

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 6 (87)

ИЮНЬ

2008

Редакционный совет:

МАКАРОВ И. М.
МАТВЕЕНКО А. М.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
ФЕДОРОВ И. Б.

Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В.
ПУТОВ В. В.
ЮЩЕНКО А. С.

Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М.
БОГАЧЕВ Ю. П.
БУКОВ В. Н.
ВОСТРИКОВ А. С.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.
ИВЧЕНКО В. Д.
ИЛЬЯСОВ Б. Г.
КАЛЯЕВ И. А.
КОЛОСОВ О. С.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.
КУЗЬМИН Н. Н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.
ЛЁВИН Б. А.
ЛОХИН В. М.
НОРЕНКОВ И. П.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
РАПОПОРТ Э. Я.
РАССАДКИН Ю. И.
РАЧКОВ М. Ю.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ФУРСОВ В. А.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЛЫСЕНКО А. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Гранкин Б. К., Козлов В. В., Лысенко И. В.** Принципы декомпозиции сложных объектов в проектных исследованиях 2
Ведерников Ю. В. Некоторые подходы к решению задачи выбора сложных систем на основе нечетких отношений предпочтения 6
Ефанов В. Н., Шевяхов Е. Н. Согласованно-децентрализованное управление сложными техническими объектами 12

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Кадочников М. В., Ситников М. С.** Использование генетических алгоритмов для автоматического формирования базы знаний интеллектуальной системы управления автономным мобильным роботом 18
Ермолов И. Л. Автономность мобильных роботов, ее сравнительные меры и пути повышения 23
Шаршеналиев Ж. Ш., Даровских В. Д. Эмергентность многосвязной гибкой производственной системы 29

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ НЕФТЕДОБЫЧИ

- Баталов С. А.** Синтез системы управления нефтедобычей и контроля нефтенасыщенности пласта на ранней стадии его разработки 36
Гиберт Д. П., Ковригин Л. А. Алгоритм управления дебитом нефтяных скважин с парафиновыми отложениями 41
Бурьян Ю. А., Сорокин В. Н. Управление частотой излучения гидравлического скважинного вибратора 47

АВТОМАТИЧЕСКОЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

- Скубилин М. Д., Письменов А. В., Спиридонов О. Б.** Мониторинг летательного аппарата с учетом состояния его пилота 51
Корсун О. Н. Принципы параметрической идентификации математических моделей самолетов по данным летных испытаний 55
Мазур В. Н., Цатурян К. Т. Методы проверки адекватности математической модели возