-4}$ (N = 13)
$\geq 0,9999$	15 °C	0,95	3	4	$1,7 \cdot 10^{-5}$ (N = 8)	$3,89 \cdot 10^{-5}$ (N = 9)	$7,4 \cdot 10^{-5}$ (N = 10)
$\geq 0,99999$	15 °C	0,95	3	6	$1,1 \cdot 10^{-6}$ (N = 13)	$2,2 \cdot 10^{-6}$ (N = 14)	$3,8 \cdot 10^{-6}$ (N = 15)

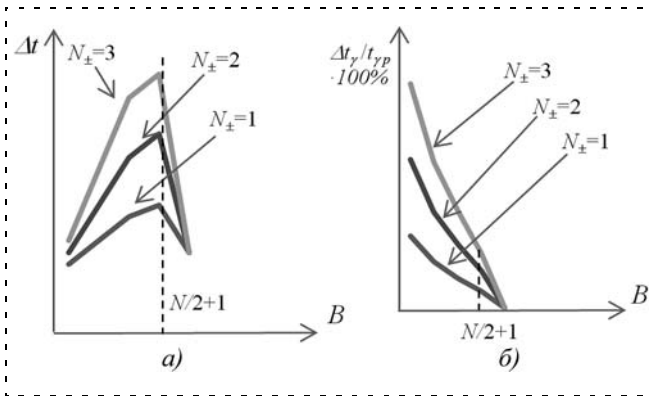


Рис. 6. Зависимость увеличения гамма-процентной наработки от числа парируемых отказов при использовании выравнивания нагрузки (а); зависимость процентного соотношения увеличения гамма-процентной наработки на отказ от числа парируемых отказов (б)

В ходе исследований были выполнены расчеты гамма-процентной наработки для всех сочетаний перечисленных выше исходных данных. Исследования показали, что:

- зависимость увеличения гамма-процентной наработки на отказ от числа парируемых отказов при использовании выравнивания нагрузки имеет вид, показанный на рис. 6, при этом максималь-

ное значение разности наработки при выравнивании и без выравнивания нагрузки достигается при $B = N/2 + 1$, т. е.

$$\Delta t_{\gamma} = t_{\gamma p} - t_{\gamma нр} \rightarrow \max \text{ при } B = N/2 + 1,$$

где $t_{\gamma p}$ — гамма-процентная наработка на отказ при реализации выравнивания нагрузки; $t_{\gamma нр}$ — гамма-процентная наработка на отказ без реализации выравнивания нагрузки;

- в процентном соотношении $((t_{\gamma p} - t_{\gamma нр})/t_{\gamma p} \times 100 \%)$ (вид зависимости от числа парируемых отказов представлен на рис. 6: эффект от применения выравнивания нагрузки в некоторых случаях достигает 10 % в точке максимального значения разности наработки, что позволяет говорить о целесообразности ее (выравнивания нагрузки) применения как альтернативы увеличению числа ПУ в РИУС, если при этом удастся достичь требуемых значений вероятности безотказной работы;

- увеличение N_{\pm} и ΔT приводит к увеличению эффекта от использования выравнивания нагрузки.

В табл. 3 приведены некоторые расчетные данные, демонстрирующие эффект от применения выравнивания нагрузки. Серым цветом выделены ячейки, в которых содержатся результаты, которые

Таблица 3

Эффект от применения выравнивания нагрузки (увеличение гамма-процентной наработки на отказ составляет не менее 5%)

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	N	N_{\pm}	Параметр	$P \geq 0,999$			$P \geq 0,9999$		
				$B = N/2 - 1$	$B = N/2$	$B = N/2 + 1$	$B = N/2 - 1$	$B = N/2$	$B = N/2 + 1$
5	7	0...3	$t_{\gamma}, \text{ч}$						
		1...3	$\Delta t_{\gamma}, \text{ч}$						
		1	$\Delta t_{\gamma}/t_{\gamma} \cdot 100, \%$	1,25	0	0,645161	1,388889	2,325581	1,075269
		2		2,5	1,265823	1,290323	2,777778	2,325581	1,075269
		3		6,25	2,531646	1,290323	2,777778	2,325581	2,150538
15	7	0...3	$t_{\gamma}, \text{ч}$						
		1...3	$\Delta t_{\gamma}, \text{ч}$						
		1	$\Delta t_{\gamma}/t_{\gamma} \cdot 100, \%$	9,375	6,329114	3,870968	9,722222	6,976744	4,301075
		2		18,75	12,65823	7,741935	18,05556	13,95349	8,602151
		3		28,125	18,98734	10,96774	25	20,93023	11,82796
5	15	0...3	$t_{\gamma}, \text{ч}$						
		1...3	$\Delta t_{\gamma}, \text{ч}$						
		1...3	$\Delta t_{\gamma}/t_{\gamma} \cdot 100, \%$						
15	15	0...3	$t_{\gamma}, \text{ч}$						
		1...3	$\Delta t_{\gamma}, \text{ч}$						
		1	$\Delta t_{\gamma}/t_{\gamma} \cdot 100, \%$	3,125	2,857143	2,597403	3,448276	3,252033	2,39521
		2		7,03125	5,714286	4,761905	8,045977	5,691057	4,790419
		3		10,15625	8,571429	6,926407	11,49425	8,943089	7,185629

могут представлять интерес при разработке РИУС (увеличение гамма-процентной наработки на отказ составляет не менее 5 %). Пустые ячейки соответствуют не эффективным результатам.

Можно привести еще один пример эффективного использования выравнивания нагрузки для снижения стоимости РИУС.

Пусть необходимо построить РИУС, обладающую вероятностью безотказной работы не ниже 0,999 с заданным временем работы 10 000 ч. Будем считать, что параметры задачи управления известны (число подзадач, их трудоемкость, информационные потоки и объемы передаваемых данных), и имеются два варианта распределения подзадач по ПУ, один из которых обеспечивает равную нагрузку ПУ, а другой предполагает работу трех ПУ с повышенной и трех ПУ с пониженной нагрузкой. При построении РИУС предполагается использовать ПУ, которые по истечении заданного времени работы будут обладать вероятностью безотказной работы 0,9.

Если провести расчеты вероятности безотказной работы для различных сочетаний N и B при равномерной и неравномерной нагрузке ПУ, то получится, что в диапазоне $N \in [6; 15]$ (по условию N не может быть меньше 6, так как имеются три ПУ с повышенной и пониженной нагрузкой, всего рассматривается 10 вариантов) допустимыми будут следующие сочетания:

- при равной нагрузке — ($N \in [6; 9]$, $B = 4$), ($N \in [10; 13]$, $B = 5$), ($N \in [14; 15]$, $B = 6$)
- при неравной нагрузке — ($N \in [6; 8]$, $B = 4$), ($N \in [9; 11]$, $B = 5$), ($N \in [12; 15]$, $B = 6$).

Иными словами, если для решения задачи управления при заданных условиях минимально необхо-

димо 5, 7 или 8 ПУ, то выравнивание нагрузки позволяет "экономить" один ПУ (если, например, $N = 9$ и $B = 4$, то минимально необходимое для решения задачи число ПУ равно 5).

Более того, если для РИУС с равной нагрузкой уменьшить $P_{ПУ}$ до 0,89, то такая система по-прежнему будет превосходить систему с неравной нагрузкой, в которой использованы ПУ с вероятностью безотказной работы 0,9, если для решения задачи необходимо 7 ПУ. При этом наработка на отказ ПУ, имеющих $P_{ПУ} = 0,89$, будет примерно на 10 % ниже (86 000 ч против 95 000 ч).

Закключение. Таким образом, распределение нагрузки ПУ в РИУС оказывает серьезное влияние на характеристики надежности. Выравнивание нагрузки во многих случаях позволяет существенно повысить данные характеристики.

Список литературы

1. **Каляев И. А., Мельник Э. В.** Децентрализованные системы компьютерного управления. Ростов-на-Дону: Изд. ЮНЦ РАН, 2011. 196 с.
2. **Строгонов А.** Долговечность интегральных схем и производственные методы ее прогнозирования. ChipNews, № 6, 2002. С. 44—49.
3. **Горлов М., Строгонов А.** Геронтология кремниевых интегральных схем. URL: <http://chipnews.gaw.ru/> (28.02.2012 г.)
4. **Мелентьев В. А.** Моделирование систем, устойчивых к отказам заданной кратности // Тр. VII Междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'08 Москва 28—31 января 2008 г. С. 1210—1223.
5. **Труханов В. М.** Новый подход к обеспечению надежности сложных систем. М.: Издательский дом "Спектр", 2010. 247 с.
6. **Горелова Г. В., Мельник Э. В.** Планирование экспериментов при исследовании новых методов и алгоритмов организации распределенных вычислений // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. № 10. С. 49—56.

УДК 004.087.2, УДК 004.332.3

Ю. А. Гагарин, инженер,
yuriyikosmonavt@mail.ru,
ФГУП МОКБ "Марс", Москва

Методы повышения отказоустойчивости элементов памяти вычислительных и управляющих систем

Рассмотрены основные факторы, влияющие на сохранность данных, а следовательно, и на надежность всей системы в целом. Представлены основные типы ошибок, встречающихся при хранении данных в памяти, и способы борьбы с ними. Предложен метод разработки памяти повышенной отказоустойчивости.

Ключевые слова: отказоустойчивое ОЗУ, контроллер кода Хэмминга, кэш-память, дополнительный контроллер памяти, диагностическая кэш-память

Введение

Все современные вычислительные и управляющие системы включают в свой состав элементы памяти для хранения различного рода информации — промежуточных результатов операций вычисления, данных, принимаемых от различного рода датчиков, больших массивов данных, в том числе исполнительных программ. Наиболее уязвимым местом вычислительных и управляющих систем являются элементы памяти, так как именно на них приходится основная доля сбоев и отказов. Таким образом, отказоустойчивость вычислительных и управляющих систем в большей мере зависит от безотказности элементов памяти. В частности, положение становится особенно сложным для систем, вынужденных работать в условиях повышенных ионизирующих и радиационных излучений, т. е. в условиях открытого космоса.

По различным оценкам в космосе на различных орбитах интенсивность сбоев может достигать 2000 раз в неделю. Высокая интенсивность сбоев приводит к появлению двойных сбоев в одном слове памяти или к появлению устойчивых ошибок, т. е. к отказу элемента памяти и, в результате, к отказу системы в целом.

Повышение надежности элементов памяти систем и устройств, работающих в агрессивных средах, осуществляется с помощью различного рода методов.

Методы повышения надежности хранения данных в элементах памяти

При проектировании современных вычислительных и управляющих систем для решения проблем надежности хранения данных в электронных запоминающих устройствах используются пассивные и активные методы защиты элементов памяти от сбоев и отказов.

♦ Пассивный метод защиты элементов памяти от сбоев и отказов

В качестве примера пассивного метода защиты можно привести мажоритарную систему памяти, состоящую из четырех одинаковых по объему областей памяти. При использовании этой системы памяти для записи или считывания данных обращение происходит одновременно ко всем четырем областям памяти. Если тяжелым зарядом была выбита одна из ячеек какой-либо области памяти, то данные будут считываться из одноименных ячеек памяти, расположенных в других трех областях. Поскольку области памяти располагаются на значительном расстоянии друг от друга, да и сами ячейки в областях располагаются друг от друга на расстоянии, превышающем размеры возможных повреждений от тяжелых частиц, вероятность одновременного выхода из строя одноименных ячеек памяти очень мала. Этот метод защиты данных использует французская фирма Atmel при разработке элементов памяти [1].

♦ Активные методы защиты элементов памяти от сбоев и отказов

В современных активных методах защиты данных в ОЗУ преимущественно используют контроллеры кода Хэмминга (EDAC) и многоуровневое кэширование активно используемой информации из ОЗУ. Подобные подходы реализованы, в частности, в серверах серии r690 фирмы IBM [2].

IBM eServer pSeries* r690 представляет собой сервер высокопроизводительной вычислительной системы, построенной на базе микропроцессора POWER4. Структурная схема микропроцессора показана на рис. 1.

В сервере высокая отказоустойчивость памяти достигается за счет хранения результатов текущих вычислений в кэш-памяти трех уровней (помимо ОЗУ), при этом кэш команд и кэш данных внутри

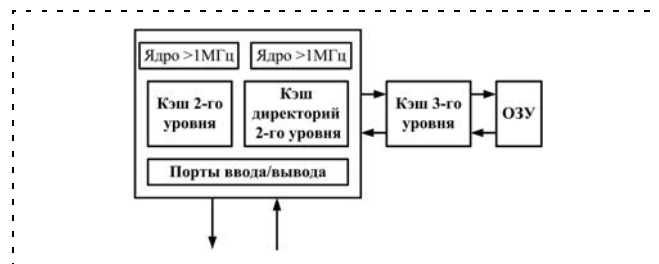


Рис. 1. Структурная схема микропроцессора POWER4

чипа защищены битами паритета, а кэш межмодульной связи и кэш директорий связи с ОЗУ и само ОЗУ защищены кодом Хэмминга.

Использование кэш-памяти трех уровней предполагает, что наиболее часто используемые данные будут храниться не только в основной памяти, но и в кэш-памяти всех трех уровней. При обращении процессора к памяти за данными он сначала обращается к кэш-памяти 1-го уровня. Если необходимых данных там нет, то процессор обращается за ними к кэш-памяти 2-го уровня. Если же процессор и здесь не находит необходимые данные, то далее он обращается к кэш-памяти 3-го уровня. При отрицательном результате процессор непосредственно обращается к основной памяти. Если данные были обнаружены в кэш-памяти одного из трех уровней или в основной памяти, то одновременно с их обработкой процессором эти данные будут перезаписаны в кэш-память оставшихся уровней и в основную память.

В POWER4 для корректировки ошибок используется код Хэмминга с возможностью исправления одиночной ошибки и обнаружения двойной ошибки в кэш-памяти 1-, 2- и 3-го уровней. На рис. 2 показан механизм поиска и устранения неисправности.

Об ошибках, возникающих в системе, сообщают прерывания от аппаратного контроля. Для того чтобы обеспечить восстановление ошибок, аппаратный контроль работает в соответствии с заданным программным кодом. Когда возникает прерывание, программно-аппаратные средства системы сохраняют состояние процессора и проверяют его регистры, чтобы определить статус ошибки и возможность восстановления работоспособности системы.

Если ошибка восстановима, то программно-аппаратные средства системы устраняют ошибку и увеличивают счетчик ошибок. Если число ошибок кэш-памяти 1-го и 2-го уровней больше, чем предопределенный порог, который является признаком жесткой ошибки, то программно-аппаратные средства системы отключают отказавшую область кэш-памяти. После этого программно-аппаратные средства системы восстанавливают состояние процессора. Операционная система проверяет восстановленное состояние системы от программно-аппаратных средств и возобновляет ее работу. При отключении кэш-памяти 1-го уровня данные загружаются из кэш-памяти 2-го уровня.

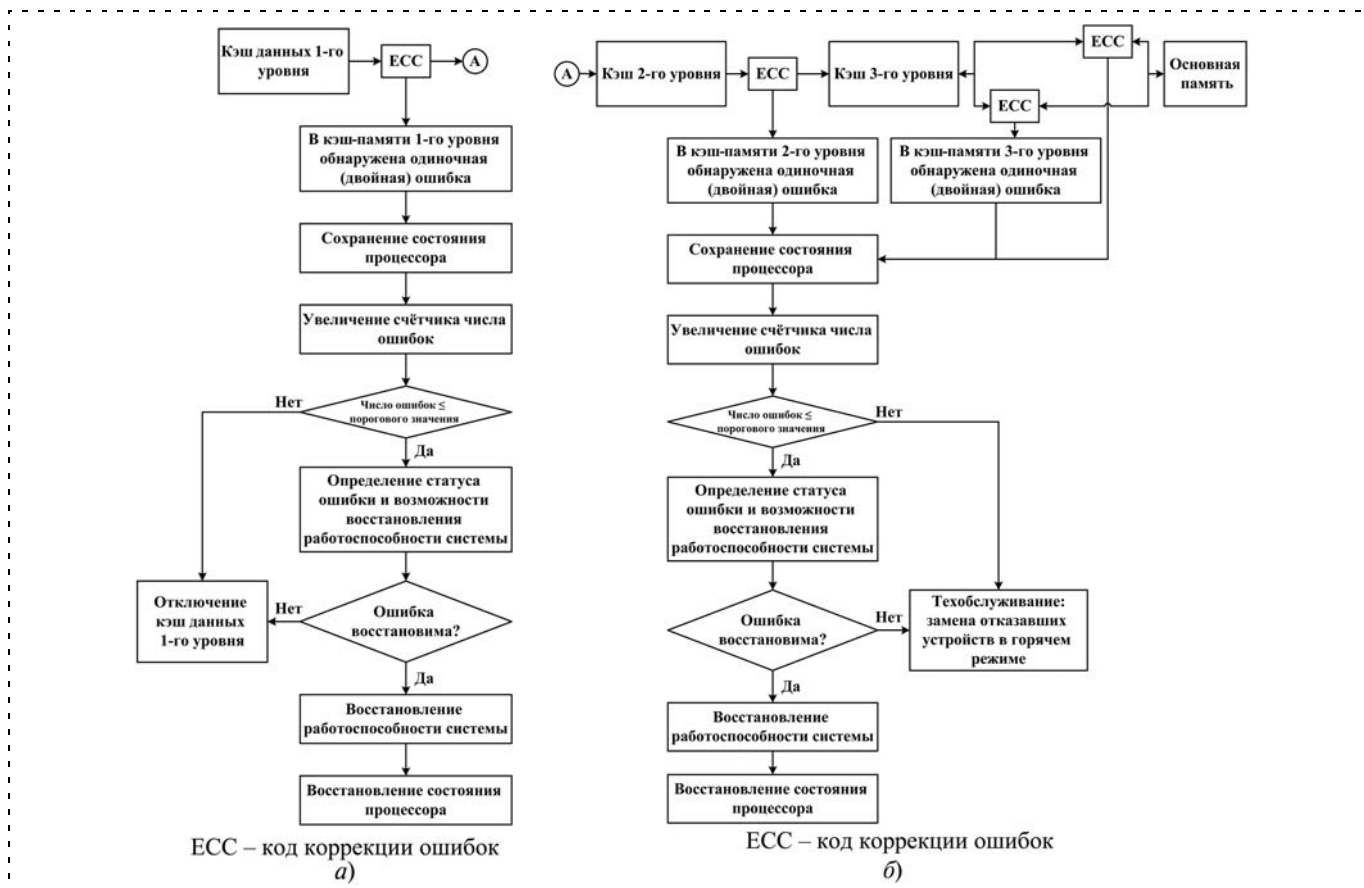


Рис. 2. Механизм поиска и устранения неисправности:
а, б – ветви алгоритма

Для обеспечения работоспособности системы возможна замена центрального процессора или удаление кэш-памяти 3-го уровня в режиме реального времени. Кэш-память 1-го и 2-го уровней и их директории имеют резервные биты в своих массивах, доступ к которым можно получить через программно-управляемую логику, чтобы заменить поврежденные биты в соответствующих массивах. Аналогичное управление резервными битами возможно и в основной памяти системы. Избыточность кэш-памяти 3-го уровня осуществлена на уровне детализации кэш-строк. В редком случае, когда число отказов кэш-памяти 3-го уровня превышает заданный порог, кэш-память продолжает работать, но сообщение о предстоящем ремонте сформировано. Если система POWER4 перезагружена без ремонта, кэш-память 3-го уровня отключается и система работает без нее.

Ключевой особенностью системы р690 является:

- 1) обнаружение ошибок в режиме реального времени;
- 2) захват информации о состоянии системы во время обнаружения ошибки;
- 3) изолирование отказавших элементов памяти посредством анализа данных, захваченных во время обнаружения ошибки.

Из этого описания видно, что в системе р690 восстановление искаженной информации проис-

ходит на информационном уровне (за исключением ограниченных процедур введения резервных разрядов). Физически отказавшие ячейки остаются вовлеченными в работу системы, увеличивая тем самым риск появления кратных отказов, которые с трудом поддаются парированию.

Концептуальные основы метода повышения отказоустойчивости элементов памяти

В данной статье рассматривается новый метод [3] повышения отказоустойчивости ОЗУ бортовой центральной вычислительной машины, который основан на введении диагностической кэш-памяти небольшого объема и дополнительного контроллера памяти.

Отличительной особенностью разрабатываемого метода является повышение степени отказоустойчивости ОЗУ систем управления реального времени по отношению к одиночным, двойным и тройным устойчивым отказам и большинству комбинированных сбояв и отказов. В целом предлагаемый метод позволит парировать до нескольких сотен отказавших ячеек памяти с подобным типом отказов. Структурная схема устройства, в котором используется разрабатываемый метод, показана на рис. 3.

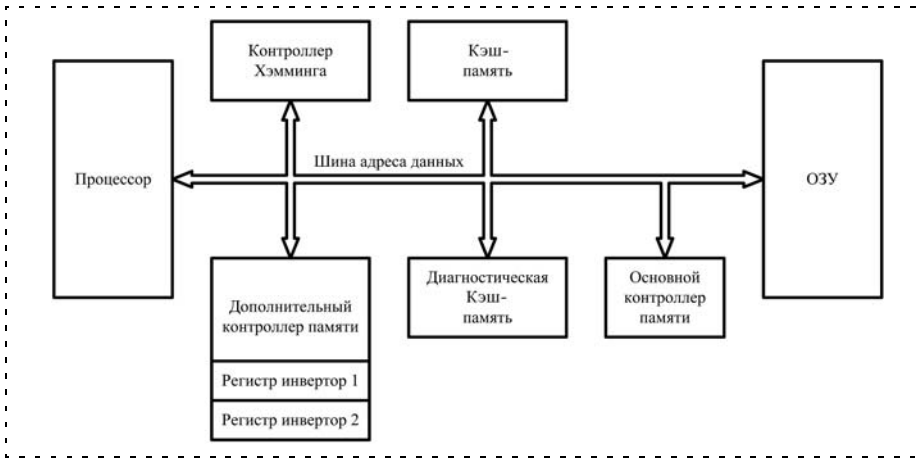


Рис. 3. Структурная схема

Одним из центральных моментов разрабатываемого метода является использование кэш-памяти для целей диагностики и восстановления корректной информации на физическом уровне в отличие от традиционного использования кэш-памяти. Если в ЭВМ эффективно использование кэш-памяти проявляется в значительном сокращении времени на операции чтения/записи по сравнению с обращением к основной памяти, то в рассматриваемом методе обращение к диагностической кэш-памяти будет осуществляться только в случае запроса к отказавшей ячейке памяти, т. е. достаточно редко. При повторном и последующих обращениях рабочей программы по адресу этой ошибочной ячейки в ОЗУ она будет считываться на шину памяти не из ОЗУ,

а из кэш-памяти, не внося заметных задержек в работу системы. Главное преимущество введения диагностической кэш-памяти для хранения восстановленной информации перед многочисленными другими способами введения резервной памяти — это применение механизма отображения очень большого адресного пространства основного ОЗУ на сравнительно небольшое адресное пространство диагностической кэш-памяти. Поиск и исправление ошибок в данных, хранящихся в основном ОЗУ, будет осуществляться контроллером кода Хэминга совместно с новым дополнительным контроллером памяти. Дуэт контроллеров способен обнаруживать и исправлять одиночные, двойные и тройные отказы и сбои, а также их комбинации, за исключением случаев наличия в слове двух или трех сбоев одновременно. В качестве контроллера кода Хэминга могут быть использованы EDAC-контроллеры. Они способны обнаруживать появление одиночной и двойной ошибок при хранении или считывании и корректировать одиночную ошибку.

Алгоритмизация работы внутренних узлов устройства памяти

Алгоритм совместной работы контроллеров кода Хэминга и дополнительного контроллера памяти показан на рис. 4, а алгоритм работы устройства памяти показан на рис. 5.

К данным, загружаемым в основное ОЗУ, контроллер кода Хэминга добавляет контрольные избыточные биты. Таким образом, запоминающее устройство изначально загружено данными — информационными и контрольными разрядами. При считывании данных по заданному адресу из ячейки памяти они поступают в контроллер кода Хэминга, а сам адрес ячейки памяти записывается в регистр адреса памяти. В контроллере происходит анализ того, содержат ли данные ошибочные значения или нет.

В это время в дополнительном контроллере памяти анализируется адрес данных, чтобы определить, обращение происходит к истинным данным или ранее откорректированным. Если дан-

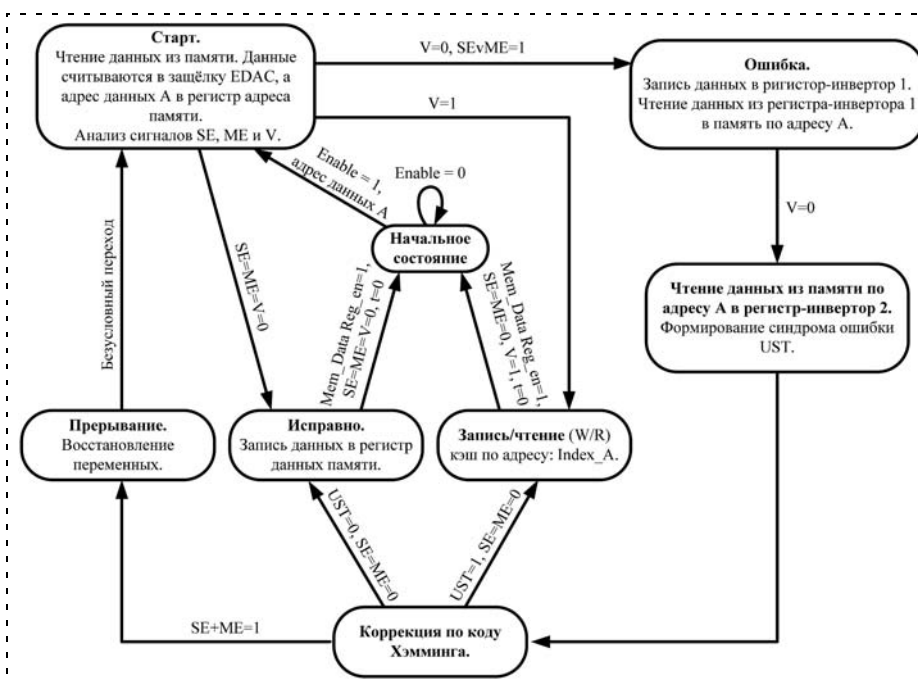


Рис. 4. Алгоритм совместной работы контроллера Хэминга и контроллера памяти: SE — одиночная ошибка (0 — ошибки нет, 1 — ошибка есть); ME — многократная ошибка (0 — ошибки нет, 1 — ошибка есть); V — признак корректности слова (0 — слово корректно, 1 — слово некорректно); Mem_Data Reg_en — выдача данных на шину (0 — запрещена, 1 — разрешена)

ные не содержат ошибок, и они не были ранее откорректированы, то они перезаписываются в регистр данных памяти и выдаются абоненту. Абонентом является любое устройство, которому предназначены эти данные. Далее из памяти считывается следующее слово.

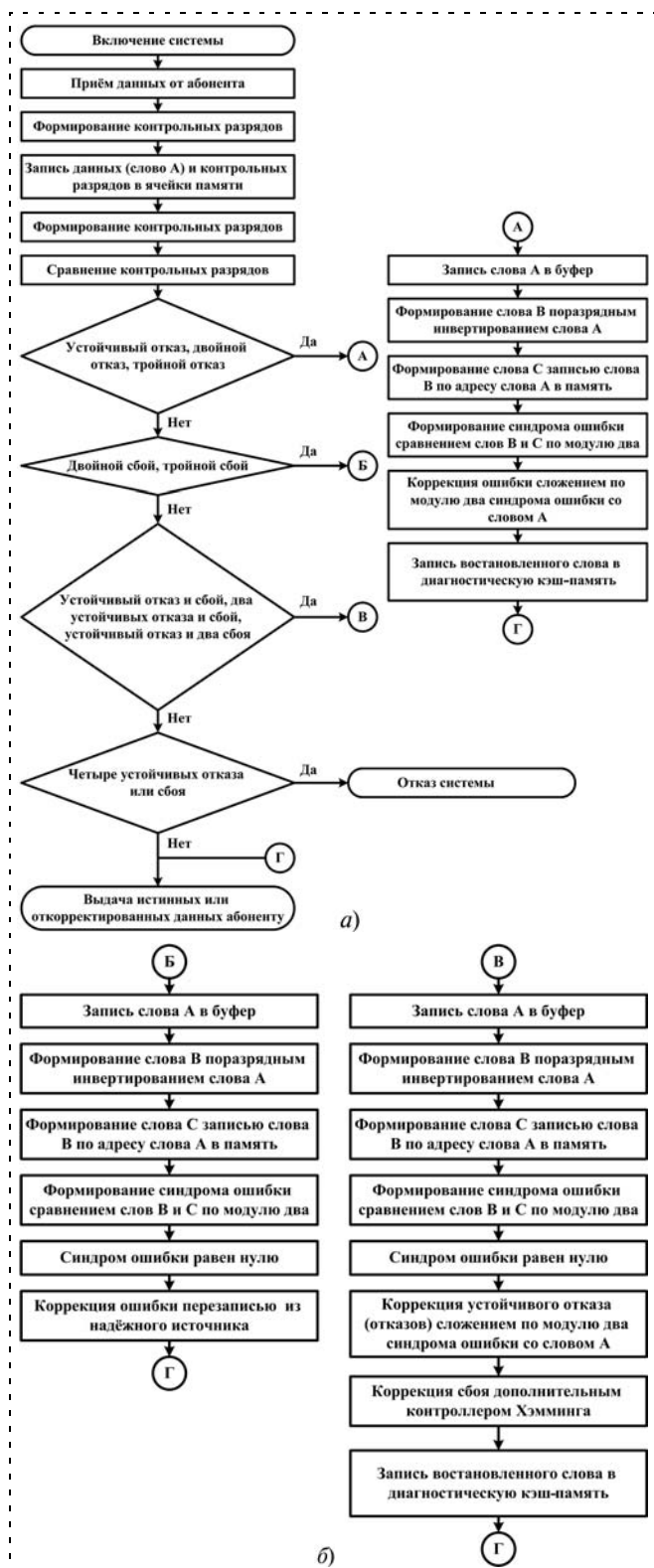


Рис. 5. Алгоритм работы устройства памяти:
а, б — ветви алгоритма

Если дополнительным контроллером памяти обнаружено, что обращение происходит по адресу ранее откорректированных данных, то они будут считываться из диагностической кэш-памяти по этому же адресу в соответствии с правилами обращения к кэш-памяти, т. е. по индексу запрашиваемого адреса.

Если контроллером кода Хэмминга обнаружены ошибки в данных, хранимых в основной памяти, то запускается процедура определения того, произошел сбой, устойчивый отказ или их комбинация. Если процедура определила, что имеет место устойчивый отказ или кратная ошибка, то контроллер кода Хэмминга формирует сигнал, по которому в процесс корректировки ошибок вступает новый контроллер памяти. При этом достигается незначительная задержка на три-четыре цикла обращения к основной памяти при первом обнаружении контроллером кода Хэмминга отказавшей ячейки памяти.

Под управлением дополнительного контроллера памяти запускается процесс корректировки ошибок в соответствии со следующим алгоритмом. Первоначально данные из памяти записываются в регистр-инвертор 1, где происходит их инверсия. Далее проинвертированные данные по тому же адресу, по которому они были считаны ранее, записываются обратно в память. Затем по этому же адресу данные из памяти считываются в регистр-инвертор 2. Формируется синдром ошибки путем сравнения двух считанных значений регистров: значения на регистре 1 и значения, считанного из памяти на регистр 2. Коррекция ошибочных данных происходит путем сложения по модулю два синдрома ошибки и неинвертированного значения регистра-инвертора 1.

Двойные отказы устойчивого типа и смешанные отказы типа одного сбоя и одного отказа восстанавливаются более сложным двухстадийным алгоритмом. Это происходит, когда одна ошибка активно проявляется, а вторая не проявляется, так как совпадает в момент срабатывания контроля с правильным значением в этом разряде. Однако в самом важном случае двойного отказа, когда оба отказа активно проявляются, они корректно восстанавливаются приведенным выше алгоритмом.

Если произошел не устойчивый отказ, а сбой, то согласно алгоритму синдром окажется нулевым, т. е. не укажет номер сбойного разряда, но засвидетельствует тот факт, что устойчивого отказа нет. Поэтому, если структура зафиксированного двойного отказа — это двойной сбой, то восстановить слово не представляется возможным иначе, как через перезапись из корректного источника. Алгоритм, не найдя устойчивых отказов в слове, укажет на необходимость перезаписи из надежного источника.

Если двойной отказ, замеченный контроллером кода Хэмминга, имеет структуру из одного устойчивого отказа и одного сбоя, то согласно изложенному алгоритму будет изменено на правильное

значение в разряде устойчивого отказа, а сбойный разряд алгоритмом будет не замечен. В результате слово окажется с одной ошибкой в этом бите, но этот факт будет замечен, и слово будет правильно восстановлено уже контроллером кода Хэмминга и под управлением контроллера памяти записано в диагностическую кэш-память, поскольку туда переписываются все слова с устойчивыми отказами.

Если при двойном отказе один из них активно проявляется, а другой является скрытым, то согласно алгоритму будут исправлены значения в обоих разрядах, причем в одном (активном) правильно, а в скрытом отказе — неправильно. Однако, хотя кратность отказа не изменится (проявление отказа станет одиночным), но уже контроллер кода Хэмминга исправит оставшийся одиночный отказ, и корректное слово будет переписано в диагностическую кэш-память.

Подобное двухстадийное восстановление корректного значения с помощью контроллера памяти возможно и в более сложных случаях трехкратных отказов (когда схемы контроля вырабатывают сразу два синдрома наличия одиночной и кратной ошибки $SE = ME = 1$), которые раньше не поддавались восстановлению. Если в тройном отказе все отказы — устойчивые и активно проявляющиеся, то информация восстанавливается правильно и также переписывается в кэш-память. Если в тройном отказе два отказа устойчивых и активно проявляющиеся, а один — сбой, то информация восстанавливается контроллером памяти правильно и также переписывается в кэш-память. В более сложном случае тройного отказа, когда один отказ активно проявляется, а два других — скрытые, срабатывает одностадийное восстановление: контроллер памяти разрешает контроллеру кода Хэмминга исправить значение активного ошибочного разряда и записать корректное слово в кэш-память. Однако при числе сбойных разрядов более одного восстановление контроллером кода Хэмминга невозможно, в этом аварийном случае необходима перепись правильного значения из корректного источника.

Если в данных была обнаружена четырехкратная ошибка, то контроллер формирует сигнал либо о прекращении работы вычислительной системы без резервирования, либо сигнал об отключении одного из каналов резервирования, если речь идет о многократно резервированной вычислительной системе.

Заключение

Анализируя вышеперечисленные методы повышения отказоустойчивости систем, работающих в экстремальных условиях, за счет повышения надежности сохранности данных в элементах памяти, можно выделить их достоинства и недостатки.

Достоинством метода, используемого в *элементах памяти фирмы Atmel*, являются: отсутствие слож-

ного аппаратно-программного обеспечения для обнаружения и коррекции ошибок, относительно небольшое время доступа к ячейкам памяти и достаточно большой ресурс для наработки на отказ.

К недостаткам метода, реализованного в *элементах памяти фирмы Atmel*, можно отнести чрезмерно высокую стоимость, большие габаритные размеры и небольшой объем памяти.

Достоинством методов, реализованных в *машине IBM eServer pSeries* p690*, является возможность замены отказавших элементов памяти в горячем режиме, т. е. во время функционирования устройства.

Недостаток методов, используемых в *машине IBM eServer pSeries* p690*, — это невозможность восстановления физически отказавших ячеек кэш-памяти и ОЗУ без вмешательства обслуживающего персонала, что из-за роста со временем кратности ошибки ведет к деградации памяти отключением отказавших разделов, к отказу устройства или ошибочной коррекции. При этом основной негативный вклад в снижение надежности памяти вносят двойные и тройные устойчивые отказы. Для борьбы с двойными сбоями используются известные системные требования: профилактическая очистка памяти от одиночных сбоев с помощью контроллеров-чистильщиков, постоянно или периодически собирающих мусор в виде слов с одиночной ошибкой типа сбоя в ОЗУ для восстановления правильного значения и записи его на прежнее место в памяти; введение программных точек возврата и перезагрузок из более высокого уровня памяти вплоть до постоянного запоминающего устройства команд и сохраненных критических данных.

Достоинствами разрабатываемого метода, который будет реализован в *запоминающем устройстве с высокой степенью отказоустойчивости*, станут: возможность обнаружения одиночных, двойных и тройных устойчивых отказов и большинства комбинированных сбоев и отказов; коррекция одиночных, двойных отказов и сбоев, а также их комбинации; достаточно большой ресурс наработки устройства на отказ.

Основным недостатком разрабатываемого метода предполагается незначительное снижение быстродействия системы, в которую будет установлено *запоминающее устройство с высокой степенью отказоустойчивости*.

Список литературы

1. Atmel Corporation. Rad Hard 16 MegaBit 3.3V 5V Tolerant SRAM Multi-Chip Module AT68166FT. URL: www.atmel.com/literature
2. Bossen D. C., Kitamorn A., Reick K. F., Floyd M. S. Fault-tolerant design of the IBM pSeries 690 system using POWER4 processor technology // IBM Journal Res. & Dev. 2002. V. 46. N 1. P. 77—86.
3. Оперативное запоминающее устройство с высокой степенью отказоустойчивости. 2327236 С2, Россия, 2005141193/09 29.12.05, 26.06.2008, № 17.

Ву Дык Лунг, канд. техн. наук,
декан факультета вычислительной техники,
Университет информационных технологий
Вьетнамского национального университета,
Хо Ши Мин, Вьетнам,

П. И. Падерно, д-р техн. наук, проф.,
pipaderno@list.ru

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина)

Ф. Э. Сатторов, канд. техн. наук,
Председатель РОО "МОСТ", Душанбе, Таджикистан

Человеческий фактор в корпоративных сетях

Часть 2. Управление*

Описано решение задачи оценки загруженности персонала в корпоративной сети (КС). Разработан подход, позволяющий системному администратору обоснованно подойти к вопросу распределения полномочий между операторами (пользователями) КС и опирающийся на оценку успешности их самостоятельной деятельности в КС и владение информационными технологиями.

Ключевые слова: системный администратор, оператор, корпоративная сеть, загруженность, распределение полномочий

Введение

При эксплуатации корпоративных сетей (КС) необходимо обращать внимание на загруженность персонала, так как его перегрузка может привести к значительному ухудшению качества деятельности и, следовательно, к снижению эффективности работы КС. Ввиду того, что большая часть ошибок в работе КС связана с недостаточной квалификацией операторов, рассмотрена задача распределения полномочий и прав доступа операторов к информационно-программным ресурсам, обоснованное решение которой позволяет значительно снизить нагрузку на системного администратора, уменьшить число ошибок персонала и повысить эффективность работы КС в целом.

1. Загруженность персонала в корпоративных сетях

1.1. Оценка загруженности операторов

Пусть для построенной КС все задачи имеют одинаковые приоритеты, и для каждого из операторов A_i известны:

- набор (перечень) решаемых задач, число задач k_i для i -го оператора;

* Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" № 10, 2012 г.

- $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{ik_i}$ — интенсивности поступления каждой из этих задач (предполагается, что задачи поступают независимо друг от друга);
- $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ik_i}$ — среднее время решения оператором A_i каждой из поступающих задач, которое зависит от квалификации конкретного оператора, его личностных особенностей и предпочтений, информационно-программно-технического обеспечения и других причин.

Вычислим среднее время решения задачи оператором A_i :

$$\bar{t}_i = \left(\sum_{j=1}^{k_i} \lambda_{ij} t_{ij} \right) / \left(\sum_{j=1}^{k_i} \lambda_{ij} \right)$$

и введем в рассмотрение среднюю интенсивность решения задачи $\mu_i = 1/\bar{t}_i$.

Обозначая λ_i общую интенсивность поступления задач для оператора A_i и имея в виду тот факт, что

$\lambda_i = \sum_{j=1}^{k_i} \lambda_{ij}$, можно вычислить средний коэффициент загрузки оператора A_i по следующей формуле:

$$\rho_i = \lambda_i / \mu_i = \sum_{j=1}^{k_i} \lambda_{ij} t_{ij}$$

Если $\rho_i \geq 1$, то это означает, что очередь задач к данному оператору будет бесконечно расти, и такое распределение задач по операторам (по крайней мере, по данному конкретному оператору) неразумно.

Если $\rho_i \geq 0,7$, то это означает [1, 2, 5], что данный оператор перегружен, быстро устанет и подобное распределение задач нецелесообразно.

Если $\rho_i \leq 0,3$, то это означает, что данный оператор недогружен, и такое распределение задач по операторам также эргономически нецелесообразно.

Известно [1, 2, 5], что наилучшая работа оператора обеспечивается при нахождении коэффициента загруженности в интервале $0,3 \leq \rho_i \leq 0,7$.

1.2. Принцип распределения задач между операторами

Если все задачи имеют одинаковую важность (равные приоритеты), а работа (загруженность) всех операторов является достаточно прозрачной, то для обеспечения нормального психологического климата в коллективе, взаимодействующем с КС, целесообразно при распределении задач по операторам придерживаться следующего принципа: *степень загруженности всех операторов КС, вне зависимости от их квалификации, должна быть одинакова* [2–4].

Если ряд задач имеет приоритет первого уровня в обслуживании, т. е. при имеющейся решаемой задаче и очереди беспriorитетных задач к данному конкретному оператору задача, имеющая приоритет первого уровня, выполняется сразу после окончания решения имеющейся задачи, то при одинаковом распределении задач, имеющих первый приоритет в обслуживании, по всем операторам выполнение предложенного выше принципа является весьма

целесообразным. Для данного случая можно предложить (если задачи с приоритетом первого уровня поступают достаточно часто) такую организацию работ в КС, при которой некоторые конкретные операторы будут решать только эти задачи. При такой организации работ в КС выполнение предложенного принципа для обеспечения нормального психологического климата тем более *целесообразно*.

Если в КС бывают задачи, имеющие второй приоритет в обслуживании, т. е. требующие прекращения решения задачи и обслуживания (решения) вне всякой очереди, то у большинства операторов могут возникать психологические проблемы, связанные с прекращением решения незавершенной задачи и вызывающие психологическое отторжение (неприятие) при решении высокоприоритетных задач. В этом случае целесообразно организовать работу с высокоприоритетными задачами *только для специально выделенных конкретных операторов*. При такой организации работ в КС выполнение предложенного принципа для обеспечения нормального психологического климата тем более *целесообразно*, чтобы выделенные операторы не являлись "любимчиками" в глазах остального коллектива.

В случае, если операторы (оператор), занимающиеся обслуживанием приоритетных задач, имеют меньший коэффициент загрузки, то их целесообразно подключать и к решению обычных задач или другой работе для *выравнивания* коэффициента загрузки.

Необходимо заметить, что сформулированный принцип должен выполняться для операторов *любой квалификации*, а *оплата их труда* должна зависеть только от их *квалификации и сложности решаемых задач*.

1.3. Оценка времени пребывания задачи в корпоративной сети

Ориентировочную оценку времени пребывания задачи в системе рассмотрим сначала на примере некоторого конкретного оператора A_i , средний коэффициент загрузки которого равен $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$.

При получении ориентировочной оценки будем предполагать все задачи одинаковыми с интенсивностью поступления λ_i и интенсивностью обслуживания μ_i , а самого оператора A_i будем рассматривать как одноканальную систему массового обслуживания. Из теории массового обслуживания известно, что вероятности того, что в такой системе находится ровно k задач, имеют следующий вид: $p_k = (1 - \rho)\rho^k$. Для конкретного оператора A_i эти вероятности приобретают вид

$$p_{ik} = (1 - \rho_i)\rho_i^k.$$

Таким образом, имеем следующий набор характеристик:

- среднее число требований в такой системе $\bar{k} = \frac{\rho_i}{1 - \rho_i}$;

- средняя длина очереди $\bar{k}_0 = \frac{\rho_i^2}{1 - \rho_i}$;
- среднее время решения некоторой задачи (одним оператором) в КС с учетом ожидания в очереди ($t_{ож}$)

$$t_{обсл} = t_{ож} + \frac{1}{\mu_i} = \frac{\bar{k}}{\mu_i} + \frac{1}{\mu_i} = \frac{1}{(1 - \rho_i)\mu_i}.$$

Необходимо заметить, что значения $t_{обсл}$ и $t_{ож}$ в *значительной степени* зависят от алгоритмов решения конкретных задач, поступающих к оператору, а также от квалификации самого оператора.

На современном этапе развития информационных технологий время, необходимое для проведения расчетных операций и/или передачи информации внутри КС, не превосходит 10 % от времени, необходимого оператору для ввода данных или принятия решений.

Ввиду достаточно высокого быстродействия современных средств вычислительной техники, а также использования достаточно развитого программного обеспечения время решения каждой конкретной задачи непосредственно в КС зависит в основном от возможного зависания сети, которое, в большинстве случаев, связано с непреднамеренными ошибками пользователей, имеющих неоправданно высокий доступ к сетевым ресурсам [3, 4]. В пакетных сетях к трафику не предъявляются какие-либо жесткие требования, и сеть просто передает столько данных пользователя, сколько может и как может. Соответственно, "поведение" трафика в этой сети становится неконтролируемым, что приводит к нежелательным последствиям, таким как перегрузки и потери данных, а в худшем случае — к зависанию сети.

Из вышесказанного следует, что для оценки времени решения конкретных задач необходимо учитывать как работу оператора, так способы передачи и обработки информации внутри КС, а также условия доступа пользователей к различным сетевым ресурсам.

2. Управление возможностями пользователей

Кроме системного администратора (СА) на производительность КС очень сильно влияют конечные пользователи. Под СА может подразумеваться группа, обеспечивающая нормальное функционирование КС. Решение задачи распределения функциональных возможностей пользователей обусловлено необходимостью снижения числа лишних (немотивированных) обращений к СА. Необходимо заметить, что такие обращения вызваны в основном как мелкими ошибками пользователей, к решению которых они привлекают СА, так и стремлением пользователей получить доступ к программно-техническим ресурсам КС, с которыми они не умеют работать.

Далее описан подход, который позволяет в зависимости от уровня подготовки пользователей ограничивать их права, переводя пользователей из одной привилегированной группы в другую менее привилегированную или наоборот. Разработанный подход позволяет СА (группе СА) четко распределять пользователей по группам и определять уровень подготовки каждого из них.

Всех пользователей предлагается разбить на три основные группы: пользователи красного уровня, желтого уровня и зеленого уровня.

В группу пользователей *красного уровня* входят специалисты, имеющие ограниченные знания в области автоматизированной обработки информации. Умения пользователей данной категории ограничиваются включением и выключением компьютера, созданием текстового документа и его распечаткой, а также работой с почтой и др. Пользователи красного уровня могут быть источниками риска для КС, поэтому права данной категории пользователей должны быть ограничены СА до минимальных возможностей.

В группу пользователей *желтого уровня* входят специалисты, знающие основы системы обработки информации. Список знаний и умений данной категории пользователей значительно шире, чем у пользователей красного уровня. Помимо создания и редактирования документов пользователи желтого уровня могут подключать внешние устройства к компьютеру и менять необходимые компоненты системы. Пользователи желтого уровня менее подвержены риску, чем пользователи красного уровня, соответственно, данная категория пользователей может быть включена в группы уверенных пользователей с ограниченными правами.

Пользователи *зеленого уровня* входят в группу опытных пользователей, которые могут самостоятельно выявить неполадки в КС, поменять компоненты, менять пароль при входе в систему. Данная категория пользователей имеет возможность, при необходимости, менять параметры настройки КС и ПК, переустанавливать программные приложения, в том числе сетевые. Для пользователей зеленого уровня устанавливаются особые параметры доступа к информационно-программным ресурсам, включив данную категорию пользователей в группу администраторов для автономной работы, лишь ограничив их права на верхнем уровне, чтобы у них не было возможностей совершить несанкционированное проникновение в уязвимые места КС, в чужие БД и др.

Процесс распределения функциональных возможностей пользователей осуществляется СА на основе следующих установленных правил.

По умолчанию, каждый пользователь имеет ограниченные права. В данном случае пользователь не может поменять дату и время системы, не может поменять пароль, установить драйверы для нового оборудования, а также установить какие-либо другие приложения. Исходя из существующих правил СА принимает решение о повышении статуса поль-

зователей. Повышение уровня пользователя подтверждает его знания в области обработки информации. Пользователи желтого и зеленого уровней доставляют значительно меньше хлопот СА, которому приходится отвлекаться от важных дел даже ради того, чтобы поменять дату и время системы на рабочем месте пользователя, имеющего ограниченные права.

Предложенные правила взаимодействия пользователей и СА действуют на основании уже существующей базы, куда заранее вносятся сведения о пользователях и их принадлежности к уровням на момент заявки.

Уровни пользователей определяются тремя основными факторами:

- числом обращений за некоторый промежуток времени;
- сложностью заявок пользователя;
- повторением ошибок.

Число обращений за промежуток времени — это число одинаковых заявок за определенное время. Очевидно, что пользователь, однажды столкнувшись с проблемой, после ее устранения СА при повторном возникновении той же ошибки уже может достаточно точно изложить причину неисправностей СА о причине возникшей проблемы и этим помочь СА сократить потери времени для решения данной задачи. В этом случае, если пользователь обращается к СА больше допустимого в этих случаях, но при этом понимает, что происходит, и не имеет прав для устранения возникшей неисправности, то он со временем может быть перенесен на следующий уровень. Если пользователь не представляет, в чем именно дело, то он сохраняет свою позицию или если пользователь не понимает причину неисправности, но имеет права для ее решения, то соответственно установленным СА правилам он может быть переведен на предыдущий уровень.

Под *сложностью заявки* подразумевается уровень сложности запроса оператора к СА — насколько влияет несвоевременное выполнение данной заявки СА на работу АРМ оператора, и возникает ли угроза потери данных при задержке выполнения заявки. Исходя из вышеуказанных факторов, СА подразделяет заявки пользователей на три основных вида:

- *задачи офисного характера* (например, неполадки возникли при наборе текста, не загружается программное приложение по локальным причинам или же существует необходимость замены расходного материала (картридж, мышка, клавиатура и т. д.). Если пользователь не понимает, в чем конкретно причина неполадки, то у него высока вероятность попасть в группу пользователей красного уровня;
- *аппаратно-прикладные задачи* по классификации СА входят в число задач средней сложности, которые охватывают в основном аппаратную часть системы (например, вышел из строя привод, неполадки в работе жесткого диска, не работает сетевая плата и т. д.). Оператор, обратившийся с заявкой такого типа, имеет все шансы быть в

списке пользователей желтого уровня, если он представляет, в чем конкретно может быть причина возникшей неполадки и какие меры предположительно следует предпринять;

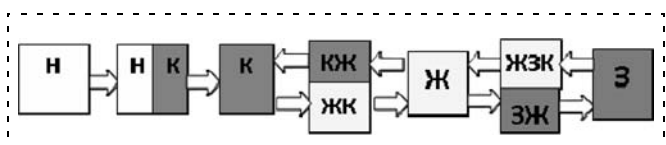
- **системные задачи.** Так как основной целью СА является обеспечение работы и развитие КС, то эта группа задач является более сложной, чем предыдущие задачи. Пользователи, обратившиеся с заявками сетевого характера и примерно понимающие масштаб неполадок, а также специфику, считаются опытными пользователями, которые могут быть включены в группу пользователей зеленого уровня.

Повторение ошибок — это неполадки, возникшие по вине пользователя (неправильное выключение АРМ, случайное удаление данных, некорректное эксплуатирование периферийных устройств и т. д.). Если данные ошибки возникают по этим же причинам, и при всем этом пользователь не в состоянии препятствовать появлению подобных ошибок, то данная категория пользователей считается наиболее уязвимой, и у них ограничиваются права до красного уровня.

Распределив права пользователей каждого из уровней, СА упорядочивает и упрощает свою деятельность, и у него в распоряжении оказывается больше времени и возможностей для решения других задач, связанных с усовершенствованием и улучшением качества работы КС.

При делегировании прав пользователям СА принимает во внимание еще один параметр, связанный с последствиями возможных длительных перерывов в работе пользователя. Например, пользователь после длительного отсутствия обращается к СА с заявкой зеленого уровня (для решения которой необходим доступ зеленого уровня). В этом случае СА с помощью дополнительных служб операционной системы может проверить список запущенных приложений в момент подачи заявки и после мониторинга КС по своему усмотрению принять решение о повышении статуса пользователя на зеленый уровень или оставлении пользователя на прежнем уровне.

При приеме на работу, по умолчанию, пользователь имеет начальный уровень и после установленного СА времени переводится на красный уровень. Кроме того, в целях принятия эффективного решения и предотвращения возможных угроз или непредвиденных обстоятельств, прежде чем переводить пользователя с красного на желтый уровень и затем с желтого уровня на зеленый уровень или обратно, пользователь переводится на так называемые промежуточные уровни (см. рисунок).



Присвоение уровней пользователям

Промежуточные уровни пользователей служат связующим звеном для перевода пользователей с одного уровня на другой. В данном случае промежуточными уровнями являются начально-красный уровень (НК), красно-желтый (КЖ) и желто-красный (ЖК) уровни и желто-зеленый (ЖЗ) и зелено-желтый (ЗЖ) уровни. Пользователи, находящиеся на промежуточном уровне НК имеют полное ограничение прав с некоторыми возможностями красного уровня. С промежуточного уровня НК не совершается перевод пользователя на предыдущий уровень. Пользователи промежуточного уровня КЖ имеют ограничение красного уровня с некоторыми возможностями желтого уровня, а пользователи промежуточного уровня ЖК имеют некоторые ограничения желтого уровня с полными правами красного уровня и т. д. Пользователи зеленого уровня могут быть переведены только на предыдущий уровень.

Выводы

1. Проведена оценка загруженности операторов и времени пребывания задач в системе. Сформулированы основные принципы распределения задач между операторами.
2. Предложен способ классификации операторов КС на основании трех основных параметров, который позволяет повысить эффективность деятельности СА и, тем самым, эффективность работы КС.
3. Разработаны формализованные правила назначения уровней пользователям, которые позволяют упорядочить деятельность СА и повысить эффективность работы пользователей.
4. Использование предложенных правил при выборочном ограничении прав пользователей позволит строго регламентировать процесс делегирования прав пользователей.

Изложенный подход является весьма полезным для системных администраторов и организаций, в которых эксплуатируются КС.

Список литературы

1. **Информационно-управляющие** человеко-машинные системы. Исследование, проектирование, испытания / Справочник: под общ. ред. А. И. Губинского, В. Г. Евграфова. М.: Машиностроение, 1993. 512 с.
2. **Падерно П. И., Попечителев Е. П.** Надежность и эргономика биотехнических систем / Под общ. ред. проф. Е. П. Попечителева. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2007. 288 с.
3. **Ву Дык Лунг, Падерно П. И.** Комплексный метод оценки вероятности правильного решения оператором задач в локальных вычислительных сетях // Информатика, управление и компьютерные технологии. Сб. "Известия СПбГЭТУ". 2005. Вып. 2. С. 32—36.
4. **Падерно П. И., Сатторов Ф. Э.** Системный администратор локальной вычислительной сети // Доклады академии наук Республики Таджикистан. 2009. Т. 52. № 6. С. 437—442.
5. **Сергеев С. Ф., Падерно П. И., Назаренко Н. А.** Введение в проектирование интеллектуальных интерфейсов: учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 108 с.
6. **Ву Дык Лунг, Падерно П. И., Сатторов Ф. Э.** Человеческий фактор в корпоративных сетях. Часть 1. Модели и оценки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 10. С. 38—42.

УДК 51-72

В. Т. Шароватов, д-р техн. наук, проф.,
kaf_ni@bstu.spb.su,

П. А. Лошицкий, аспирант,
mail-my-ya@yandex.ru,

Балтийский государственный технический
университет "Военмех" им. Д. Ф. Устинова,
г. Санкт-Петербург

Математическая модель силового оболочкового бесштокового пневмоцилиндра одностороннего действия с возвратной пружиной

Предлагается математическая модель силового оболочкового бесштокового пневмоцилиндра (СБПЦ) одностороннего действия с возвратной пружиной, учитывающая свойства сжатого газа. В исследовании использованы выкладки для СБПЦ одностороннего и двустороннего действия [1, 2]. Приведен расчетный пример возможного использования упомянутого СБПЦ в захватном устройстве манипулятора. Область применения таких СБПЦ — высокоточные и быстродействующие системы управления малых перемещений.
Ключевые слова: силовой оболочковый элемент, рабочая точка, математическая модель, пневмоцилиндр

Введение. Данная статья завершает цикл работ, посвященных разработке динамических математических моделей оболочковых силовых бесштоковых пневмоцилиндров (СБПЦ), и рассматривает математическую модель СБПЦ одностороннего действия с возвратной пружиной на основе исследований, выполненных для СБПЦ невозвратного типа в [1] и СБПЦ двустороннего действия в [2]. Попытки получить математические модели упомянутых СБПЦ предпринимались рядом отечественных и зарубежных исследователей [3–5]. Однако данные работы не позволяют в полной мере применить полученные в них научные результаты либо в связи с их излишней громоздкостью, либо из-за упрощенного подхода при решении поставленных задач. В то же время полученные авторами математические модели позволяют найти не только изменение геометрических параметров СБПЦ различных типов, но и учесть свойства сжатого газа в практически важных установившихся режимах работы СБПЦ при сохранении простоты и наглядности расчетов. Применение полученной математической модели проиллюстрировано расчетным примером.

Математическая модель СБПЦ одностороннего действия с возвратной пружиной

Поскольку в каталогах фирмы "Festo" размерности статических характеристик силовых оболочковых элементов (СОЭ) типа "пневматический мускул" (ПМ) представлены в виде относительных величин, то авторы сочли возможным для удобства пользователей сохранить тот же подход при описании размерностей ряда параметров, входящих в состав уравнений, описывающих динамику СБПЦ.

По аналогии с методикой, изложенной в работе [2], найдем систему уравнений, описывающую динамику СБПЦ с возвратной пружиной на основе системы уравнений, найденной для СБПЦ невозвратного типа. Для данного типа СБПЦ система уравнения из работы [1] сохранит свой вид за исключением выражения, определяющего усилия, действующие на СОЭ. В это выражение добавляется сила, развиваемая возвратной пружиной $F_{пр}$. В результате получаем следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{\rho_p} \frac{d\rho_{cp}}{dt} + \frac{k_r}{r_p} \frac{dr_{cp}}{dt} = k_u \frac{Q}{V_p}; \quad (a) \\ p(\rho) = k_{pp}\rho + p_0; \quad (b) \\ r(\delta) = \delta/k_{r\delta} + r_0; \quad (c) \\ F_{пм} = k_F(k_{\delta p}\Delta p - \Delta\delta); \quad (d) \\ F_{пм} = k_{тр} \frac{d\Delta l_T}{dt} + m \frac{d^2\Delta l_T}{dt^2} + F_H + F_{возм} + F_{пр}; \quad (e) \\ \delta = \frac{l_H - l_T}{l_H} \cdot 100 \%; \quad (f) \end{array} \right. \quad (1)$$

где δ — относительное сокращение СОЭ; ρ — плотность рабочей среды; p — давление внутри оболочки; t — время; F_H — усилие, затрачиваемое СОЭ на преодоление нагружающих сил; $F_{возм}$ — возмущающее воздействие на СОЭ; $F_{тр}$ — усилие, затрачиваемое СОЭ на преодоление сил вязкого трения; $F_{пм}$ — усилие, развиваемое СОЭ; m — масса объекта управления (ОУ), приведенная к продольной оси СОЭ; r — текущее значение радиуса оболочки СОЭ; l_T, l_H — текущая и начальная длины СОЭ соответственно; Q — объемный расход газа, поступающий в оболочку СОЭ; ρ_p, r_p, ρ_r, V_p — давление, радиус оболочки, плотность и внутренний объем оболочки СОЭ для выбранной рабочей точки (РТ), которая соответствует нейтральному положению ОУ; r_0, p_0 — постоянные величины; k_F — коэффициент жесткости; $k_{\delta p}$ — коэффициент, связывающий приращение относительного сокращения $\Delta\delta$ с изменением давления Δp ; $k_{r\delta}$ — коэффициент, связываю-

ший изменение приращения радиуса оболочки Δr с приращением относительного сокращения $\Delta\delta$; k_u — коэффициент пропорциональности; k_{pp} — коэффициент, связывающий изменение плотности газа ρ с изменением давления p .

Усилие, развиваемое возвратной пружиной, можно найти согласно следующему выражению:

$$F_{пр} = k_{пр}(\delta_p + \Delta\delta), \quad (2)$$

где δ_p — относительное сокращение СОЭ в РТ; $k_{пр}$ — коэффициент жесткости возвратной пружины, заданный относительно δ_p .

Величину $k_{пр}\delta_p$ в выражении (2) в данном случае можно не учитывать, так как при составлении системы уравнений для оболочкового СБПЦ одностороннего действия невозвратного типа (см. [1]) предполагалось, что силы, действующие на ОУ в начальный момент времени, уравновешивают друг друга. Таким образом, будем учитывать только приращение усилия возвратной пружины:

$$F_{пр} = k_{пр}\Delta\delta. \quad (3)$$

Теперь представим систему уравнений (1) с учетом (3):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{2}{\rho_p} \frac{d\Delta\rho_{cp}}{dt} + \frac{k_r}{r_p} \frac{\Delta dr_{cp}}{dt} &= k_u \frac{Q}{V_p}; & (a) \\ \Delta\rho(p) &= k_{pp}\Delta p; & (b) \\ \Delta r(\delta) &= \Delta\delta/k_{r\delta}; & (c) \\ F_{пм} &= k_F(k_{\delta p}\Delta p - \Delta\delta); & (d) \\ F_{пм} - F_H - F_{возм} - k_{пр}\Delta\delta &= k_{тр} \frac{d\Delta I_T}{dt} + m \frac{d^2 \Delta I_T}{dt^2}; & (e) \\ \Delta\delta &= \frac{\Delta I_T}{I_H} \cdot 100 \%. & (f) \end{aligned} \right.$$

Алгоритм получения передаточных функций для СБПЦ с возвратной пружиной аналогичен приведенному в работе [2], поэтому для рассматриваемого в данной статье опустим промежуточные вычисления и запишем решение системы уравнений (4) в виде уравнения состояния:

$$k_F k_{\delta p} \frac{C_p}{V_{рт}} \frac{Q(s)}{s} - F_H(s) - F_{возм}(s) = (s^2 \frac{m L_H}{100 \%} + s \frac{k_{тр} L_H}{100 \%} + k_F(k_{\delta p} C_p C_\delta + 1) + k_{пр}) \frac{100 \%}{L_H} X(s), \quad (5)$$

где $X(s)$ — изображение по Лапласу абсолютной величины перемещения ОУ, а коэффициенты C_p и C_δ определяются следующими выражениями:

$$C_p = \frac{k_u \rho_p}{2k_{pp}}, \quad C_\delta = \frac{k_r}{k_{r\delta} k_u r_p}.$$

Именно с помощью этих коэффициентов осуществляется учет динамических процессов внутри силовой оболочки. Коэффициенты C_p и C_δ зависят только от выбора РТ и типоразмера СОЭ.

Числовые значения коэффициентов C_p и C_δ приведены в работе [2].

Значения коэффициента k_F для различных значений РТ представлены на рис. 1.

Значения коэффициента $k_{\delta p}$ рассчитаны в работе [2] и подходят как для СБПЦ одностороннего действия, так и для СБПЦ двустороннего действия.

Так как оболочковые СБПЦ как исполнительный двигатель представляют собой конструкцию, состоящую в основном из двух составляющих — силовой части (СЧ) в виде СОЭ и электропневматического дроссельного распределителя (ДР), то эти составляющие должны быть представлены и в соотношениях для передаточных функций (ПФ), что

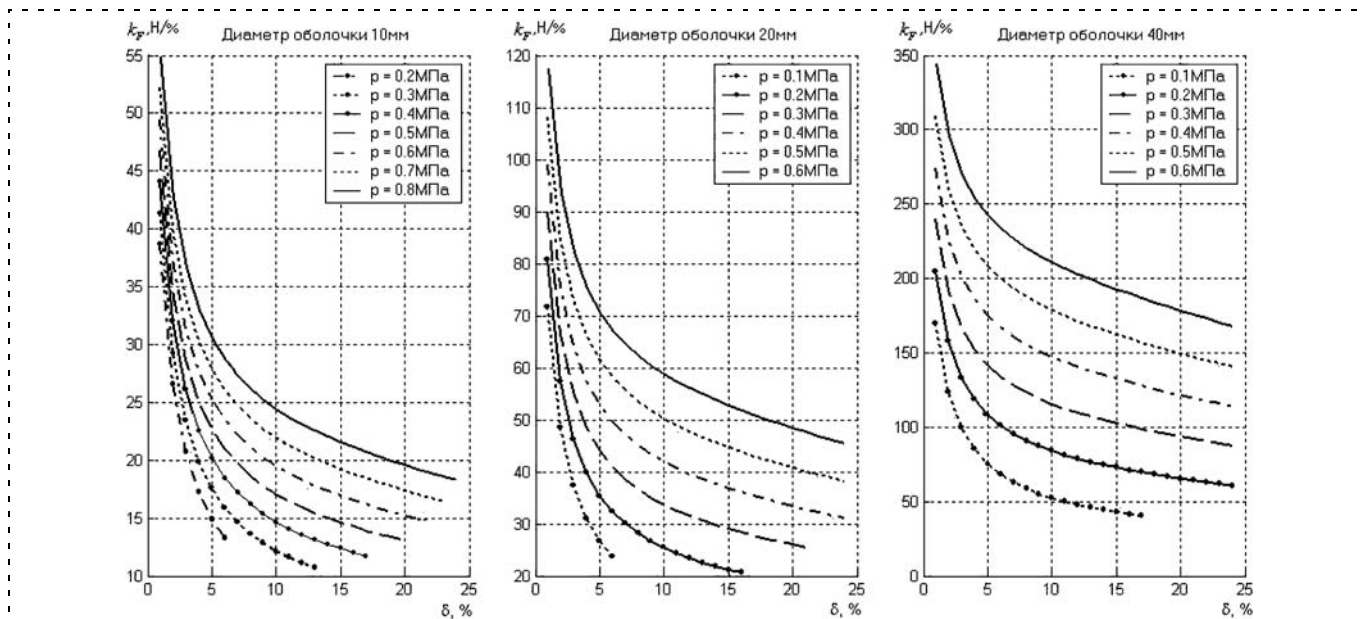


Рис. 1. Значения коэффициента k_F для трех типоразмеров СОЭ типа ПМ для различных значений РТ

и видно из следующих ПФ оболочкового СБПЦ одностороннего действия с возвратной пружиной:

◆ по перемещению

$$W_{\text{пер}}(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{k_{\text{пер}}}{s(T^2 s^2 + 2T\xi s + 1)} \cdot W_{\text{ДР}}(s), \quad (6)$$

где коэффициент передачи по перемещению $k_{\text{пер}}$, постоянная времени T и параметр затухания ξ , соответственно, имеют вид

$$k_{\text{пер}} = \frac{k_F k_{\delta p} C_p}{V_{\text{РТ}}(k_F k_{\delta p} C_p C_{\delta} + k_F + k_{\text{пр}})} \cdot \frac{l_H}{100 \%};$$

$$T = \sqrt{\frac{m l_H}{(k_F k_{\delta p} C_p C_{\delta} + k_F + k_{\text{пр}}) 100 \%}};$$

$$\xi = \frac{k_{\text{тр}}}{2} \sqrt{\frac{l_H}{m(k_F k_{\delta p} C_p C_{\delta} + k_F + k_{\text{пр}}) 100 \%}};$$

◆ по возмущению

$$W_{\text{возм}}(s) = \frac{X(s)}{F_{\text{возм}}(s)} = \frac{k_{\text{возм}}}{(T^2 s^2 + 2T\xi s + 1)}, \quad (7)$$

где коэффициент передачи по возмущению

$$k_{\text{возм}} = \frac{1}{k_F k_{\delta p} C_p C_{\delta} + k_F + k_{\text{пр}}} \cdot \frac{l_H}{100 \%},$$

а значения постоянной времени T и параметра затухания ξ те же, что и в предыдущем случае;

◆ по усилию

$$W_{\text{ус}}(s) = \frac{F_{\text{н}}(s)}{F_{\text{вх}}(s)} = \frac{k_{\text{ус}}}{s} \cdot W_{\text{др}}(s) W_{\text{чЭ}}(s), \quad (8)$$

где коэффициент передачи по усилию

$$k_{\text{ус}} = k_F k_{\delta p} \frac{C_p}{V_{\text{РТ}}},$$

$W_{\text{чЭ}}(s)$ — передаточная функция чувствительного элемента (ЧЭ) в цепи главной обратной связи.

Нетрудно заметить, что ПФ оболочкового СБПЦ одностороннего действия с возвратной пружиной по усилию в (8) аналогична выражению для ПФ, приведенной в работе [1], для оболочкового СБПЦ одностороннего действия невозвратного типа. Это объясняется тем, что процедура нахождения ПФ для оболочкового СБПЦ одностороннего действия с возвратной пружиной по усилию выполняется с учетом того, что процесс перемещения ОУ уже завершен, и возвратная пружина не участвует в изменении усилия.

Пример применения оболочкового СБПЦ одностороннего действия с возвратной пружиной

Рассмотрим одну из возможных схем реализации захватного устройства (ЗУ), представленную на рис. 2.

Рассмотрим характеристики данного ЗУ и входящих в него элементов:

- максимальное расхождение губок — 50 мм;
- усилие на губках — 54...183 Н (в зависимости от величины расхождения губок, максимальное усилие при максимальном расхождении);
- суммарное усилие, создаваемое пружинами — 40...50 Н;
- ход зубчатого штока — 10 мм;
- редукция на рычагах ЗУ — $i \approx 0,4$;
- приведенная масса к торцу СЧ СБПЦ $m = 0,8$ кг;
- коэффициент вязкого трения $k_{\text{тр}} = 50$ Н/(м/с).

Исходя из требований к значениям усилия и хода зубчатого штока выберем СОЭ типа ПМ фирмы "Festo" DMSP-10-100N-AM-CM, обладающий следующими характеристиками [7]:

- подвод воздуха — осевой, с одной стороны;
- длина оболочки — 100 мм;
- внутренний диаметр оболочки в исходном состоянии — 10 мм.

Суммарная жесткость двух возвратных пружин (рис. 2)

$$k_{\text{пр}} = 2 \cdot (25 - 20)/10 = 1 \text{ Н/мм} = 1 \text{ Н/\%}$$

(для выбранного СОЭ).

После определения типоразмера СОЭ выберем координаты δ_p и r_p для РТ и рассчитаем величины, необходимые для нахождения числовых значений коэффициентов, входящих в параметры передаточных функций (8)—(10):

- так как величина относительного сокращения СОЭ выбрана равной 10 % (10 мм), выберем $\delta_p = 5$ %;
- для обеспечения требуемого значения уровня усилия сжатия на губках ЗУ выберем значение рабочего давления $p_p = 0,6$ МПа.
- на основании данных, представленных в работе [1], находим значение радиуса оболочки для РТ $r_p = 0,0063$ м;

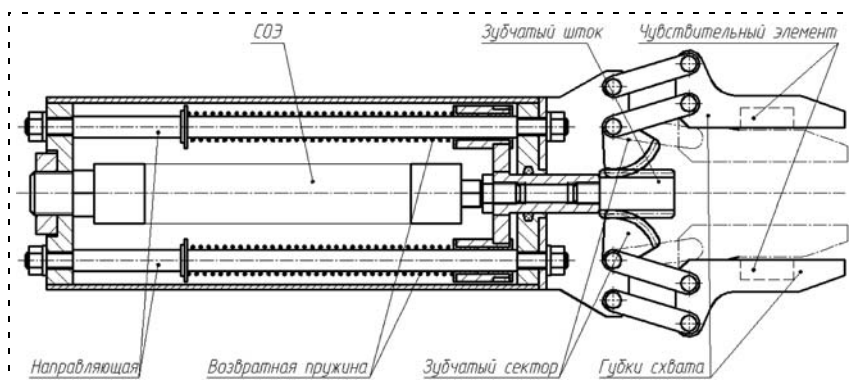


Рис. 2. Схема реализации захватного устройства с применением оболочкового СБПЦ с возвратной пружиной

- используя соотношения из работы [1], находим значение коэффициента, учитывающего деформацию оболочки вблизи присоединительных фланцев, $k_{VV} = 0,94$;
- вычисляем объем СОЭ в РТ [1]

$$V_p = k_{VV} \pi r_p^2 l_H \left(1 - \frac{\delta_p}{100 \%}\right) =$$

$$= 0,94 \cdot \pi \cdot 0,00632 \cdot 0,1 \cdot (1 - 0,05) = 1,09 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

С помощью данных и рис. 2 из работы [2], а также рис. 1 находим числовые значения коэффициентов:

$$C_p = 0,348 \text{ МПа}; C_\delta = 0,184 \%^{-1};$$

$$k_F = 25,66 \text{ Н/\%}; k_{\delta p} = 27,2 \%/\text{МПа}.$$

В итоге, используя (6), (7) и (8), находим

$$k_{\text{упр}}^{\text{сч}} = 311 (\text{с} \cdot \text{м}^2)^{-1}; k_{\text{возм}} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ м/Н};$$

$$k_{\text{ус}}^{\text{сч}} = 2,22 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3; T = 0,0033 \text{ с}; \xi = 0,105.$$

Для учета тепловых потерь, связанных с расширением газа, скорректируем найденные коэффициенты передачи по управлению и усилию в соответствии с методикой расчета обычных пневмоцилиндров [8, 9]:

$$k_{\text{упр}}^{\text{сч}} = \frac{k_{\text{упр}}^{\text{сч}}}{k_{\text{тп}}} = \frac{311}{1,4} = 222,14;$$

$$k_{\text{ус}}^{\text{сч}} = \frac{k_{\text{ус}}^{\text{сч}}}{k_{\text{тп}}} = \frac{2,2 \cdot 10^7}{1,4} = 1,57 \cdot 10^7,$$

где $k_{\text{тп}}$ — коэффициент, учитывающий тепловые потери, связанные с расширением газа (при расчете пневмоцилиндров принимается равным 1,4).

Для управления СЧ СБПЦ будем использовать ДР с пропорциональным управлением фирмы "Festo" — МРУЕ-5-1/8LF-010-В со следующими характеристиками [10]:

- функция клапана — 5/3;
- номинальный расход (при 0,6 МПа) — 350 л/мин;
- предельная частота $f = 100$ Гц;
- рабочая температура — 0...50 °С;
- коэффициент передачи $k_{\text{ДР}} = Q/U =$
 $= 350 \text{ л/мин}/5 \text{ В} = 0,0012 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{В});$
- постоянная времени $T_{\text{ДР}} = 1/\omega_{\text{ДР}} = 1/(2\pi f) =$
 $= 0,0016 \text{ с};$
- параметр затухания $\xi_{\text{ДР}} = 0,3.$

Характеристики ЧЭ, определяющего усилие на губках ЗУ LMA-A-200N [11]:

- напряжение на выходе 0,75...2 мВ/В;
- напряжение возбуждения 1...5 В;
- номинальный диапазон измерений 200 Н;
- коэффициент передачи ЧЭ $k_{\text{ЧЭ}} = (2 - 0,75) \cdot 5 \times$
 $\times 10^{-3}/200 = 3,125 \cdot 10^{-5} \text{ В/Н}.$

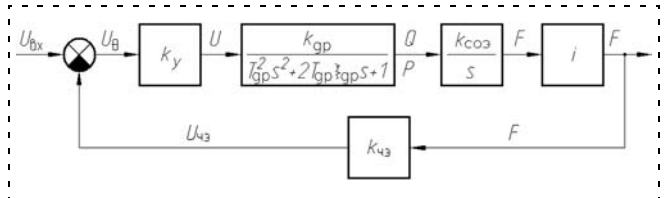


Рис. 3. Структурная схема нескорректированной системы управления канала по усилию ЗУ

Проведем оценку динамических качеств данного ЗУ для канала по усилию. Основное требование к виду переходного процесса для данного вида управления — отсутствие перерегулирования.

Так как сигнал с ЧЭ значительно меньше требуемого сигнала для управления ДР, то в состав системы управления ЗУ необходимо включить также промежуточный усилитель с коэффициентом передачи $k_y = 870$, который позволит уравнивать сигнал от ЧЭ с допустимым уровнем сигнала на входе ДР.

На рис. 3 приведена структурная схема нескорректированной системы управления ЗУ для канала управления по усилию.

В качестве исходных данных, необходимых для выполнения динамического синтеза, зададимся следующими величинами:

- максимальная амплитуда входного сигнала $A_{\text{max}} = 180$ Н;
- динамическая ошибка $\Theta_{\text{max}} \leq 9$ Н (5 % от A);
- частота гармонического сигнала $\omega \geq 6,28$;

На основании проведенного динамического синтеза методом обратных ЛАЧХ [12], а также моделирования в среде "Simulink" получены графики динамических процессов при заданном входном воздействии усилия в виде единичного скачка (рис. 4).

Из графика, представленного на рис. 4, можно сделать вывод, что коррекция проведена успешно, и поставленные требования к динамике ЗУ полностью выполнены.

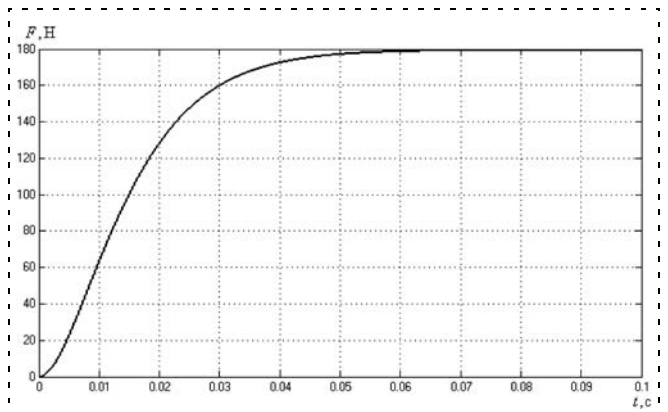


Рис. 4. График переходного процесса при подаче на вход системы сигнала типа единичный скачок

Анализ результатов. Таким образом, можно утверждать, что применение оболочковых СБПЦ с возвратной пружиной в схватах промышленных манипуляторов с силомоментным очувствлением не только экономически выгодно (уменьшает стоимость за счет применения СОЭ), но и позволяет создавать изделия с высокими динамическими показателями.

Выводы

Представленная в статье линеаризованная динамическая математическая модель оболочкового СБПЦ одностороннего действия с возвратной пружиной, учитывающая динамику сжатого газа, а также универсальная методика выбора и расчета статических характеристик СЧ и параметров ПФ оболочковых СБПЦ этого типа по перемещению, возмущению и усилию предоставляют разработчикам простой и удобный инструмент для применения новых высокоэффективных пневмоэлементов в современных СУ.

Список литературы

1. Шароватов В. Т., Лошицкий П. А. Математическая модель силового бесштокового пневмоцилиндра одностороннего

действия оболочкового типа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 2. С. 30–36.

2. Шароватов В. Т., Лошицкий П. А. Математическая модель силового бесштокового пневмоцилиндра двустороннего действия // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 4. С. 24–30.

3. Липатов А. А., Марти А. Н., Шароватов В. Т. Исследование статики и динамики оболочкового гидро-пневмодвигателя // Известия вузов. Машиностроение. 2002. № 4. С. 36–49.

4. Ching-Ping Chou, Hannaford B. Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles // Robotics and Automation. IEEE Transactions on. V. 12. N 1. (1996). P. 90–102.

5. Daerden F., Lefeber D. Pneumatic artificial muscles: Actuators for robotics and automation // European Journal of Mechanical and Environmental Engineering. 2002. 47 (1). P. 11–21.

6. Лошицкий П. А., Шароватов В. Т. Идентификация некоторых параметров математической модели двигателя оболочкового типа // Известия вузов. Приборостроение. 2008. № 12. С. 56–63.

7. Пневмомускул MAS. URL: http://www.festo.com/cat/ru_ru/data/doc_ru/PDF/RU/MAS_RU.pdf

8. Исполнительные механизмы URL: http://smcl38.value-host.ru/c5/005_2.pdf

9. Попов Д. Н. Механика гидро- и пневмоприводов: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 320 с.

10. Распределители с пропорциональным управлением серии "MPYE". URL: http://www.festo.com/cat/ru_ru/data/doc_ru/PDF/RU/MPYE_RU.PDF

11. LMB-A миниатюрный датчик силы. URL: <http://www.kyowa.ru/products/sensors/loadcell/pdf/06.pdf>

12. Следящие приводы / Под ред. Б. К. Чемоданова, в 3-х т. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003.

УДК 621.313.024; 681.30.57

В. А. Кузовкин, д-р техн. наук, проф.,
vkuzovkin@list.ru,

В. В. Филатов, канд. техн. наук, зав. каф.,
vfilatov45@mail.ru,

М. В. Чумаева, доц.,
mvmcmvc@yandex.ru,
МГТУ "СТАНКИН"

Моделирование процессов управления бесконтактным двигателем постоянного тока

Приведена совокупность моделей системы управления бесконтактным двигателем постоянного тока, позволяющая моделировать процессы управления в электроприводах подачи современных металлорежущих станков с ЧПУ.

Ключевые слова: бесконтактный двигатель постоянного тока, следящая система управления, широтно-импульсная модуляция, моделирование

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) применяются вместо коллекторных двигателей постоянного тока в электроприводах подачи современных металлорежущих станков. Требования к диапазону изменения скорости функционирования, быстрдействию и точности обработки на металлорежущих станках с ЧПУ постоянно повыша-

ются. Обеспечить эти требования способны системы управления, организованные на основе новых мехатронных принципов [1]. Мехатронный подход к управлению станками породил новые задачи управления, среди которых задачи построения систем управления бесконтактным двигателем с электронной системой коммутации обмоток статора и датчиками обратной связи как единой мехатронной системой [2]. Для решения этих задач требуются новые, более сложные и полные модели, а также рациональный выбор средства моделирования.

Бесконтактный двигатель постоянного тока представляет собой обращенную машину постоянного тока. Индуктором является ротор с размещенными на нем постоянными магнитами. Якорь расположен на статоре. На обмотки якоря подаются постоянные напряжения по определенному алгоритму через коммутатор, содержащий силовые полупроводниковые ключи. Ключи переключаются под действием сигналов с датчиков положения ротора.

В статье рассматривается модель следящей системы управления трехфазным БДПТ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и электронной коммутацией (рис. 1).

Мехатронный модуль движения состоит из электромеханического преобразователя (ЭМП) и датчиков Д1, Д2. ЭМП — объект управления — в модели представлен обращенной машиной по-

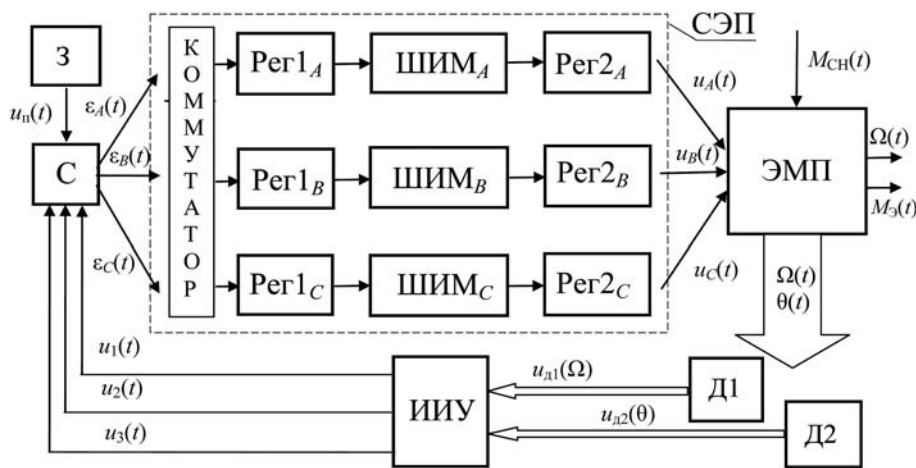


Рис. 1. Структура модели ШИМ-управления трехфазным БДПТ

стоянного тока с двухполюсным ротором на базе постоянного магнита. Управляющий модуль — силовой электронный преобразователь (СЭП) — образован коммутатором, ШИМ_{A(B, C)} и регуляторами Reg1_{A(B, C)} и Reg2_{A(B, C)}. В компьютерный модуль входят информационно-измерительное устройство (ИИУ) и устройство сравнения (С). Задающее воздействие $u_n(t)$ вырабатывается задатчиком (3).

Процессы, протекающие в системе, характеризуют сигналы: $\Omega(t)$ — угловая скорость вращения ротора, $M_3(t)$ — электромагнитный момент машины, $\theta(t)$ — угол поворота ротора (управляемые величины); $u_{A(B, C)}(t)$ — управляющие воздействия; $u_{D1(D2, D3)}(\theta)$ — импульсные напряжения обратной связи; $\varepsilon_{A(B, C)}(t)$ — отклонения значений напряжений обратной связи от задающего воздействия $u_n(t)$; $M_{с.н}(t)$ — момент сопротивления нагрузки на валу двигателя (возмущающее воздействие).

При изменении значений отклонений $\varepsilon_A(t)$, $\varepsilon_B(t)$, $\varepsilon_C(t)$ устройство управления вырабатывает управляющие напряжения $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$, поддерживающие значение угловой скорости $\Omega(t)$ на заданном уровне.

Общая математическая модель системы управления ЭМП строится на основе совокупности описаний электромагнитных процессов в каждом канале, для каждой обмотки статора, с учетом противоЭДС $e_{A(B, C)}$, наводимой токами других обмоток якоря двигателя. При построении модели приняты упрощающие допущения:

- не учитываются ЭДС взаимной индукции, так как значения собственных индуктивностей обмоток статора $L_{A(B, C)}$ значительно больше взаимных индуктивностей;
- электромагнитная система машины симметричная, что обеспечивается ее конструктивным исполнением.

В соответствии с принятыми допущениями построение модели системы ШИМ-управления можно осуществить для одного канала с последующим учетом числа каналов.

Построение линейной непрерывной модели системы управления

Основой всех моделей управления БДПТ является математическая модель объекта управления канала в виде системы уравнений (например, для канала A):

$$u_A(t) = R_A i_A(t) + L_A di_A(t)/dt + e_A(t); \quad (1)$$

$$e_A(t) = k_E \Omega_A(t); \quad (2)$$

$$M_{\Delta A}(t) = k_M i_A(t); \quad (3)$$

$$J d\Omega(t)/dt + \beta \Omega(t) = M_3(t) - M_{с.н}(t), \quad (4)$$

где u_A , i_A — напряжения и токи якоря канала A; Ψ_A — потокосцепление; R_A , L_A — сопротивление и собственная индуктивность обмотки фазы A; e_A — противоЭДС, наводимая в фазе и зависящая от угла поворота ротора $\theta = \theta_T + 2\pi n$, где $\theta_T = \Omega t$ и $0 \leq \theta_T \leq 2\pi$; Ω — угловая скорость вращения ротора; коэффициенты $k_M = M_{\Delta, \text{ном}}/i_{A, \text{ном}}$, $k_E = k_E$ рассчитываются по паспортным данным двигателя; J — момент инерции ротора; β — коэффициент трения; $M_{\Delta A}$ — электромагнитный момент фазы A; $M_3 = M_{\Delta A} + M_{\Delta B} + M_{\Delta C}$ [3] — суммарный развиваемый на валу момент, где $M_{\Delta A} = k_M i_A \cos \theta_T$, $M_{\Delta B} = k_M i_B \cos(\theta_T - 2\pi/3)$, $M_{\Delta C} = k_M i_C \cos(\theta_T - 4\pi/3)$.

Широтно-импульсный модулятор — устройство нелинейное. Однако при $D \leq 0,3$ и $Q \leq 0,3$ ($D = \tau/T$, $Q = \tau_3/T$, τ — длительность импульса, τ_3 — длительность задержки импульса относительно начала периода квантования T) работа ШИМ-модулятора практически эквивалентна работе линейного элемента, задаваемого уравнениями

$$\tau = \tau_{и0} + K_{\text{ШИМ}} U_{\text{упр}}; \quad (5)$$

$$U_{\text{вых. ШИМ}} = U_{\text{ШИМ}} \frac{1}{T} (\tau_{и0} + K_{\text{ШИМ}} U_{\text{упр}}), \quad (6)$$

где $K_{\text{ШИМ}}$ — передаточный коэффициент ШИМ; $U_{\text{ШИМ}}$ — амплитуда формируемого модулятором импульса; $U_{\text{упр0}}$ — начальное значение управля-

шего напряжения $U_{\text{упр}}$; $\tau_{\text{и}0} = \tau_0 + K_{\text{ШИМ}} U_{\text{упр}0}$ — начальное значение выходного импульса; τ_0 — минимальная длительность выходного импульса [4].

Расчет несущей частоты импульсов f широтно-импульсного модулятора можно осуществить, например, исходя из условия режима непрерывного тока

$$f > \frac{1}{3T_A M_{\text{с.н}}} (\Omega + M_{\text{с.н}})[1 - (\Omega + M_{\text{с.н}})].$$

В качестве РЕГ_{А2} использовали П- и ПИ-регуляторы. Регулятор РЕГ_{А1} и датчик Д_А — пропорциональные звенья.

На основе уравнений (1)–(6) с учетом уравнений П-регуляторов и датчика определены передаточные функции канала по задающему и возмущающему воздействиям, а также передаточная функция чувствительности:

$$W_{\Omega U_{\text{уст}}} (s) = \frac{K_{\text{рег1}} K_{\text{ШИМ}} (1/K_M) K_{\text{рег2}}}{T_A T_M s^2 + (\beta K_d T_A + T_M) s + (\beta K_d + 1) + K_{\text{рег1}} K_{\text{ШИМ}} (1/K_M) K_{\text{рег2}} K_{\text{ос}}};$$

$$W_{\Omega M_{\text{с.н}}} (s) = \frac{K_d T_A s + K_d}{T_A T_M s^2 + (\beta K_d T_A + T_M) s + (\beta K_d + 1)};$$

$$W_{E_A U_{\text{уст}}} (s) = \frac{T_A T_M s^2 + (\beta K_d T_A + T_M) s + (\beta K_d + 1)}{T_A T_M s^2 + (\beta K_d T_A + T_M) s + (\beta K_d + 1) + K_{\text{рег1}} K_{\text{ШИМ}} (1/K_M) K_{\text{рег2}} K_{\text{ос}}},$$

где $T_A = L_A/R_A$ — электромагнитная постоянная времени; $T_M = J R_A/k_M^2$ — электромеханическая постоянная времени, $K_d = R_A/k_M^2$ — постоянная двигателя. Для системы с ПИ-регулятором в качестве РЕГ_{А2} построение аналогичное.

На рис. 2 представлены семейства временных и частотных характеристик системы, построенные по передаточной функции $W_{\Omega U_{\text{уст}}} (s)$ в программе MATLAB с параметрами двигателя ДБМ140-1,6-6-3-Р18 при вариации значений параметра $K_{\text{ШИМ}}$: $K_{\text{ШИМ}} = 0,005$ (1); $K_{\text{ШИМ}} = 0,05$ (2), $K_{\text{ШИМ}} = 0,5$ (3).

На основании анализа результатов численного моделирования можно сделать следующий вывод: с увеличением значения параметра $K_{\text{ШИМ}}$ быстро-

действие рассматриваемой линейной модели системы управления возрастает, ширина полосы пропускания низких частот увеличивается, но для сохранения устойчивости системы значение коэффициента ШИМ-модулятора ограничивается соотношением $K_{\text{ШИМ}} < 2\xi a_0 K_M / (K_{\text{рег1}} K_{\text{ос}} (K_u T - 2\xi K_n))$. Например, для двигателя типа ДБМ140-1,6-6-3-Р18 $K_{\text{ШИМ}} < 0,5$.

Расчет интервала значений управляющего напряжения $U_{\text{упр}}$ осуществляется по формулам: $U_{\text{упр}} = U_A / (K_{\text{ШИМ}} K_{\text{п}})$ — для систем с П-регулятором в качестве РЕГ_{А2} и $U_{\text{упр}} = U_A / (K_{\text{ШИМ}} K_{\text{и}})$ — для систем с ПИ-регулятором.

Допущение линейности является основным. Оно позволяет проводить синтез системы управления на базе передаточных функций.

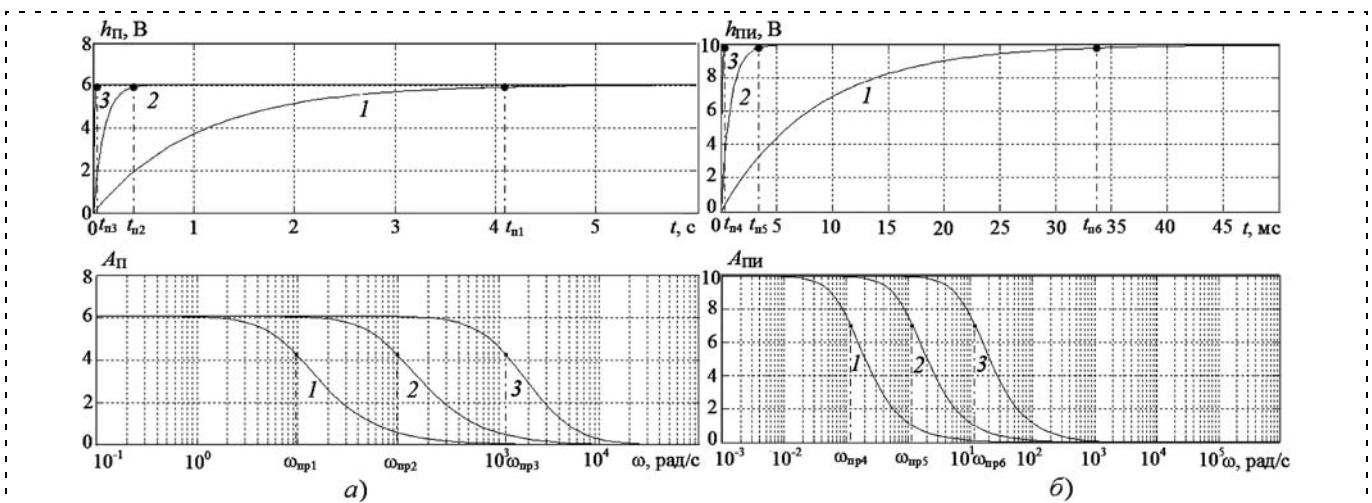


Рис. 2. Семейство временных и частотных характеристик линейной модели системы по параметру $K_{\text{ШИМ}}$: а — с П-регулятором; б — с ПИ-регулятором

Построение дискретной модели системы управления

При построении модели, учитывающей нелинейность ШИМ-модулятора, необходимо создание дискретной математической модели, позволяющей исследовать влияние на процессы управления погрешности, возникающей при дискретизации.

Угловая скорость вращения $\Omega(t)$ в дискретной модели описывается выражением $\Omega(t) = \sum_{i=0}^{\infty} U \text{sign}(\varepsilon_A[iT]) [h_{н.ч}(t-iT) - h_{н.ч}(t-(i+\gamma_{ij})T)]$,

где $h_{н.ч}(t)$ — переходная функция непрерывной части, включающей объект управления и П-регулятор обратной связи, $U = K_{пер1} U_{ШИМ}$. Нелинейная функция γ_{ij} ($j = 1, 2$) в соответствии с полярностью несущих импульсов принимает следующие значения: $\gamma_{i2} = \mu |\varepsilon_A[iT]|$ — для двухполярной модуляции, $\gamma_{i1} = v(|\varepsilon_A[iT]| + U)$ — для однополярной модуляции (μ, v — константы). Полученная функция выхода $\Omega(t)$ нелинейная, так как построена на нелинейных функциях $|\varepsilon_A[iT]|$ и $\text{sign}(\varepsilon_A[iT])$. Линеаризацию этой функции можно осуществить по формуле Тейлора при $\gamma_{ij}T \ll 1$.

Для двухполярного импульсного управляющего сигнала $u_A(t)$ модель замкнутой системы управления имеет структуру, приведенную на рис. 3, а. Для

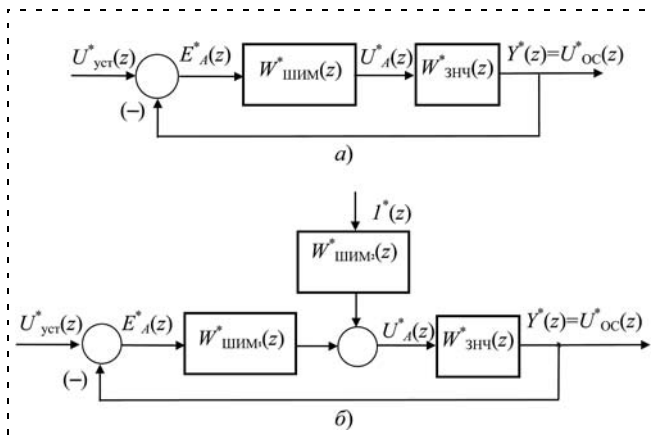


Рис. 3. Структурная схема замкнутой системы ШИМ-управления: а — при двухполярном управляющем сигнале; б — при однополярном сигнале

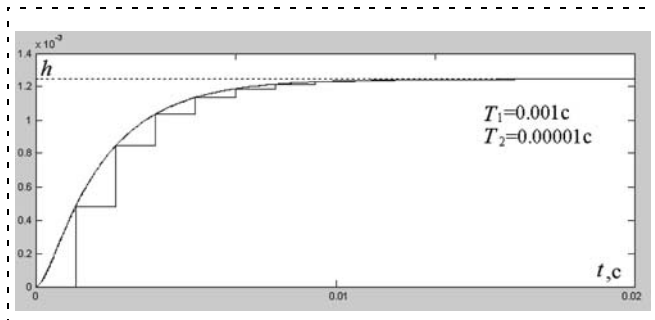


Рис. 4. Временные характеристики модели двухполярной системы, построенные по дискретной переходной функции для $\mu = 0,02$, $U = 500$, $T = 10^{-5}$

однополярного управляющего напряжения модель замкнутой системы управления имеет комбинированную структуру (рис. 3, б).

Выражения для Z -передаточной функции замкнутой системы имеют вид:

- для двухполярного управляющего сигнала

$$W_{32}^*(z) = \frac{\mu UTq_1 m z}{z^2 + [\mu UTq_1 m - m]z + e^{-d_2 T} e^{-d_1 T}};$$

- для однополярного сигнала при комбинированной структуре модели

$$W_{31}^*(z) = \left\{ \frac{v UTq_1 m z}{z^2 + [v UTq_1 m - m]z + e^{-d_2 T} e^{-d_1 T}}, \frac{v U^2 Tq_1 m z}{z^2 + [v U^2 Tq_1 m - m]z + e^{-d_2 T} e^{-d_1 T}} \right\},$$

где $m = e^{-d_2 T} - e^{-d_1 T}$, d_1, d_2 — корни характеристического уравнения объекта.

По Z -передаточным функциям $W_{3j}^*(z)$ ($j = 1, 2$) восстанавливаются дискретные функции переходного процесса:

$$h_j[iT] = \frac{G_j(1)}{F_j'(1)} + \frac{G_j(z_2)}{F_j'(z_2)} z_2^{(i-1)T} + \frac{G_j(z_3)}{F_j'(z_3)} z_3^{(i-1)T},$$

где многочлены $G_j(z)$ и $F_j(z)$, — соответственно, числитель и знаменатель Z -изображения дискретной переходной функции $H_j(z) = \frac{G_j(z)}{F_j(z)} = \frac{z}{z-1} W_{3j}^*(z)$;

z_2, z_3 — корни характеристического многочлена $W_{3j}^*(z)$ (рис. 4). Значения μ и U для заданного значения T находятся из условия $h_{2уст} = G_2(1)/F_2'(1)$, условия $0 < \mu < 1/\varepsilon_{\max}$ и естественных ограничений на значение U .

Для анализа влияния нелинейности системы на процессы необходимы модели, описывающие существенно нелинейные свойства системы управления.

Построение нелинейной модели системы управления

Учет существенной нелинейности проведен в имитационной модели широтно-импульсного управления электромеханическим преобразователем, построенной в пакете Multisim [5] на основе разработанных аналитических моделей.

В имитационной модели регулирование угловой скорости вращения двигателя осуществляется напряжением отклонения $\varepsilon(t)$, поступающим на вход модулятора (Eps на рис. 5, а). Напряжение $\varepsilon(t)$ формируется в сумматоре А9 как разность напряжения источника И1 и напряжения обратной связи ($U_{ос}$).

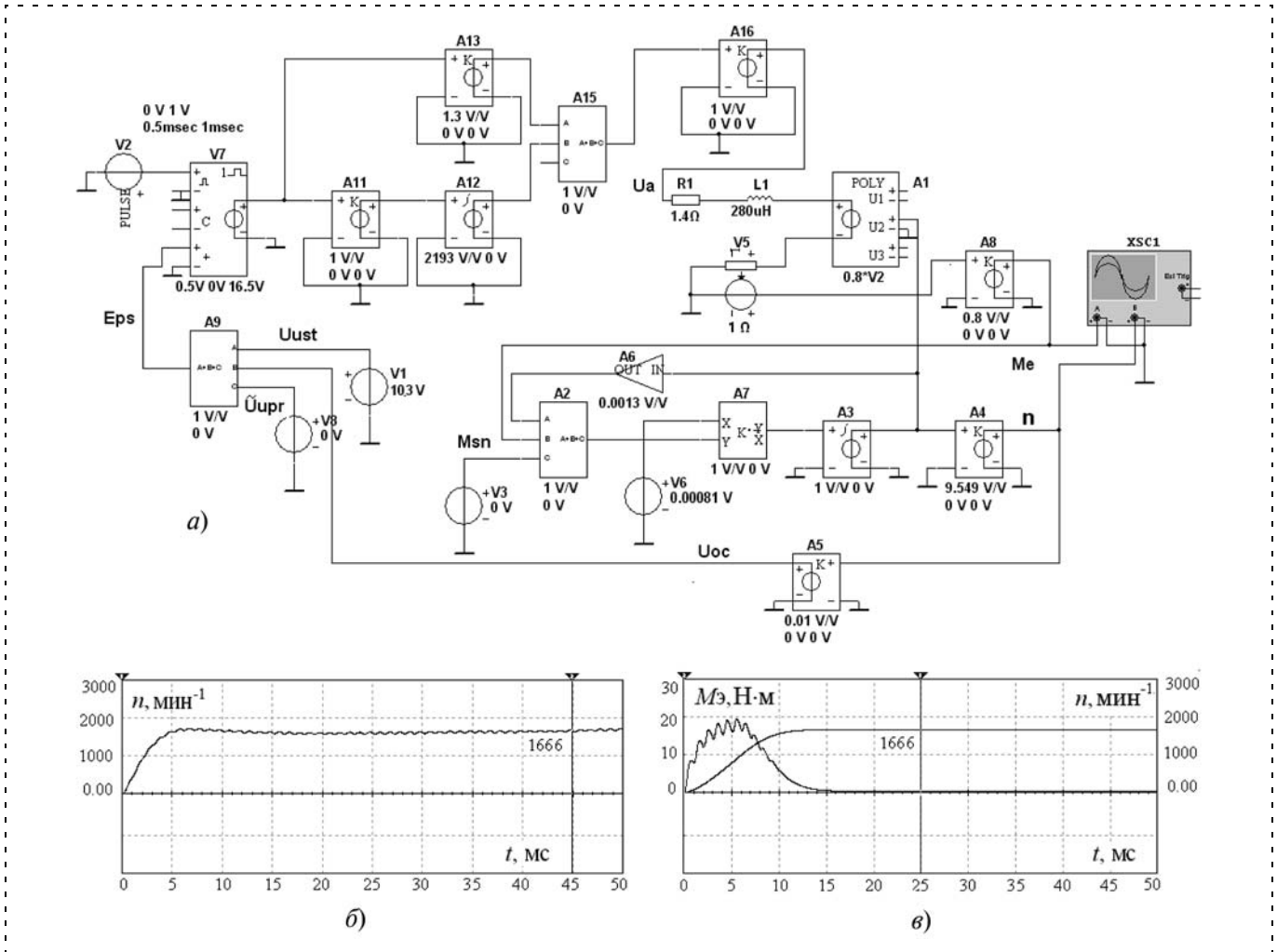


Рис. 5. Имитационная модель замкнутой системы управления с ШИМ (а), временные характеристики модели системы управления: б — с ПИД-регулятором; в — с ПИ-регулятором

Модель системы управления позволяет также моделировать процессы при комбинированном управлении добавлением напряжения $\tilde{u}_{упр}(t)$ от источника V8 ($\tilde{U}_{упр}$ на рис. 5, а).

Совокупность библиотечных элементов A11, A12, A13, A15, A16 моделирует ПИ-регулятор. Анализ результатов моделирования процессов управления показал, что ПИ-регулятор, настроенный на технический оптимум, имеет лучшую по сравнению с ПИД-регулятором динамику (рис. 5, б, в).

Нелинейность в данной модели задают ШИМ-модулятор V7 [6] и полиномиальный библиотечный элемент A1.

Результаты виртуальных экспериментов с изменением управляющего напряжения $U_{упр}$ и момента нагрузки $M_{с,н}$ представлены на рис. 6.

Полная имитационная модель импульсного управления бесконтактным двигателем постоянного тока реализуется взаимодействием пяти иерархических блоков. Модель составлена как мехатронная система [7] по блочно-модульному принципу (рис. 7). Блок ELECTROMECHANICAL (X4) моделирует электромеханический преобразователь.

Модель системы управления представлена тремя блоками. Блок RPS (X1) реализует датчик положения ротора, он формирует сигналы для распределителя импульсов. Распределитель импульсов реализован блоком-дешифратором DECODER (X2). DECODER преобразует цифровые сигналы датчиков в напряжения UK1...UK6, подаваемые на вход блока силового преобразователя COMMUTATOR (X3), который формирует управляющие напряжения $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$ для обмоток статора. Работа ШИМ моделируется блоком PWM (X5).

На рис. 8 представлены результаты моделирования процессов в системе. Анализ временных и частотных характеристик имитационной модели ШИМ-управления БДПТ позволил сделать следующие выводы: изменение амплитуды модуляции $U_{ШИМ}$ влияет на изменение значения скорости вращения ротора двигателя и не влияет на быстрдействие системы. Быстрдействие системы увеличивается с ростом электромагнитной постоянной времени $T_A = L_A/R_A$. Полоса пропускания расширяется с ростом $U_{ШИМ}$ и при уменьшении T_A .

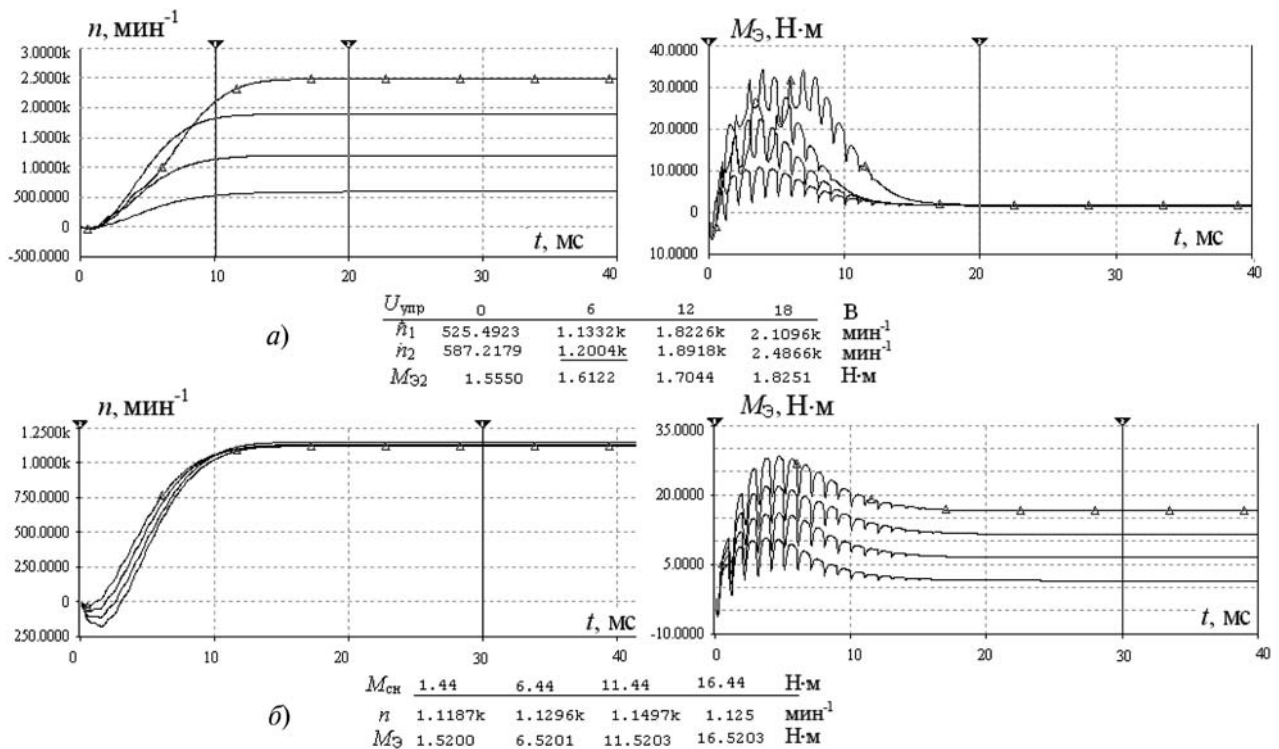


Рис. 6. Временные характеристики $n(t)$ и $M_3(t)$ модели:

а — при изменении управляющего напряжения $U_{упр}$; б — при изменении момента нагрузки $M_{с.н}(t)$

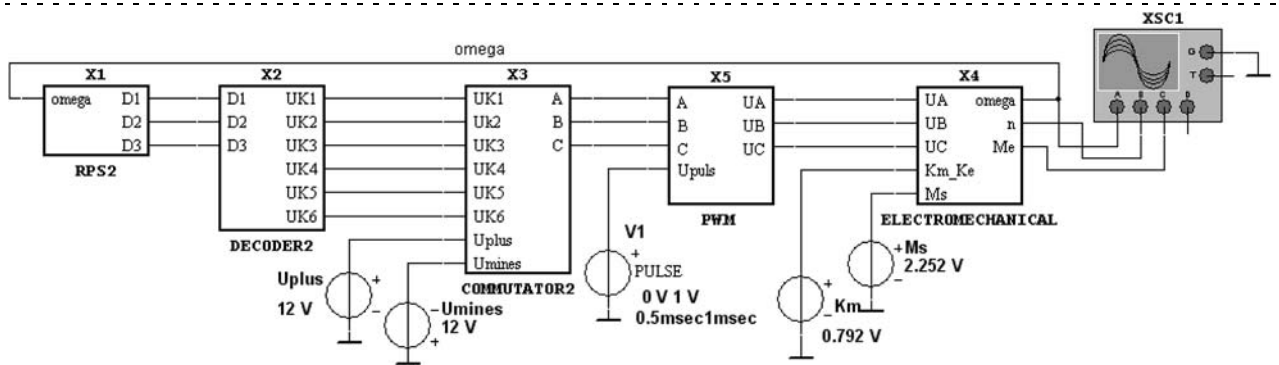


Рис. 7. Структура модели широтно-импульсного управления БДПТ в виде иерархических блоков

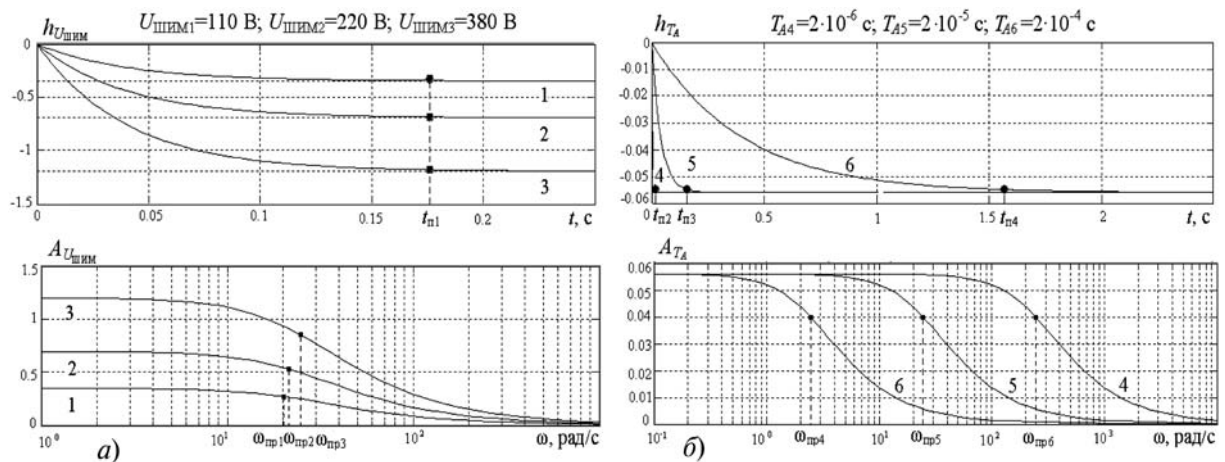


Рис. 8. Семейства характеристик модели ШИМ-управления БДПТ, зависящие от изменения амплитуды модуляции $U_{шпм}$ (а) и параметра T_d (б)

При построении модели системы импульсного управления БДПТ создана многоуровневая совокупность имитационных моделей элементов, образующих модули БДПТ. Это позволяет моделировать процессы в БДПТ как единой мехатронной системе и получать информацию, характеризующую точность работы приводов подач станков с ЧПУ.

Список литературы

1. Подураев Ю. В. Основы мехатроники: учеб. пособ. М.: Изд. МГТУ "Станкин", 2000. 80 с.
2. Андреев А. Г., Григорьев С. Н. Построение компьютерных систем программного управления мехатронными устройствами по модульному принципу // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 10. С. 8—13.

3. Кузовкин В. А., Филатов В. В., Чумаева М. В. Моделирование бесконтактного электродвигателя постоянного тока в среде MULTISIM // Вестник МГТУ "Станкин". 2012. № 1. С. 90—96.
4. Чумаева М. В. Multisim-модель импульсной системы управления ДПТ с независимым возбуждением и ее характеристики // Вестник МГТУ "Станкин". 2009. № 4 (8).
5. Кузовкин В. А., Филатов В. В. Моделирование электрических и электронных устройств в Multisim 10: учеб. пособ. М.: Изд. МГТУ "Станкин", 2010. 213 с.
6. Филатов В. В., Чумаева М. В. Моделирование широтно-импульсного преобразователя в профессионально-ориентированном программном пакете Multisim // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 2 (10). С. 79—85.
7. Кузовкин В. А. Компьютерное моделирование процессов в станочном электроприводе с бесконтактными двигателями постоянного тока // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 2 (10). С. 95—103.

УДК 519.216

Г. А. Гулуев, канд. техн. наук, директор СКБ,
scb_06@mail.ru,

А. Б. Пашаев, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб.,
adalat@kiber.az,

Ф. Г. Пашаев, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.,
pasha.farhad@gmail.com,

Ас. Г. Рзаев, канд. техн. наук, зав. лаб.,
asifrzayev48@gmail.com,

Э. Н. Сабзиев, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,
elkhan@kiber.az,

Институт кибернетики

Национальной академии наук Азербайджана

Алгоритм определения усилия на шток по потребляемой мощности электропривода во время работы станка качалки

Приведено аналитическое выражение зависимости между потребляемой мощностью электродвигателя и силой тяжести, действующей на полированный шток во время работы станка качалки.

Ключевые слова: нефтяная добыча, штанговые глубинные насосы, потребляемая мощность электродвигателя, усилия на шток

Введение

В настоящее время штанговыми глубинно-насосными установками (ШГНУ) оборудовано более 2/3 эксплуатационного фонда скважин, и их число постоянно увеличивается. Такой способ добычи еще длительное время останется самым распространенным. Однако низкая рентабельность работы ШГНУ ухудшает их технико-экономические показатели. Поэтому с точки зрения увеличения межремонт-

ного периода и создания наиболее благоприятных условий для организации и управления процессом нефтедобычи представляют интерес вопросы повсеместного внедрения современных методов и средств технического контроля и диагностирования ШГНУ [1—3].

Наиболее распространенным и изученным методом диагностирования состояния ШГНУ является динамометрирование [4] — процесс снятия зависимости $P(S)$ — усилия P на полированном штоке станка-качалки (СК) от перемещения S точки подвеса штанг. Форма полученных кривых (динамограмма) отражает изменения нагрузки $P(S)$ в точке подвеса насосных штанг в зависимости от их перемещения S при глубинно-насосной эксплуатации нефтяных скважин. По характеру отклонения формы динамограммы от нормальной судят о различных дефектах в работе ШГНУ (попадании в насос газа, утечке в нагнетательном или всасывающем клапанах, заклинивании, превышении производительности насоса над притоком жидкости в скважину, обрыве штанг, неправильности монтажа насоса, негерметичности труб, уменьшении полезного хода плунжера насоса по сравнению с ходом точки подвеса штанг из-за упругих деформаций штанг и труб и др.). Однако, как известно, данный способ не обладает достаточной точностью и надежностью из-за несовершенства приборов, отображающих работу установки в виде динамограммы. К тому же способ полностью исключает диагностику наземной части оборудования и позволяет диагностировать только его подземную часть.

Более надежным методом диагностирования ШГНУ может оказаться ваттметрирование — процесс получения ваттметрограммы (ВМГ), т. е. зависимости $N(\varphi)$ мощности, потребляемой электродвигателем СК, от угла поворота кривошипа [5—7]. При этом отпадает необходимость в использовании преобразователей механических величин в электри-

ческий сигнал, так как используется датчик мощности переменного тока. Тогда становится актуальной задача определения функциональной зависимости между потребляемой мощностью электродвигателя и усилием на шток за цикл качания по времени.

Актуальность такой задачи обусловлена двумя обстоятельствами:

- на нефтегазодобывающих предприятиях обслуживающий персонал привык к априорной диагностике по динамограммам. Диагностика по ВМГ почти не используется;
- интеллектуальная диагностика с применением новых robust noise monitoring technologies [8] по ВМГ обязательно требует создания эталонных образов, отражающих различные состояния оборудования, и созданные образы по динамограммам будут полезными в этом деле.

Постановка задачи

Известно [9], что чувствительность, точность и надежность датчиков измерения усилия на подвеске колонны штанг намного ниже, чем измерения потребляемой мощности электропривода. К тому же монтаж, установка и дальнейшая эксплуатация датчиков усилия приводит к лишним проблемам. Ремонт датчиков приводит к вынужденным остановкам станка качалки. Получив аналитическое выражение зависимости между потребляемой мощностью электродвигателя от питающей сети и усилием на подвеске колонны штанг по всему циклу качания можно просто освободиться от указанных недостатков. Таким образом, ставится задача определения функциональной зависимости между потребляемой мощностью электродвигателя и усилием, действующим на шток.

Решение задачи

Потребляемая мощность электродвигателя $N(\varphi)$ обуславливается в основном следующими двумя силами: $P_1(\varphi)$ — весом балансирующего груза и $P_2(\varphi)$ — усилием, действующим на шток. Наша цель — установление функциональной зависимости между потребляемой мощностью электродвигателя $N(\varphi)$ и усилием, действующим на шток $P_2(\varphi)$.

Введем систему координат, размещая ее начало на пересечении горизонтальной линии, проходящей через центр ведомого шкифа, и вертикальной линии, проходящей через оси поворота балансира качалки (рис. 1).

Пусть в произвольный момент t ($t \geq 0$) углы

$$\angle ECO = \alpha(t), \angle(\overrightarrow{CO}, \overrightarrow{BF}) = \varphi(t).$$

Для простоты изложения, в дальнейшем аргумент t явно указывать не будем и вместо $\alpha(t)$ и $\varphi(t)$ будем писать, соответственно, α и φ . Полагая

$$CE = R, EA = L, OB = H, AB = \lambda_1, BF = \lambda_2,$$

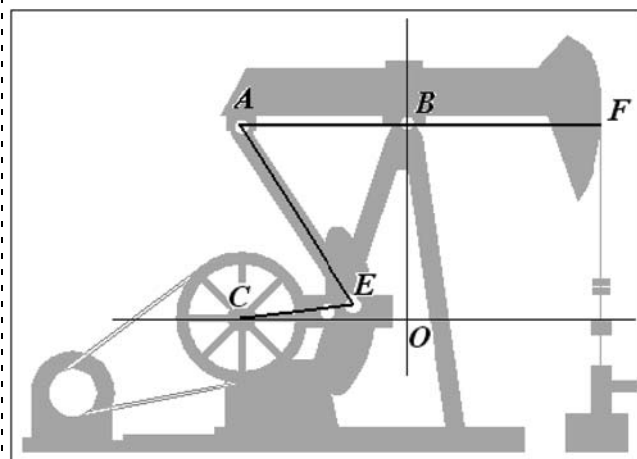


Рис. 1

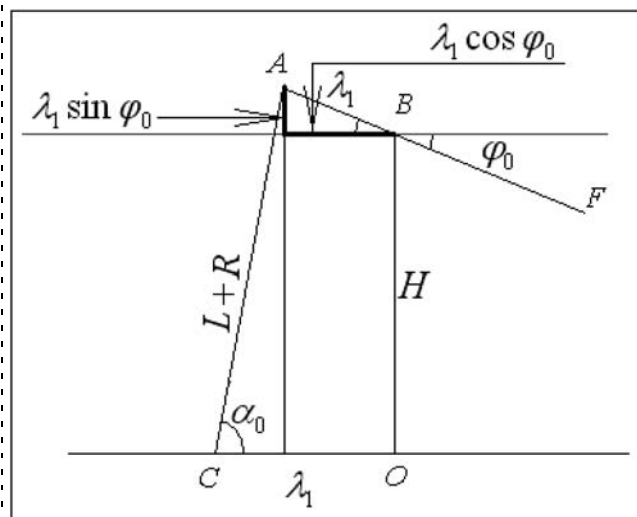


Рис. 2

определим координаты точек (рис. 2):

$$E(R\cos\alpha - \lambda_1, R\sin\alpha), B(0, H), A(-\lambda_1\cos\varphi, H + \lambda_1\sin\varphi).$$

Будем считать, что кривошипно-шатунный механизм вращается с постоянной угловой скоростью ω , т. е. $\alpha(t) = \omega t$. Проанализируем влияние вышеуказанных сил.

Можем считать, что вес балансирующего груза постоянный ($P_1(t) \equiv P_1$), действует на точку E , и, поскольку все соединения являются шарнирными, она не создает крутящего момента. Так как вертикальная составляющая скорости движения точки E равна $v_1(t) = \omega R\cos(\omega t)$, необходимая мощность для его движения составит

$$N_1(t) = P_1 v_1(t),$$

или

$$N_1(t) = P_1 \omega R \cos(\omega t). \quad (1)$$

Определим максимальный угол φ_0 , при котором шток находится в наиболее низком положении при $t = 0$ (рис. 2):

$$(\lambda_1 - \lambda_1 \cos \varphi_0)^2 + (H + \lambda_1 \sin \varphi_0)^2 = (L + R)^2.$$

Отсюда имеем

$$\lambda_1^2 - 2\lambda_1^2 \cos \varphi_0 + \lambda_1^2 \cos^2 \varphi_0 + H^2 + 2H\lambda_1 \sin \varphi_0 + \lambda_1^2 \sin^2 \varphi_0 = (L + R)^2;$$

$$2\lambda_1(H \sin \varphi_0 - \lambda_1 \cos \varphi_0) = (L + R)^2 - H^2 - 2\lambda_1^2;$$

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{(L + R)^2 - H^2 - 2\lambda_1^2}{2\lambda_1} + \operatorname{arctg} \frac{\lambda_1}{H}.$$

Вычислим значение $\alpha(t) = \alpha_0$ при $\varphi(t) = \varphi_0$. Так как $\cos \alpha_0 = \frac{\lambda_1 \sin \varphi_0 + H}{L + R}$, получаем

$$\alpha_0 = \arccos \frac{\lambda_1 \sin \varphi_0 + H}{L + R}.$$

Для вычисления мощности $N_2(t) = P_2(t)v_2(t)$ установим зависимость скорости движения штока от движения кривошипа. Установим связь между $\alpha = \alpha(t)$ и углом наклона балансира $\varphi = \varphi(t)$ (рис. 3). С этой целью сначала вычислим квадрат длины отрезка EA исходя из координат точек A и E : $(R \cos \alpha - \lambda_1 + \lambda_1 \cos \varphi)^2 + (R \sin \alpha - H - \lambda_1 \sin \varphi)^2$. Приравняв это выражение к L^2 , находим

$$\lambda_1^2 + R^2 \cos^2 \alpha - 2R\lambda_1 \cos \alpha + \lambda_1^2 \cos^2 \varphi - 2\lambda_1^2 \cos \varphi + 2R\lambda_1 \cos \alpha \cos \varphi + H^2 + \lambda_1^2 \sin^2 \varphi + R^2 \sin^2 \alpha + 2H\lambda_1 \sin \varphi - 2HR \sin \alpha - 2R\lambda_1 \sin \alpha \sin \varphi = L^2,$$

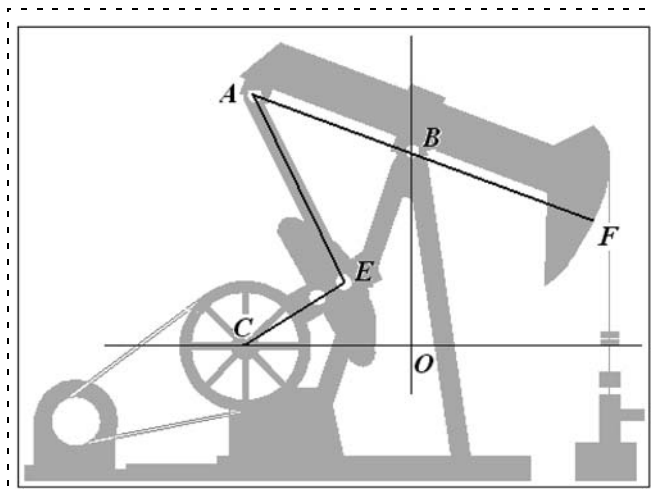


Рис. 3

или

$$\lambda_1^2 \cos \varphi - R\lambda_1 \cos \alpha \cos \varphi - H\lambda_1 \sin \varphi + R\lambda_1 \sin \alpha \sin \varphi = G^2 - R\lambda_1 \cos \alpha - HR \sin \alpha, \quad (2)$$

$$\text{где } G^2 = \frac{1}{2}(R^2 + H^2 - L^2) + \lambda_1^2.$$

Обозначим

$$a = \lambda_1(\lambda_1 - R \cos \alpha), \quad b = \lambda_1(R \sin \alpha - H);$$

$$f = G^2 - R\lambda_1 \cos \alpha - HR \sin \alpha, \quad c = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Тогда из (2) получаем

$$\varphi = \arccos \frac{f}{c} + \operatorname{arctg} \frac{b}{a}.$$

Очевидно, линейную скорость штанги $v_2(t) = \lambda_2 \frac{\partial \varphi(t)}{\partial t}$ можно определить, вычисляя $\frac{\partial \varphi(t)}{\partial t}$ по следующей формуле:

$$\frac{\partial \varphi(t)}{\partial t} = \frac{R}{\lambda_1} \left[\frac{(\lambda_1 \sin \alpha - H \cos \alpha) - \lambda_1 \sin(\alpha + \varphi)}{R \sin(\alpha + \varphi) - (\lambda_1 \sin \varphi + H \cos \varphi)} \right] \frac{d\alpha(t)}{dt}.$$

Учитывая вышесказанное, получим

$$v_2(t) = \frac{\lambda_2 R \omega}{\lambda_1} \left[\frac{(\lambda_1 \sin \alpha - H \cos \alpha) - \lambda_1 \sin(\alpha + \varphi)}{R \sin(\alpha + \varphi) - (\lambda_1 \sin \varphi + H \cos \varphi)} \right].$$

Теперь, учитывая, что $N(t) = N_1(t) + N_2(t)$ и представление $N_2(t) = P_2(t)v_2(t)$, можно написать следующую формулу, описывающую зависимости между $N(t)$ и $P_2(t)$:

$$N(t) = P_1 \omega R \cos(\omega t) + P_2(t) \frac{\lambda_2 R \omega}{\lambda_1} \left[\frac{(\lambda_1 \sin \alpha - H \cos \alpha) - \lambda_1 \sin(\alpha + \varphi)}{R \sin(\alpha + \varphi) - (\lambda_1 \sin \varphi + H \cos \varphi)} \right].$$

Отсюда для $P_2(t)$ окончательно получим:

$$P_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 R \omega} \left[\frac{R \sin(\alpha + \varphi) - (\lambda_1 \sin \varphi + H \cos \varphi)}{(\lambda_1 \sin \alpha - H \cos \alpha) - \lambda_1 \sin(\alpha + \varphi)} \right] \times (N(t) - P_1 \omega R \cos(\omega t)).$$

Выводы

Таким образом, получено аналитическое выражение зависимости между потребляемой мощностью электродвигателя от питающей сети и усилием на полированный шток во время работы станка качалки. Это выражение по измеренным мгновенным значениям мощности $N(\varphi)$ позволяет определить мгновенные значения усилия $P_2(\varphi)$ по всему периоду работы станка качалки и построить динамограмму, которая легче воспринимается обслуживающим персоналом нефтепромысла.

Список литературы

1. Нусратов О. К., Гулуев Г. А., Рзаев А. Г., Пашаев Ф. Г., Юсифов И. Б., Ризванов М. Г. Информационный комплекс измерения, мониторинга, диагностики и управления для нефтяных скважин, эксплуатирующихся штанговыми, глубинно-насосными установками // Известия НАНА. Серия физико-технич. и математич. наук, т. XXIX, № 6, 2009. С. 176—183.
2. Андреев В. В., Уразаков К. Р., Далимов В. У. и др. Справочник по добыче нефти / Под ред. К. Р. Уразакова. М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000. 374 с.
3. Брискин Е. С., Малолетов А. В., Лихобабин Д. О. Об управлении режимом работы скважинной штанговой насосной установки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 1. С. 40—44.
4. Абдуллаев Н. Т., Агагусейнов Н. Т., Антонов А. В. Ваттметрический метод диагностирования штанговых нефтяных установок // Изв. вузов. Сер. Нефть и газ. 1991, № 5. С. 76—80.
5. А. с. № 1784947 СССР, МКИ5 G 05 В 23/02. Способ диагностики штанговых насосных установок / Шутова И. А., Гольдштейн Е. И. № 4756453/24; Заявл. 01.11.89; Опубл. 30.12.92, Бюл. № 48.
6. Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А. А. Автоматический контроль и диагностика СШНУ. М.: Недра, 1988. 232 с.
7. Кричке В. О. Разработка и исследование метода и устройств дистанционного контроля работы глубинно-насосных установок по диаграммам мощности // Автореферат, Куйбышев, 1966. 16 с.
8. Aliev T. A. Digital noise monitoring of defect origin. London: Springer-Verlag, 2007. P. 223.
9. Алиев Т. А., Гулуев Г. А., Рзаев А. Г., Пашаев Ф. Г., Сагтаров И. Р., Казымов Н. Г. Комплекс измерения, мониторинга, диагностики и управления для нефтяных скважин, эксплуатирующихся штанговыми глубинными насосами // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2012, № 1. С. 54—59.

ИНФОРМАЦИЯ



23—24 марта 2013 г. в Ханчжоу (Китай) состоится

Международная конференция по мехатронике и системам автоматического управления — 2013 2013 International Conference on Mechatronics and Automatic Control Systems (ICMS 2013)

Конференция представляет собой форум для исследователей, преподавателей, инженеров и официальных лиц, имеющих отношение к мехатронике и системам автоматического управления, а также способствует распространению последних результатов научных исследований и обмену мнениями о будущих направлениях исследований в этих областях.

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

Системы механизации и автоматизации производства:

- Моделирование производственных процессов
- Компьютеризированные производственные системы
- CAD/CAM/CIM моделирование механической динамики
- Измерение вибрации и анализ надежности
- Диагностика неисправностей и теория технического обслуживания
- Интеллектуальная мехатроника и робототехника
- Элементы, конструкции, механизмы и применение микро- и наносистем
- PDM/ERP системы, логистика и управление поставками
- Разработка подвижных устройств и безопасность

Обработка сигналов:

- Теория обработки сигналов, методы адаптивной и слепой обработки сигналов
- Обработка изображений, видео и речевых сигналов
- Многоканальная обработка сигналов
- Обработка сигналов для анализа временных рядов
- Теория и анализ ошибок

Теория управления:

- Искусственный интеллект, интеллектуальная оптимизация и управление
- Моделирование систем управления
- Автоматизация взаимодействия системы «человек-машина»
- Промышленная автоматизация, управление технологическими процессами
- Управление компьютерными сетями
- Автомобильные системы управления и автономные транспортные средства

Подробная информация на сайте: www.myicms.org

ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах

№ 11
ноябрь
2012

Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БАРАНОВ Л. А.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ХИМЕНКО В. И.
ЧЕБУРАХИН И. Ф.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Кулифеев Ю. Б., Афанасьев Ю. Н.

Алгоритмизация автоматической посадки самолета в условиях метеоминимума 60

Сапунков Я. Г., Молоденков А. В.

Решение модифицированной задачи оптимального управления разворота космического аппарата 66

Ю. Б. Кулифеев, д-р техн. наук, проф.,

Ю. Н. Афанасьев, аспирант,
yuriafanasyev@mail.ru

ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Воронеж

Алгоритмизация автоматической посадки самолета в условиях метеоминимума

Рассматривается задача автоматического управления продольным движением летательного аппарата самолета для обеспечения автоматизации посадки в условиях метеоминимума, соответствующего категории III С ИКАО. Задача решается за счет управления поворотным стабилизатором и изменения тяги силовой установки. Проведена оценка работоспособности и эффективности предложенного алгоритма.

Ключевые слова: алгоритмы автоматической посадки самолета, вычисление заданных перегрузок, вычисление заданного угла отклонения стабилизатора, вычисление заданной тяги силовой установки

Постановка задачи

Посадка сверхзвукового самолета является сложным и потенциально опасным завершающим этапом полета. Успех выполнения посадки зависит от таких факторов, как летные характеристики самолета данного типа, возможности бортового оборудования, используемого для обеспечения посадки, характеристики аэродрома, возможности аэродромных систем посадки, метеоусловия в районе посадки и, конечно, в существенной степени — от летного мастерства экипажа.

Применение систем автоматической посадки вплоть до полной остановки самолета существенно повышает безопасность завершающего этапа его полета. Особенно актуально использование автоматической посадки в сложных метеоусловиях, характеризующихся низкой облачностью, осадками в виде дождя и снега, туманом, а также наличием ветровых возмущений.

В данной статье рассматривается задача автоматизации посадки в условиях метеоминимума, соответствующего категории III С ИКАО. Решение данной задачи ограничено рамками продольного канала управления в условиях полной информации о параметрах движения самолета.

Рассмотрим возможный подход при разработке алгоритмов управления для цифровой системы автоматической посадки вплоть до полной остановки самолета.

При разработке алгоритмов потребуем, чтобы параметры движения самолета при автоматической посадке практически соответствовали параметрам, имеющим место в режиме ручного пилотирования для самолетов типа МиГ-29.

Снижение самолета после выхода в створ ВПП происходит по прямой глиссаде. Прямой участок глиссады может быть реализован как физическим способом с использованием радиотехнических средств, так и виртуальным способом. В последнем случае в память бортовой ЭВМ должны быть записаны пространственные координаты глиссады с привязкой их к конкретному аэродрому посадки. Положение самолета относительно виртуальной глиссады будет известно, если известны координаты его пространственного движения, определяемые, например, с помощью спутниковой навигационной системы.

Участок посадки при выравнивании в режиме ручного пилотирования обеспечивается летчиком. При автоматической посадке траектория движения самолета при выравнивании будет задаваться в виде пространственной виртуальной кривой.

Таким образом, требуемая траектория посадки, задаваемая как виртуальная глиссада, будет состоять из прямого участка снижения с углом наклона $\theta_{\text{гл}}$ и кривой выравнивания.

Участок глиссады прямолинейного снижения определяется высотой входа в глиссаду $H_{\text{гл.вх.прям}}$ и углом наклона прямого участка глиссады $\theta_{\text{гл}}$.

Переход с прямого участка глиссады на траекторию выравнивания происходит на заданной высоте начала выравнивания.

В работе [1] предлагается кривую выравнивания при автоматической посадке задавать экспонентой следующего вида:

$$H_{\text{гл.выр}} = H_{\text{н.выр}} \exp\left(-\frac{\text{tg}\theta_{\text{гл}}}{H_{\text{н.выр}}} s\right), \quad (1)$$

где $H_{\text{н.выр}}$ — заданная высота начала выравнивания; s — пройденный путь вдоль оси ВПП в процессе выравнивания, т. е. при условии $H_{\text{гл}} = H_{\text{н.выр}}$ полагается $s = 0$.

Таким образом, экспоненциальная кривая выравнивания задается только точкой в начале процесса выравнивания и определяется двумя параметрами: углом наклона глиссады $\theta_{\text{гл}}$ и высотой начала выравнивания $H_{\text{н.выр}}$.

При условии, что угол $\theta_{\text{гл}} = \text{const}$, единственным варьируемым параметром является высота $H_{\text{н.выр}}$. Поэтому воздушный путь при снижении самолета до высоты касания колесами ВПП и вертикальная скорость в момент касания оказываются взаимосвязанными и зависящими от значения высоты $H_{\text{н.выр}}$ величинами. При малых значениях вертикальной скорости самолета в момент касания точка касания колесами поверхности ВПП будет значительно удалена от начала ВПП, а при приземлении ближе к началу ВПП будет большая по модулю вертикальная скорость касания $V_{\text{укас}} < 0$.

С учетом указанного выше недостатка экспоненциального выравнивания кривую выравнивания будем задавать в виде полинома третьего порядка,

определяющего зависимость высоты полета от пройденного пути s вдоль оси ВПП:

$$H_{\text{гл.выр}} = \sum_{k=0}^3 a_k s^k. \quad (2)$$

Для определения четырех коэффициентов полинома используем краевые условия, налагаемые на траекторию выравнивания. Кривая выравнивания будет начинаться в точке начала выравнивания с высотой $H_{\text{н.выр}}$ и иметь угол наклона $\theta_{\text{гл}}$. В этой точке будем полагать значение $s = 0$. Заканчиваться кривая выравнивания должна на высоте $H_{\text{кас}}$ в точке касания колесами основных стоек шасси поверхности ВПП, координата которой $s_{\text{кас}}$ определяется выражением

$$s_{\text{кас}} = s_1 - s_{\text{гл}} + s_{\text{зад}}, \quad (3)$$

где $s_1 = \frac{H_{\text{н.выр}}}{\text{tg}\theta_{\text{гл}}}$, $s_{\text{гл}} = 50 \dots 60$ м, $s_{\text{зад}}$ — заданное рас-

стояние точки касания от начала ВПП. Формулу (3) поясняет рис. 1.

Наконец, в качестве четвертого условия для определения кривой выравнивания потребуем, чтобы в точке касания угол наклона траектории был равен нулю:

$$\frac{\partial H_{\text{гл.выр}}}{\partial s}(s_{\text{кас}}) = 0. \quad (3.1)$$

Таким образом, кривая выравнивания заканчивается в точке касания на высоте $H_{\text{кас}}$ при выполнении условия (3.1).

Два начальных и два конечных условия определяют коэффициенты кривой выравнивания:

$$a_0 = H_{\text{н.выр}}, \quad a_1 = -\text{tg}\theta_{\text{гл}}, \quad a_2 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad a_3 = \frac{\Delta_2}{\Delta},$$

где

$$\Delta = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21};$$

$$\Delta_1 = b_1a_{22} - b_2a_{12};$$

$$\Delta_2 = b_2a_{11} - b_1a_{21};$$

$$a_{11} = s_{\text{кас}}^2, \quad a_{12} = a_{11}s_{\text{кас}}, \quad a_{21} = 2s_{\text{кас}}, \quad a_{22} = 3a_{11},$$

$$b_1 = \text{tg}\theta_{\text{гл}}s_{\text{кас}} - H_{\text{н.выр}} + H_{\text{кас}}, \quad b_2 = \text{tg}\theta_{\text{гл}}.$$

Таким образом, для построения траектории выравнивания должны быть заданы четыре параметра: $\theta_{\text{гл}}$, $H_{\text{н.выр}}$, $H_{\text{кас}}$ и $s_{\text{кас}}$.

Высота $H_{\text{кас}}$ — это расстояние от центра тяжести самолета до поверхности ВПП в момент касания основными колесами ВПП, которое определяется

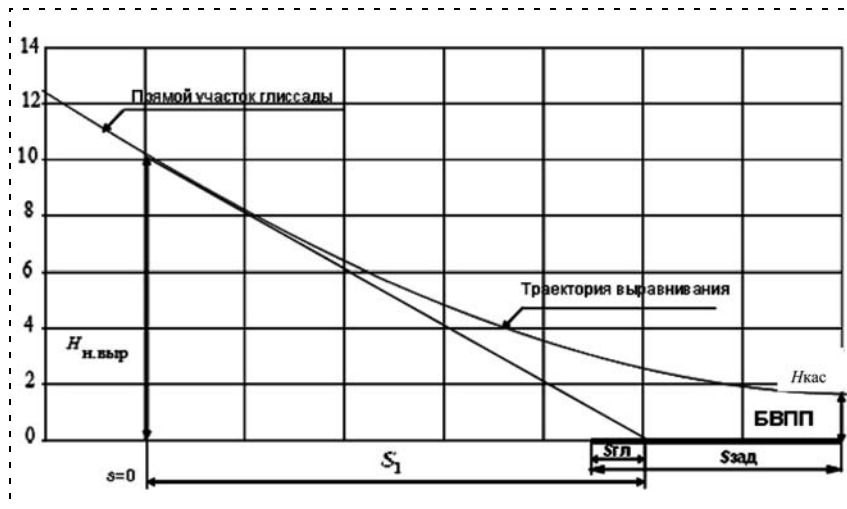


Рис. 1. Заданная траектория выравнивания

геометрическими параметрами самолетного шасси и углом тангажа (атаки) в момент касания ВПП. Значение посадочного угла атаки при одном и том же значении скорости, в свою очередь, зависит от массы самолета на момент посадки.

Таким образом, заданная траектория полной посадки состоит из траектории прямолинейного снижения по глиссаде и криволинейного участка выравнивания, заданного полиномом (2).

Если глиссада имеет виртуальный характер, то признаком входа в глиссаду и начала снижения по прямому ее участку будет сигнал достижения самолетом оставшейся дальности $D_{\text{вход}}$ до начала ВПП:

$$D_{\text{вход}} = H_{\text{гл.вх.прям}}/\text{tg}\theta_{\text{гл}} - S_{\text{гл}}.$$

В процессе посадки с уменьшением высоты происходит также и уменьшение скорости полета.

Задача автоматического управления состоит в реализации в процессе посадки заданной с помощью виртуальной глиссады высоты полета и заданной скорости полета. Будем полагать, что заданная скорость в ходе посадки меняется в зависимости от пройденного пути по линейному закону от значения $V_{\text{гл.вх.прям}}$ до значения $V_{\text{кас}}$ в момент касания основных колес поверхности ВПП.

Для управления высотой полета используется поворотный стабилизатор (или руль высоты), а заданная скорость полета реализуется через автомат тяги силовой установки.

Кроме непрерывного управления стабилизатором и тягой силовой установки в процессе посадки выдаются также дискретные сигналы управления механизацией крыла, выпуском шасси, а также сигналы включения тормозной системы колес шасси.

В качестве метода для синтеза алгоритмов автоматического управления использовали метод обратных задач динамики [2, 4]. Рассмотрим особенность применения этого метода к задаче автоматической посадки самолета на наземный аэродром.

Алгоритмы автоматического управления высотой и скоростью в процессе полной посадки самолета

Автоматическое управление высотой полета в процессе посадки сводится к задаче отслеживания виртуальной глассады, высота которой жестко привязана к расстоянию до начала ВПП. При этом управление скоростью заключается в отслеживании некоторой программы изменения скорости полета в процессе снижения самолета по глассаде.

Эти две задачи управления самолетом на посадке решаются одновременно и на траекторном, и на пилотажном уровнях. На траекторном уровне определяются требуемые перегрузки по скоростным осям самолета, необходимые для реализации заданных значений высоты и скорости полета на посадке. На пилотажном уровне осуществляется реализация требуемых перегрузок путем изменения угла поворота стабилизатора и тяги двигателей силовой установки самолета. Необходимое изменение тяги осуществляется автоматом тяги, перемещающим рычаги управления двигателями силовой установки самолета.

Рассмотрим принципы построения алгоритмов, реализующих автоматическое управление самолетом в процессе полной посадки на наземный аэродром.

Алгоритмы вычисления требуемых перегрузок

Вычисление заданных значений продольной и вертикальной перегрузок $n_{xa_зад}$ и $n_{ya_зад}$, определенных в скоростной системе координат, осуществляется с использованием метода обратных задач динамики. Алгоритм, полученный с использования данного метода синтеза, позволяет, зная заданные высоту $H_{зад}$ и скорость $V_{зад}$, фактические высоту H , скорость V и угол наклона траектории θ , получить заданные (требуемые) значения продольной и вертикальной перегрузок.

Порядок вычисления заданного (требуемого) значения продольной перегрузки $n_{xa_зад}$ состоит в следующем.

Как известно, движение самолета в скоростной системе координат в продольном канале описывается уравнениями вида [3]

$$\begin{cases} \dot{V} = g(n_{xa} - \sin\theta); \\ \dot{\theta} = \frac{g(n_{ya} - \cos\theta)}{V}; \\ \dot{H} = V\sin\theta. \end{cases} \quad (4)$$

Пусть $\varepsilon = V - V_{зад}(s)$, где ε — отклонение текущей скорости полета от заданной скорости. В рассматриваемом случае посадки самолета скорость $V_{зад}$ зависит от расстояния s , которое осталось до переднего края взлетно-посадочной полосы.

В соответствии с методом обратных задач динамики потребуем, чтобы выполнялось условие, заданное дифференциальным уравнением

$$\dot{\varepsilon} + \lambda_{0V}\varepsilon = 0.$$

Тогда после подстановки имеем

$$(\dot{V} - \dot{V}_{зад}) + \lambda_{0V}(V - V_{зад}) = 0. \quad (5)$$

Используя первое уравнение системы (4), получим

$$g(n_{xa} - \sin\theta) - \dot{V}_{зад}(s(t)) + \lambda_{0V}(V - V_{зад}(s(t))) = 0, \quad (6)$$

где $\dot{V}_{зад}(s(t)) = \frac{\partial V_{зад}(s)}{\partial s} \frac{ds}{dt}$, а s — расстояние до переднего края ВПП.

Из соотношения (6) получим выражение для определения заданной (требуемой) продольной перегрузки:

$$n_{xa_зад} = \sin\theta + \frac{1}{g}(\dot{V}_{зад}(s(t)) - \lambda_{0V}(V - V_{зад}(s(t)))). \quad (7)$$

Получим теперь выражение для определения заданной (требуемой) вертикальной перегрузки $n_{ya_зад}$.

Пусть $\varepsilon = H - H_{зад}(s)$, где ε — отклонение текущей высоты полета от заданной высоты. В рассматриваемом случае посадки самолета высота $H_{зад}$ зависит от расстояния s , которое осталось до переднего края ВПП.

Потребуем выполнения условия $\ddot{\varepsilon} + \lambda_{1H}\dot{\varepsilon} + \lambda_{0H}\varepsilon = 0$, что соответствует условию

$$\begin{aligned} (\ddot{H} - \ddot{H}_{зад}) + \lambda_{1H}(\dot{H} - \dot{H}_{зад}) + \\ + \lambda_{0H}(H - H_{зад}) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Продифференцировав по времени третье уравнение системы (4), получим следующее выражение второй производной для высоты полета:

$$\ddot{H} = d(V\sin\theta)/dt = \dot{V}\sin\theta + V\cos\theta\dot{\theta}.$$

Заменив производные \dot{V} и $\dot{\theta}$ их выражениями из первого и второго уравнений системы (4) соответственно, получим

$$\begin{aligned} \ddot{H} = g(n_{xa} - \sin\theta)\sin\theta + g(n_{ya} - \cos\theta)\cos\theta = \\ = g(n_{xa}\sin\theta + n_{ya}\cos\theta - 1). \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} (g(n_{xa}\sin\theta + n_{ya}\cos\theta - 1) - \ddot{H}_{зад}) + \\ + \lambda_{1H}(\dot{H} - \dot{H}_{зад}) + \lambda_{0H}(H - H_{зад}) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Соотношение (9) позволяет определить требуемую (заданную) вертикальную перегрузку $n_{ya_зад}$. При этом надо учитывать, что и продольная перегрузка при этом должна также иметь требуемое значение, вычисляемое по формуле (7). С учетом этого получим следующую формулу для вычисления заданной (требуемой) вертикальной перегрузки:

$$\begin{aligned} n_{ya_зад} = -n_{xa_зад}\text{tg}\theta + \frac{1}{\cos\theta} \left(1 + \frac{1}{g}(\ddot{H}_{зад} - \right. \\ \left. - \lambda_{1H}(\dot{H} - \dot{H}_{зад}) - \lambda_{0H}(H - H_{зад})) \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Полученные выражения (7) и (10) для перегрузок $n_{xa_зад}$ и $n_{ya_зад}$ далее используются для определения заданных (требуемых) значений угла отклонения стабилизатора $\varphi_{зад}$ и тяги силовой установки $R_{cy_зад}$.

Алгоритм вычисления заданного угла отклонения стабилизатора

Алгоритм вычисления заданного угла отклонения стабилизатора $\varphi_{зад}$ построен также на основе метода обратных задач динамики. Этот алгоритм реализует закон управления в контуре вертикальной перегрузки.

Пусть $\varepsilon = n_{ya} - n_{ya_зад}$, где ε — отклонение текущей вертикальной перегрузки от заданной перегрузки. Потребуем, чтобы выполнялось условие

$$\ddot{\varepsilon} + \lambda_{1n_y} \dot{\varepsilon} + \lambda_{0n_y} \varepsilon = 0. \quad (11)$$

Тогда

$$(\ddot{n}_{ya} - \ddot{n}_{ya_зад}) + \lambda_{1n_y} (\dot{n}_{ya} - \dot{n}_{ya_зад}) + \lambda_{0n_y} (n_{ya} - n_{ya_зад}) = 0. \quad (12)$$

Примем допущение, что в течение времени дискретности работы алгоритма

$$\ddot{n}_{ya_зад} = \dot{n}_{ya_зад} = 0.$$

Для определения первой и второй производных от текущего значения вертикальной перегрузки воспользуемся ее выражением в следующем виде:

$$n_{ya} = \frac{R_{cy} \sin(\alpha + \varphi_{дв}) + (C_y^\alpha \alpha + C_y^\varphi \varphi) q S_{кр}}{G},$$

где $(C_y^\alpha \alpha + C_y^\varphi \varphi) q S_{кр} = Y$ — значение подъемной силы самолета, φ — угол отклонения стабилизатора, а $\varphi_{дв}$ — угол установки двигателей.

Будем полагать, что $C_y^\varphi \varphi = 0$. Таким образом, для упрощения алгоритма не будем учитывать влияние на перегрузку n_{ya} угла отклонения стабилизатора φ .

Найдем первую и вторую производные вертикальной перегрузки n_{ya} :

$$\dot{n}_{ya} = \frac{R_{cy}}{G} \left[\cos(\alpha + \varphi_{дв}) + \frac{C_y^\alpha q S_{кр}}{R_{cy}} \right] \dot{\alpha};$$

$$\ddot{n}_{ya} = \frac{R_{cy}}{G} \left[-\sin(\alpha + \varphi_{дв}) \dot{\alpha}^2 + \left(\cos(\alpha + \varphi_{дв}) + \frac{C_y^\alpha q S_{кр}}{R_{cy}} \right) \ddot{\alpha} \right].$$

Здесь $\alpha = \vartheta - \theta$ — угол атаки, первая и вторая производные которого будут определяться следующим образом:

$$\ddot{\alpha} = \omega_z - \dot{\theta} = \omega_z - \frac{g}{V} (n_{ya} - \cos\theta);$$

$$\ddot{\alpha} = \dot{\omega}_z - \ddot{\theta} = \dot{\omega}_z.$$

Для упрощения вычислений в силу малости производной $\dot{\theta}$ в сравнении с величиной $\dot{\omega}_z$ сделано допущение, что $\ddot{\theta} = 0$.

В таком случае выражение для определения второй производной вертикальной перегрузки будет иметь следующий вид:

$$\ddot{n}_{ya} = \frac{R_{cy}}{G} \left[-\sin(\alpha + \varphi_{дв}) \dot{\alpha}^2 + \left(\cos(\alpha + \varphi_{дв}) + \frac{C_y^\alpha q S_{кр}}{R_{cy}} \dot{\omega}_z \right) \right]. \quad (13)$$

Из формулы (13) получим выражение для углового ускорения $\dot{\omega}_z$ при вращении самолета вокруг оси Oz :

$$\dot{\omega}_z = \frac{\frac{G}{R_{cy}} \ddot{n}_{ya} + \sin(\alpha + \varphi_{дв}) \dot{\alpha}^2}{\cos(\alpha + \varphi_{дв}) + \frac{C_y^\alpha q S_{кр}}{R_{cy}}}. \quad (14)$$

В формулу (14) для определения углового ускорения $\dot{\omega}_z$ следует подставлять значение второй производной вертикальной перегрузки, найденное из условия (12):

$$\ddot{n}_{ya} = -(\lambda_{1n_y} \dot{n}_{ya} + \lambda_{0n_y} (n_{ya} - n_{ya_зад})).$$

Коэффициент продольного аэродинамического момента связан с угловым ускорением $\dot{\omega}_z$ соотношением

$$m_z = \frac{J \dot{\omega}_z + y_{дв} R_{cy}}{q S_{кр} b_a},$$

где $y_{дв}$ — величина, значение которой равно длине перпендикуляра, опущенного из центра масс самолета на вектор тяги, а знак определяется положением двигателя относительно центра масс самолета. Если двигатель находится ниже центра масс самолета, то $y_{дв} < 0$.

Вместе с тем, поскольку зависимость коэффициента продольного аэродинамического момента от угла поворота стабилизатора определяется выражением

$$m_z = m_{z0} + m_z^\alpha \alpha + m_z^\varphi \varphi + m_z^{\bar{\omega}_z} \bar{\omega}_z,$$

то заданный угол отклонения стабилизатора будет задаваться соотношением

$$\varphi_{\text{зад}} = \frac{m_z - (m_{z0} + m_z^\alpha \alpha + m_z^{\bar{\omega}_z} \omega_z \frac{b_a}{V})}{m_z^\varphi}. \quad (15)$$

Заданное значение угла отклонения стабилизатора $\varphi_{\text{зад}}$ отрабатывается приводом поворотного стабилизатора.

Алгоритм вычисления и реализации заданной тяги силовой установки

Заданная тяга силовой установки вычисляется по формуле

$$R_{\text{су_зад}} = (n_{\text{ха_зад}} mg + C_{\text{ха}} q S_{\text{кр}}) \cdot \frac{1}{\cos(\alpha + \varphi_{\text{дв}})}, \quad (16)$$

где m — масса самолета; g — ускорение свободного падения; $C_{\text{ха}}$ — аэродинамический коэффициент силы лобового сопротивления; $S_{\text{кр}}$ — площадь крыла самолета; $\varphi_{\text{дв}}$ — угол установки двигателей; q — скоростной напор.

Реализация заданной тяги силовой установки осуществляется путем соответствующего перемещения РУД.

В данном алгоритме в силу существенного различия частотных свойств самолета по каналу скорости и частотных свойств двигателей по тяге использовали статическую математическую модель двигателей силовой установки, а именно, статическую линию рабочих режимов двигателя для приведенных параметров его работы. С этой целью была решена задача обращения функции, связывающей значения выходного импульса тяги с углом поворота РУД в установившемся режиме работы двигателя и в приведенных условиях.

Апробация алгоритмов автоматической посадки методом математического моделирования

В целях проверки работоспособности алгоритма автоматической посадки было выполнено численное моделирование посадки самолета истребителя на сухую бетонную ВПП.

Предварительно самолет был выведен на высоту 250 м и совершал установившийся горизонтальный полет со скоростью 320 км/ч. Точка касания основными колесами поверхности ВПП была задана на расстоянии 100 м от начала ВПП.

Отсчет времени полета t и пройденного пути X_g будем вести от точки выхода самолета на траверс ВПП. Процесс полета до этой точки маршрута рассматривать не будем.

На рис. 2 показано изменение скорости и высоты полета в процессе полной посадки. Поясним приведенные на этом рисунке графики.

При $t = 60$ с и $X_g = 4800$ м осуществлен выпуск носков и закрылков. Реакцией на это было увеличение высоты полета на 6,5 м ($5000 < X_g < 6000$ м), которое далее было устранено. В точке выхода на прямой участок глиссады ($t = 75$ с, $X_g = 6160$ м) самолет имел заданные параметры полета $V = 320$ км/ч и $H = 250$ м.

По прямому участку глиссады снижение проводилось до точки начала выравнивания с постепенным уменьшением скорости полета. Выравнивание началось на высоте 10 м при скорости 250 км/ч, при этом $t = 140$ с и $X_g = 11300$ м, а угол тангажа имел значение $10,3^\circ$. Таким образом, снижение по прямой происходило на участке длиной 5140 м.

Процесс выравнивания закончился в точке касания ($X_g = 11650$ м) и длился 5 с.

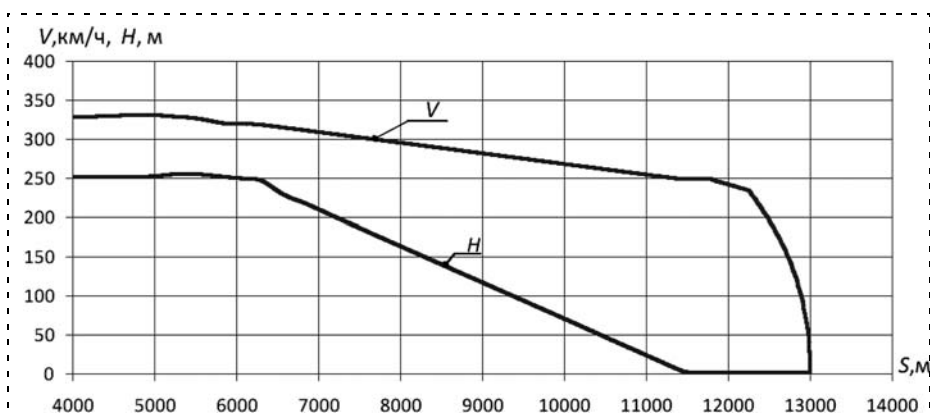


Рис. 2. Изменение скорости и высоты полета в процессе полной посадки

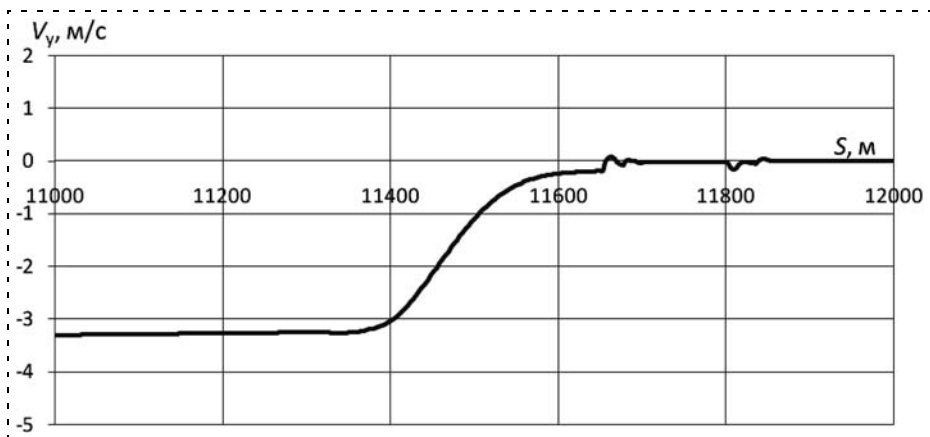


Рис. 3. Изменение вертикальной скорости на участке выравнивания

Высота центра массы самолета над поверхностью ВПП составляла 1,74 м. После касания основными колесами за счет управления стабилизатором осуществлялось опускание носа самолета до контакта носового колеса с поверхностью ВПП, уборка носков и закрылков, а также перевод двигателей на режим малого газа. Торможение начиналось автоматически при значении скорости 235 км/ч.

Весь наземный участок качения самолета по ВПП до его остановки составил 1350 м ($X_g = 13\ 000$ м), что соответствует данным, приводимым в инструкции летчику для самолета данного типа.

На рис. 3 показан график изменения вертикальной скорости самолета при снижении на последнем участке прямой глиссады, на участке выравнивания и в момент касания самолетом ВПП.

Как видно из графика, при снижении на последнем участке прямой глиссады вертикальная скорость была равна $-3,3$ м/с, а в точке касания ($X_g = 11\ 650$ м) вертикальная скорость имела значение $-0,2$ м/с. При таком плавном касании ВПП вертикальная перегрузка n_{ya} была больше единичного значения на величину 0,13 е. п.

На рис. 4 представлен график изменения угла атаки самолета в процессе полной посадки.

Как видно из графика, при $t = 75$ с начался процесс перехода из горизонтального полета на участок снижения по прямой глиссаде, что и привело к колебанию угла атаки в этом процессе. При снижении по глиссаде угол атаки постепенно увеличивался, компенсируя уменьшение скорости полета с 320 км/ч до значения 250 км/ч, и достигал максимального значения 14° .

В процессе выравнивания траектории угол атаки монотонно уменьшался и в точке касания имел значение $9,3^\circ$ ($t = 145$ с). На рис. 5 показано изменение угла поворота стабилизатора в процессе выравнивания траектории и качения по ВПП.

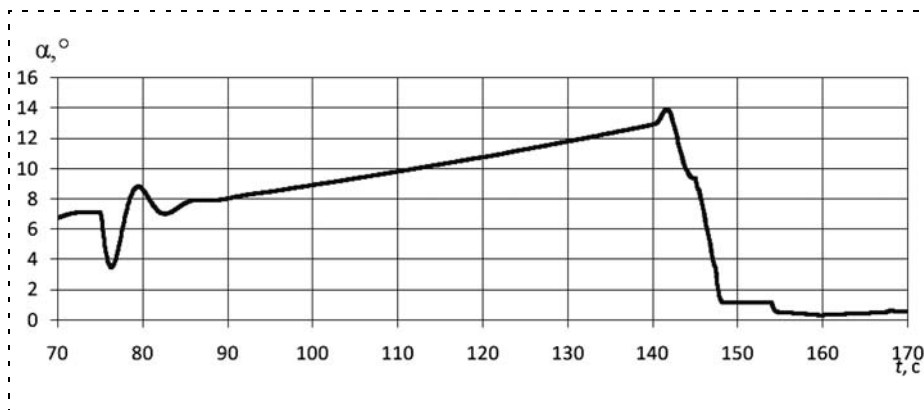


Рис. 4. Изменение угла атаки в процессе полной посадки

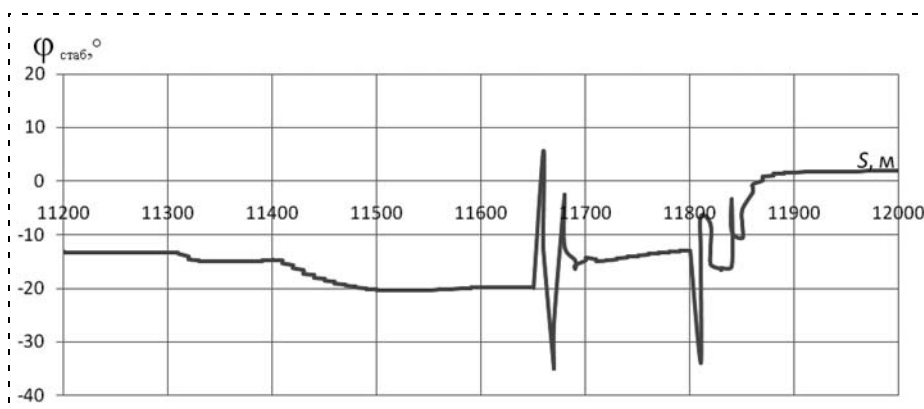


Рис. 5. Изменение угла поворота стабилизатора на участке выравнивания и качения по ВПП

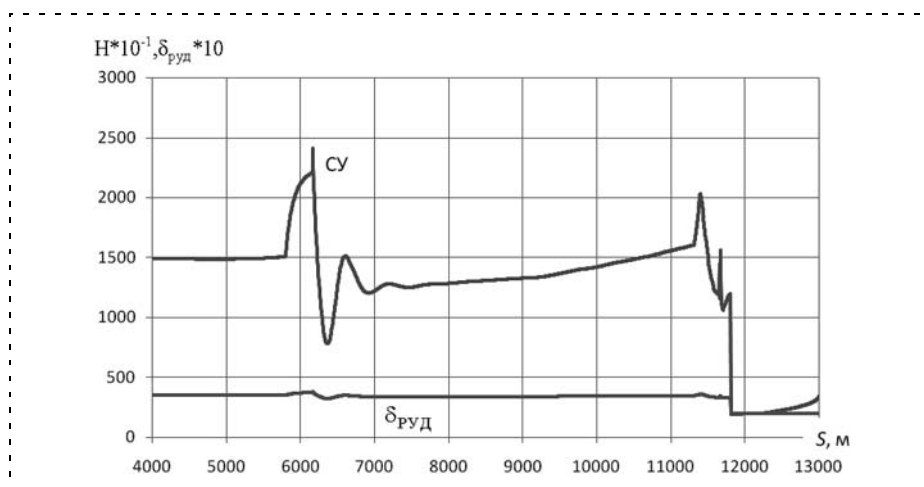


Рис. 6. Изменение угла поворота РУД и тяги СУ в процессе посадки

Интенсивная работа стабилизатора наблюдается в момент, предшествующий касанию ВПП, и в момент опускания носовой стойки.

Работу привода стабилизатора не моделировали, но ограничивали максимальную скорость поворота стабилизатора значением $30^\circ/\text{с}$ при ограничении углов поворота диапазоном $(-35...+15^\circ)$.

На рис. 6 показано изменение угла поворота РУД и соответствующее изменение тяги силовой установки в процессе посадки.

Активная работа автомата тяги наблюдается при выходе на посадочную глиссаду, а также при завершении режима выравнивания. На участке торможения при постоянном значении угла поворота РУД ($\delta_{\text{РУД}} = 20^\circ$) наблюдается незначительный рост тяги, обусловленный падением скорости самолета при его торможении. Остановка самолета происходит за счет его удерживания тормозами основных колес шасси.

Список литературы

1. Котик М. Г. Динамика взлета и посадки самолетов. М.: Машиностроение, 1984.
2. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. М.: Наука, 1987.
3. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов / Под общ. ред. Г. С. Бюшгенса. М.: Наука. Физматлит, 1998.
4. Пухов А. Л., Толочков В. И., Филимонов Н. Б. Компьютерная сертификация посадочного маневра сверхзвукового пассажирского самолета ТУ-144. М.: Изд-во ОАО "Туполев", 2001. 51 с.

УДК 629.78

Я. Г. Сапунков, канд. физ.-мат. наук, доц.,
А. В. Молоденков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
 iptmuran@san.ru
 Институт проблем точной механики
 и управления РАН, г. Саратов

Решение модифицированной задачи оптимального разворота космического аппарата*

Рассматривается задача оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота космического аппарата как твердого тела со сферическим распределением масс, без ограничения на функцию управления при произвольных граничных условиях. Для модифицированной постановки задачи получено новое аналитическое решение в классе обобщенных конических движений. Даются примеры расчетов.

Ключевые слова: оптимальное управление, космический аппарат, сферически симметричное твердое тело, произвольные граничные условия

Введение. Построение управления угловым движением космического аппарата (КА) как твердого тела в традиционной постановке включает задачи программного углового движения (разворота), программного управления и построения управления, стабилизирующего программу углового движения в малом. Задача построения программного углового движения и программного управления во многих случаях решается с помощью методов теории оптимального управления. Точное аналитическое решение этой задачи для наиболее часто используемых функционалов оптимизации при произвольных граничных условиях по угловому положению и угловой скорости КА не найдено даже в случае сферической симметрии КА, не говоря уже о его произвольной динамической конфигурации. Известны лишь некоторые частные случаи решения задачи (например, [1–8]), при этом для сферически симметричных КА эти решения получены в классе плоских эйлеровых разворотов. По-

этому решение задачи оптимального разворота КА (твердого тела) в замкнутой форме при произвольных граничных условиях даже при ее модификации имеет не только теоретический, но и большой практический интерес, так как позволяет использовать на борту КА готовые законы программного управления и изменения оптимальной траектории.

В статье предлагается аналитическое решение модифицированной задачи оптимального разворота сферически симметричного КА при произвольных граничных условиях по угловому положению и угловой скорости КА. Решение задачи получено в классе обобщенных конических движений, векторов оптимальной угловой скорости и оптимального управления КА, переменных по модулю. Приводятся числовые примеры.

Статья продолжает исследования, начатые в работе [9].

1. Постановка традиционной задачи. Движение сферически симметричного КА вокруг центра масс описывается уравнениями [1]

$$2\Lambda^\bullet = \Lambda \circ \omega; \quad (1)$$

$$\omega^\bullet = M, \quad (2)$$

где $\Lambda(t) = \lambda_0(t) + \lambda_1(t)\mathbf{i}_1 + \lambda_2(t)\mathbf{i}_2 + \lambda_3(t)\mathbf{i}_3$ (кватернион поворота КА), $\omega(t) = \omega_1(t)\mathbf{i}_1 + \omega_2(t)\mathbf{i}_2 + \omega_3(t)\mathbf{i}_3$ (вектор угловой скорости КА) — фазовые координаты и $M(t) = [M_1(t), M_2(t), M_3(t)]^T$ — управление подчинены известным требованиям ($\Lambda(t)$, $\omega(t)$ — непрерывные функции, $M(t)$ — кусочно-непрерывная функция); кватернион $\Lambda(t)$ нормирован, т. е. $\|\Lambda\| = \lambda_0^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1$; $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$ — орты гиперкомплексного пространства (мнимые единицы Гамильтона); символ "o" означает кватернионное умножение. В динамических уравнениях Эйлера для сферически симметричного твердого тела (2) тензор инерции без ограничения общности положен единичным.

Заданы произвольные граничные условия по угловому положению

$$\Lambda(0) = \Lambda_0, \Lambda(T) = \Lambda_T \quad (3)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-01-00165).

и угловой скорости КА

$$\omega(0) = \omega_0, \omega(T) = \omega_T. \quad (4)$$

Необходимо определить оптимальное управление $\mathbf{M}^{\text{опт}}(t)$ системой (1), (2) при граничных условиях (3), (4), доставляющее минимум функционалу

$$J = \int_0^T (M_1^2 + M_2^2 + M_3^2) dt, \quad (5)$$

где время T произвольно и зафиксировано.

Такую задачу будем называть *задачей оптимального разворота КА в традиционной постановке*.

2. Переход к безразмерным переменным. Перейдем от размерных переменных задачи к безразмерным по формулам

$$t^{\text{безраз}} = t^{\text{раз}}/T, \omega^{\text{безраз}} = \omega^{\text{раз}} T, \\ \mathbf{M}^{\text{безраз}} = \mathbf{M}^{\text{раз}} T^2, J^{\text{безраз}} = J^{\text{раз}} T^3,$$

при этом вид формул (1)—(4) не изменится, а функционал (5) запишется следующим образом:

$$J = \int_0^1 (M_1^2 + M_2^2 + M_3^2) dt. \quad (6)$$

Далее будем иметь в виду постановку задачи (1)—(4) (где $T = 1$), (6) в безразмерных переменных, и верхние индексы у них будут опущены.

3. Модифицированная задача оптимального разворота КА. Движение КА как твердого тела со сферическим распределением масс по-прежнему описывается соотношениями (1)—(4).

Для кватернионного дифференциального уравнения (1) при условии, что вектор угловой скорости $\omega(t)$ задается выражением

$$\omega(t) = \mathbf{i}_1 \frac{df}{dt} \sin g(t) + \mathbf{i}_2 \frac{df}{dt} \cos g(t) + \mathbf{i}_3 \frac{dg}{dt}, \quad (7)$$

в котором $f(t)$ и $g(t)$ — произвольные функции времени, известно решение [10], удовлетворяющее начальному условию (3):

$$\Lambda(t) = \Lambda_0 \circ \exp\{-\mathbf{i}_3 g(0)/2\} \circ \exp\{-\mathbf{i}_2 f(0)/2\} \circ \\ \circ \exp\{\mathbf{i}_2 f(t)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3 g(t)/2\}. \quad (8)$$

Выражение (7) и решение (8) можно обобщить, добавив поворот на постоянный угол вокруг некоторой оси. Такой поворот задается с помощью кватерниона \mathbf{K} , $\|\mathbf{K}\| = 1$. Тогда вектор ω и кватернион Λ будут определяться соотношениями

$$\omega = \tilde{\mathbf{K}} \circ \left(\mathbf{i}_1 \frac{df}{dt} \sin g(t) + \mathbf{i}_2 \frac{df}{dt} \cos g(t) + \mathbf{i}_3 \frac{dg}{dt} \right) \circ \mathbf{K}; \quad (9)$$

$$\Lambda = \Lambda_0 \circ \tilde{\mathbf{K}} \circ \exp\{-\mathbf{i}_3 g(0)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_2 (f(t) - f(0))/2\} \circ \\ \circ \exp\{\mathbf{i}_3 g(t)/2\} \circ \mathbf{K}. \quad (10)$$

Следует отметить, что если в формулах (9), (10) положить $f(t) = \alpha t$, $g(t) = \Omega t$, то они переходят в формулы решения традиционной задачи оптималь-

ного разворота сферически симметричного КА (твердого тела) в классе конических движений [11].

Будем рассматривать вторые производные от функций f и g в качестве управляющих параметров. Тогда, если ввести обозначения

$$\frac{df}{dt} = f_1, \frac{dg}{dt} = g_1, \quad (11)$$

то можно составить систему дифференциальных уравнений, описывающих управляемую систему

$$\frac{df}{dt} = f_1, \frac{dg}{dt} = g_1, \frac{df_1}{dt} = u_1, \frac{dg_1}{dt} = u_2, \quad (12)$$

где f, f_1, g, g_1 — фазовые координаты, u_1, u_2 — управляющие параметры.

Ограничимся случаем, когда кватернион \mathbf{K} представляется в виде произведения

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1, \mathbf{K}_1 = \exp\{\mathbf{i}_1 \alpha_1/2\}, \mathbf{K}_2 = \exp\{\mathbf{i}_2 \alpha_2/2\}, \quad (13)$$

где α_1, α_2 — некоторые постоянные. Отметим, что кватернионы \mathbf{K}_1 и \mathbf{K}_2 определяют поворот вектора ω (7) вокруг осей $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2$. Поворот вокруг оси \mathbf{i}_3 уже включен в формулу (9), если учесть, что в функцию $g(t)$ входит аддитивная постоянная. Спряженный кватернион $\tilde{\mathbf{K}}$ будет представляться в виде

$$\tilde{\mathbf{K}} = \tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2, \tilde{\mathbf{K}}_1 = \exp\{-\mathbf{i}_1 \alpha_1/2\}, \\ \tilde{\mathbf{K}}_2 = \exp\{-\mathbf{i}_2 \alpha_2/2\}. \quad (14)$$

Условия того, что выражения для ω, Λ (9), (10) удовлетворяют граничным условиям (3), (4), с учетом (13), (14) запишутся в виде:

$$\tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2 \circ (\mathbf{i}_1 f_1(0) \sin g(0) + \mathbf{i}_2 f_1(0) \cos g(0) + \\ + \mathbf{i}_3 g_1(0)) \circ \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 = \omega_0; \quad (15)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2 \circ (\mathbf{i}_1 f_1(T) \sin g(T) + \mathbf{i}_2 f_1(T) \cos g(T) + \\ + \mathbf{i}_3 g_1(T)) \circ \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 = \omega_T; \quad (16)$$

$$\Lambda_0 \circ \tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2 \circ \exp\{-\mathbf{i}_3 g(0)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_2 (f(T) - \\ - f(0))/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3 g(T)/2\} \circ \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 = \Lambda_T. \quad (17)$$

Тогда для управляемой системы (12) можно сформулировать следующую задачу оптимального управления. Требуется найти оптимальные управления $u_1(t), u_2(t)$, которые за заданный промежуток времени $[0, T]$ переводят управляемую систему (12) из начального состояния

$$f = f(0), f_1 = f_1(0), g = g(0), g_1 = g_1(0) \quad (18)$$

в конечное состояние

$$f = f(T), f_1 = f_1(T), g = g(T), g_1 = g_1(T), \quad (19)$$

удовлетворяющие соотношениям (15)—(17), в которых α_1, α_2 выступают как параметры, подлежа-

шие определению, и доставляют минимум квадратичному функционалу

$$J = \int_0^T (u_1^2 + u_2^2) dt. \quad (20)$$

Соотношения (15)–(17) можно переписать в виде

$$\mathbf{i}_1 f_1(0) \text{sing}(0) + \mathbf{i}_2 f_1(0) \text{cosg}(0) + \mathbf{i}_3 g_1(0) = \\ = \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 \circ \boldsymbol{\omega}_0 \circ \tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2; \quad (21)$$

$$\mathbf{i}_1 f_1(T) \text{sing}(T) + \mathbf{i}_2 f_1(T) \text{cosg}(T) + \mathbf{i}_3 g_1(T) = \\ = \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 \circ \boldsymbol{\omega}_T \circ \tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2; \quad (22)$$

$$\exp\{-\mathbf{i}_3 g(0)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_2(f(T) - f(0))/2\} \circ \\ \circ \exp\{\mathbf{i}_3 g(T)/2\} = \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 \circ \tilde{\Lambda}_0 \circ \Lambda_T \circ \tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2. \quad (23)$$

Такую задачу оптимального управления будем называть *модифицированной задачей оптимального разворота КА (твердого тела)*.

4. Решение задачи с помощью принципа максимума. Функция Гамильтона — Понтрягина [12] для управляемой системы (12) с функционалом (20) имеет вид

$$H = -(u_1^2 + u_2^2) + \psi_1 f_1 + \psi_2 g_1 + \psi_3 u_1 + \psi_4 u_2, \quad (24)$$

где $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ — сопряженные переменные, удовлетворяющие системе уравнений

$$\frac{d\psi_1}{dt} = 0, \quad \frac{d\psi_2}{dt} = 0, \quad \frac{d\psi_3}{dt} = -\psi_1, \quad \frac{d\psi_4}{dt} = -\psi_2. \quad (25)$$

Общее решение уравнений (25), содержащее произвольные постоянные c_1, c_2, c_3, c_4 , имеет вид $\psi_1 = c_1, \psi_2 = c_2, \psi_3 = -c_1 t + c_3, \psi_4 = -c_2 t + c_4$. (26)

Из условия максимума для функции Гамильтона—Понтрягина (24) следует, что

$$u_1 = \psi_3/2 = (-c_1 t + c_3)/2, \\ u_2 = \psi_4/2 = (-c_2 t + c_4)/2. \quad (27)$$

После подстановки (27) в систему уравнений (12) находится общее решение для фазовых координат, содержащее восемь произвольных постоянных $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8$:

$$f = -c_1 t^3/12 + c_3 t^2/4 + c_3 t + c_6; \\ g = -c_2 t^3/12 + c_4 t^2/4 + c_7 t + c_8; \\ f_1 = -c_1 t^2/4 + c_3 t/2 + c_5; \\ g_1 = -c_1 t^2/4 + c_4 t/2 + c_7. \quad (28)$$

Так как c_6 входит в функцию f как аддитивная постоянная, то из левой части формулы (23) видно, что эта постоянная не оказывает влияния; по этой причине постоянную c_6 можно положить равной нулю. Таким образом, для определения девяти неизвестных постоянных задачи $c_1, c_2, c_2, c_4, c_5, c_7, c_8$

и α_1, α_2 служат девять уравнений из системы (21)–(23) (отметим, что в кватернионном уравнении (23) независимыми являются только три уравнения в скалярной форме из-за нормированности кватерниона Λ). В результате будут получены выражения для угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$ и кватерниона ориентации Λ (9), (10) в окончательном виде. Эти выражения определяют оптимальный в смысле минимума квадратичного функционала (20) разворот КА в классе обобщенных конических движений. Управляющий момент согласно (2), (9)

$$\mathbf{M} = \boldsymbol{\omega} \bullet = \tilde{\mathbf{K}} \circ [(\mathbf{i}_1(u_1 \text{sing} + f_1 g_1 \text{cosg}) + \\ + \mathbf{i}_2(u_1 \text{cosg} - f_1 g_1 \text{sing}) + \mathbf{i}_3 u_2) \circ \mathbf{K}. \quad (29)$$

Квадрат модуля управляющего момента выражается через управляющие параметры и фазовые координаты

$$\mathbf{M}^2 = u_1^2 + f_1^2 g_1^2 + u_2^2. \quad (30)$$

Модифицированная задача оптимального разворота КА, тем самым, решена полностью.

Следует отметить, что если в модифицированной задаче оптимального разворота КА в качестве граничных условий по угловой скорости КА положить $\boldsymbol{\omega}_0, \boldsymbol{\omega}_T \parallel \text{vect}(\tilde{\Lambda}_0 \circ \Lambda_T)$ (плоский эйлеров разворот), то решения задач в традиционной и модифицированной постановках полностью совпадут. То же самое можно сказать и о случае, когда решение традиционной задачи оптимального разворота сферически симметричного КА (твердого тела) получено в классе конических движений типа решения [11], так как в этих случаях слагаемое $f_1^2 g_1^2$ в (30) обращается в нуль, и функционал (20) полностью переходит в функционал (6) традиционной задачи.

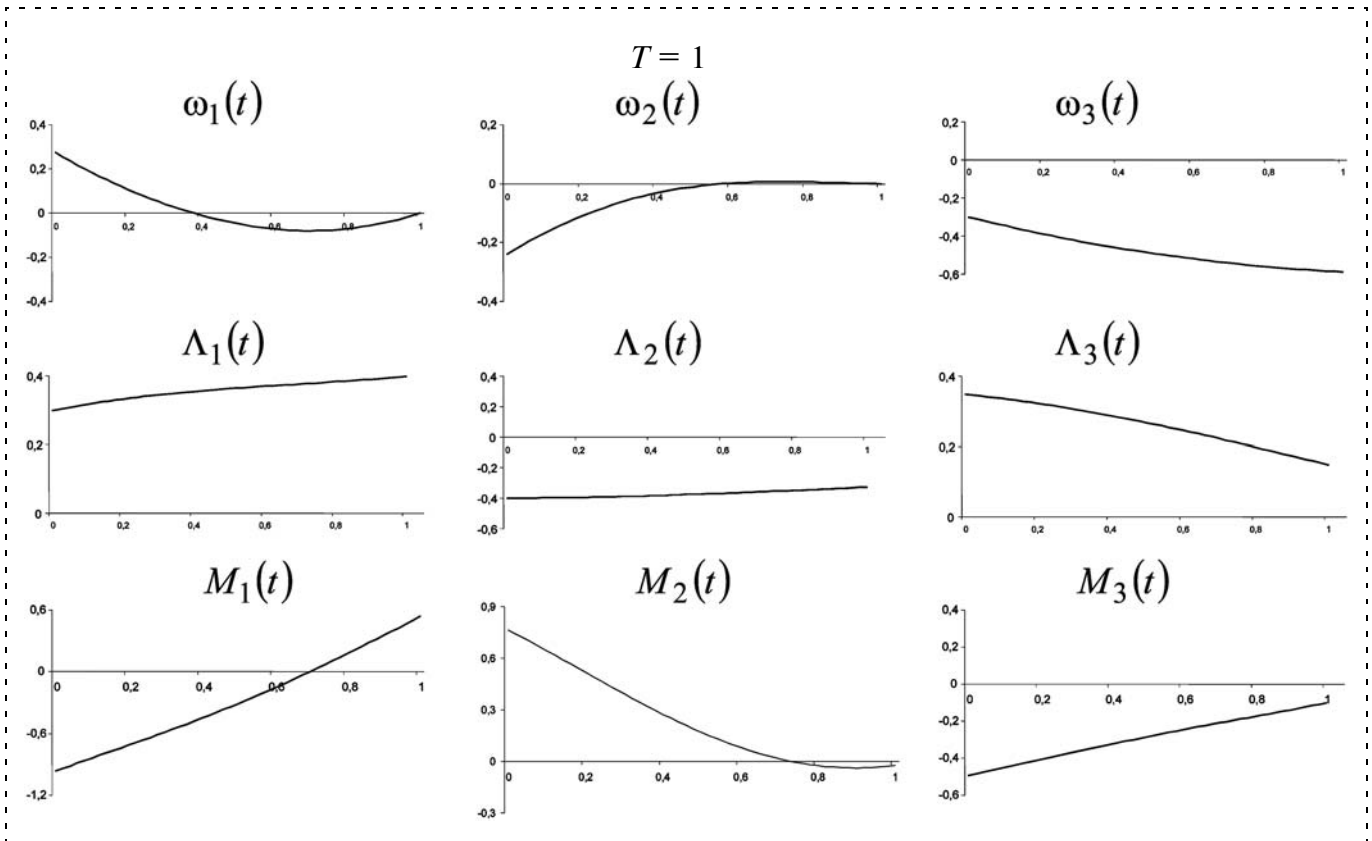
5. Числовые примеры. В данном разделе приводится сравнение решений задачи оптимального разворота сферически симметричного КА в модифицированной и традиционной постановке. На рисунке представлены графики изменения во времени компонент угловой скорости КА $\omega_i(t), i = \overline{1, 3}$, векторной части кватерниона ориентации КА $\Lambda_i(t), i = \overline{1, 3}$, и компонент вектора управляющего момента $M_i(t), i = \overline{1, 3}$.

На рисунке приведены результаты решения модифицированной задачи оптимального разворота КА при произвольных граничных условиях по формулам пп. 3, 4. Расчеты проводили для значений

$$\Lambda_0 = (0,7951 \quad 0,2981 \quad -0,3975 \quad 0,3478);$$

$$\Lambda_T = (0,8443 \quad 0,3985 \quad -0,3260 \quad 0,1485); \quad (31)$$

$$\boldsymbol{\omega}_0 = (0,2739 \quad -0,2388 \quad -0,3); \quad \boldsymbol{\omega}_T = (0 \quad 0 \quad -0,59).$$



Результаты решения модифицированной задачи оптимального разворота КА при произвольных граничных условиях

Значения постоянных $\alpha_1, \alpha_2, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_7, c_8$, входящих в аналитическое решение задачи, таковы: $\alpha_1 = -0,0421$; $\alpha_2 = -0,2226$; $c_1 = 3,29022$; $c_2 = -1,48852$; $c_3 = 2,21133$; $c_4 = -1,45001$; $c_5 = -0,41562$; $c_6 = 0$; $c_7 = -0,22205$; $c_8 = -0,92163$.

С граничными условиями (31) с помощью универсальной программы численного решения, описанной в работах [9, 13], также решалась задача оптимального разворота КА в традиционной постановке (1), (2), (6). Графики решения двух задач практически совпали. Для примера приведем значения компонент вектора $\mathbf{M}(t)$ на концах и в середине интервала времени движения КА $[0, 1]$ в этих двух решениях:

$$t = 0; M_1^{\text{модиф}} = -0,9647; M_2^{\text{модиф}} = 0,7634, \\ M_3^{\text{модиф}} = -0,4932;$$

$$t = 0,5; M_1^{\text{модиф}} = -0,3103; M_2^{\text{модиф}} = 0,1687; \\ M_3^{\text{модиф}} = -0,2847;$$

$$t = 1; M_1^{\text{модиф}} = 0,5350; M_2^{\text{модиф}} = -0,0220; \\ M_3^{\text{модиф}} = -0,1024;$$

$$t = 0; M_1^{\text{традиц}} = -0,9853; M_2^{\text{традиц}} = 0,7259; \\ M_3^{\text{традиц}} = -0,4892;$$

$$t = 0,5; M_1^{\text{традиц}} = -0,2917; M_2^{\text{традиц}} = 0,2087; \\ M_3^{\text{традиц}} = -0,2878;$$

$$t = 1; M_1^{\text{традиц}} = 0,5076; M_2^{\text{традиц}} = -0,1272; \\ M_3^{\text{традиц}} = -0,0985.$$

Отметим, что кватернион ориентации КА $\Lambda(t)$ может быть двузначным [1], т. е. Λ и $-\Lambda$ соответствуют одному и тому же угловому положению КА в пространстве.

Заключение. Представленное в статье аналитическое решение модифицированной задачи оптимального разворота сферически симметричного КА (твердого тела) может найти свое применение при построении систем управления КА, как и известное аналитическое решение традиционной задачи в классе плоских эйлеровых разворотов. Решение модифицированной задачи оптимального разворота можно использовать как приближенное решение задачи оптимального управления не только для тела, обладающего сферической симметрией, но и для тела с произвольным распределением масс, но близким по конфигурации к телу со сфе-

рической симметрией. В этом случае приближенное решение для оптимального управляющего момента в размерных переменных будет определяться по формуле

$$\mathbf{M} = \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega},$$

$$\text{где } \mathbf{I} = \begin{pmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{pmatrix} \text{ — тензор инерции; } I_1, I_2, I_3 \text{ —}$$

главные моменты инерции КА (твердого тела).

Список литературы

1. **Бранец В. Н., Шмыглевский И. П.** Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.
2. **Scrivener S. L., Thompson R. C.** Survey of time-optimal attitude maneuvers // J. guidance, control, and dynamics. 1994. V. 17. № 2. P. 225—233.
3. **Петров Б. Н., Боднер В. А., Алексеев К. Б.** Аналитическое решение задачи управления пространственным поворотным маневром // Докл. АН СССР. 1970. Т. 192. № 6. С. 1235—1238.
4. **Бранец В. Н., Черток М. Б., Казначеев Ю. В.** Оптимальный разворот твердого тела с одной осью симметрии // Космич. иссл. 1984. Т. 22. Вып. 3. С. 352—360.
5. **Сиротин А. Н.** Оптимальное управление переориентацией симметричного твердого тела из положения покоя в положение покоя // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 1. С. 36—46.

6. **Сиротин А. Н.** Об оптимальной по быстродействию пространственной переориентации в положение покоя вращающегося сферически-симметричного твердого тела // Изв. РАН. МТТ. 1997. № 3.

7. **Молоденков А. В.** Кватернионное решение задачи оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота твердого тела // Проблемы механики и управления. Сб. научн. трудов. Пермь: ПГУ, 1995. С. 122—131.

8. **Молоденков А. В.** Решение задачи оптимального разворота сферически симметричного космического аппарата для одного частного случая // Сб. трудов 6-й междунар. конф. "Системный анализ и управление космическими комплексами". Крым, Евпатория. М.: МАИ, 2001. С. 42.

9. **Молоденков А. В., Сапунков Я. Г.** Решение задачи оптимального разворота сферически симметричного космического аппарата с ограниченным и импульсным управлением при произвольных граничных условиях // Изв. РАН. ТиСУ. 2004. № 2. С. 185—196.

10. **Молоденков А. В.** К решению задачи Дарбу // Изв. РАН. МТТ. 2007. № 2. С. 3—13.

11. **Молоденков А. В., Сапунков Я. Г.** Новый класс аналитических решений в задаче оптимального разворота сферически симметричного твердого тела // Изв. РАН. МТТ. 2012. № 2. С. 16—27.

12. **Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкредидзе Р. В., Мищенко Е. Ф.** Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1961. 384 с.

13. **Сапунков Я. Г., Молоденков А. В.** Численное решение задачи оптимальной переориентации вращающегося космического аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 6. Автоматическое и автоматизированное управление летательными аппаратами. 2008. № 6. С. 10—15.

ИНФОРМАЦИЯ



Пятая Всероссийская конференции "РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ—2013"

4—5 июня 2013 г., ГК "ИЗМАЙЛОВО", г. Москва

Пятая Всероссийская конференция "РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ—2013" посвящена модернизации и реконструкции оборудования электростанций, ТЭЦ, АЭС, ГРЭС, ТЭС и других предприятий электроэнергетики, повышению ресурса и эффективности турбин, котлов и другого энергетического оборудования, автоматизации, надежности, газо- и водоочистке, антикоррозионной защите и усилению зданий и оборудования, экологии и промышленной безопасности энергетики стран СНГ.



ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:

- Инновационные разработки для повышения ресурса и эффективности котлов, турбин и другого технологического оборудования ТЭЦ, ГРЭС, ТЭС
- Современные предложения по реконструкции паротурбинного оборудования
- Повышение экологической чистоты и экономичности работы котлов электростанций
- Автоматизация предприятий энергетики — системы управления, учета и контроля
- Экология энергетики — газоочистка, водоочистка и переработка отходов
- Отечественные и зарубежные электрофильтры для установок золоулавливания
- Современные технологии водоподготовки и водоочистки
- Вопросы промышленной безопасности и антикоррозионной защиты

Председатель оргкомитета: Ермаков А. В. — тел.: +7 (905) 567-8767

Оргкомитет: Андроников И. Н. — тел.: +7 (916) 117-0275, +7 (499) 166-6420

факс: +7 (495) 737-7079 e-mail: admin@intecheco.ru сайт: www.intecheco.ru

CONTENTS

Tiagunov O. A. The Development of Technologies of Direct Root Methods in the Problems of Research of Control Systems	2
---	---

The problem of development algorithms and the software on the basis of direct root methods for research of stability and synthesis of managing devices of control systems is considered. The received results allow to investigate processes of control in linear models of complex systems of the big dimension.

Keywords: control systems, stability, direct root methods, control process estimator

Matveev M. G., Semenov M. E., Shevlyakova D. V., Kanishcheva O. I. Zone of Stability and Periodic Solutions of the Inverted Pendulum with Hysteretic Control	8
---	---

The article presents a mathematical model of the stabilization of the inverted pendulum with vertically oscillating base and hysteresis control. We find stability criteria for the linearized equations of motion. Numerical construction of stability zone in two-dimensional parameter spaces present. Dependence between initial conditions and control parameters, which provide periodic oscillations of the pendulum were obtained. The areas of initial conditions in phase space, which appropriate of periodic solutions, are constructed in article.

Keywords: inverted pendulum, nonlinear hysteresis, backlash, stability and periodic solutions

Tyurin I. Yu., Vylegzhanin A. S., Kolbova E. V., Skobelev P. O., Shepilov Ya. Yu. Experience of Development and Implementation the Multi-Agent System of Operational Management in Workshop Tool JSC "Izhevsk Motor Plant — Axion-Holding"	15
---	----

This paper describes the results of development and implementation the multi-agent system of operational management workshop tool for JSC "Izhevsk Motor Plant — Axion-Holding".

Keywords: multi-agent system, operational planning, real time implementation results and prospects

Gradetsky V. G., Ermolov I. L., Knyazkov M. M., Semyonov E. A., Sukhanov A. N. Application of Unloading Elements in the Structure of the Exoskeleton-Robot	20
---	----

A mathematical model for the exoskeleton's legs is constructed. This model is used to determine the design parameters of the legs and control algorithms. The advantages of application of unloading elements in the structure of the exoskeleton-robot are shown.

Keywords: exoskeleton, robotics, mathematical model, multibody systems, parametrical analysis, pneumodrives

Pavlovsky V. E., Panchenko A. V. Models and Control Algorithm of Small Hexapod Robot	23
---	----

Dynamical model of real hexapod robot was considered. Simple algorithm was developed for tripod gaits on the plane surface. Control algorithm allows to calculate all joint angles in explicit form for any input control signals. Described algorithm showed its efficiency and flexibility during computer simulation.

Keywords: hexapod, walking machine, simulation, dynamics

Melnik E. V., Gorelova G. V. About Effect of Processor Computational Load Balancing in Highly Reliable Distributed Information and Control Systems, Research Planning.	29
---	----

The paper deals with the questions of increasing the reliability of distributed information and control systems (DICS) by computational load balancing. A method for the research of such systems reliability function based on the planning of numerical experiments series is proposed.

The research results of the computational load distribution effect on the system reliability are represented. The significant impact of load balancing which suggests the expediency of its usage in highly reliable DICS is shown.

Keywords: processing unit, distributed information and control systems reliability, reliability function, planning series of computational experiments, computational load balancing

Gagarin Yu. A. Methods of Raising of Fault Tolerant of Memory Elements of Computing and Controlling Systems.	35
---	----

This paper contains principal factors influencing data safety, and consequently, system reliability as a whole. It also contains memory retention fault types and fault avoidance methods.

Keywords: fault-tolerant RAM, Hamming code controller, cache memory, extra memory controller, diagnostic cache

Vu Dyc Lung, Paderno P. I., Sattorov F. E. Man in Corporate Networks. Part 2. Control	41
--	----

There is described solving the task of personal functioning capacity evaluation. Workout the treatment which allows to system administrator to reasonable view the question of sharing rights between operators of (users) CN, and based on the evaluation success of their self-assessment activities in the CN and the possession of information technology.

Keywords: system administrator, operator, corporate network, functioning capacity, right sharing

- Sharovатов V. T., Loshitskiy P. A.** A Mathematical Model of the Power of Shell 45
Stockless Pneumatic Cylinders Single Acting with Spring Return. A mathematical model of the power of shell stockless pneumatic cylinder (PSSPC) single acting with spring return, taking into account the properties of compressed gas. The study used the calculations for one-way PSSPC transient type [1]. An example of a possible settlement of the said PSSPC a gripper arm. Scope of PSSPC – high-speed and control of small displacements.
Keywords: a power element membrane type, a working point, mathematical model, a pneumatic cylinder
- Kuzovkin V. A., Filatov V. V., Chumaeva M. V.** Simulation of the Brushless DC Motor Control Processes 49
Block of the models of brushless DC motor pulse control system is proposed in the article. It allows to simulate control processes of the electric drives in programmed numerical control metal-cutting machine.
Keywords: brushless DC motor, follow up control system, pulse width modulation, simulation
- Guluev G. A., Pashayev A. B., Pashaev F. G., Rzaev As. H., Sabziev E. N.** The Algorithm of Determination of Rod Force from Power Consumption of the Electric Drive in the Operating Pumping Unit 55
The present article gives analytic expression of correlation of power consumption of electric drive from the power line and gravity force on the polished rod during operation of pumping unit.
Keywords: electric motor power, oil extraction, rod force, sucker rod pump
- Kulifeev Yu. B., Afanasyev Yu. N.** Algorithmization of Automatic Plane Landing in the Conditions of the Meteominimum 60
The problem of automatic control by longitudinal movement of the aircraft of plane type for ensuring automation of landing in the conditions of a meteominimum corresponding to category III With ICAO is considered. The task is solved at the expense of management of the rotary stabilizer and change of draft of the power plant. The assessment of working capacity and efficiency of the offered algorithm is made.
Keywords: algorithms of automatic control in the course of complete plane landing, calculation of the set longitudinal and vertical overloads, calculations of the set corner of a deviation of the stabilizer. Calculation of the set draft of the power plant
- Sapunkov Ya. G., Molodenkov A. V.** Solution of the Modified Problem of the Optimal Turn of a Spacecraft. . . 66
The problem of the optimal turn in the sense of minimum of energy loss of a spacecraft as a rigid body with a spherical distribution of mass without constraint of a control action and with arbitrary boundary conditions in the quaternion statement is considered. The new analytical solution in the class of generalized conical motion is obtained for the modified formulation of the problem. Numerical examples are given.
Keywords: optimal control, spacecraft, spherically symmetric rigid body, arbitrary boundary conditions

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Е. В. Комиссарова.*

Сдано в набор 04.09.2012. Подписано в печать 18.10.2012. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1112. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
 Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.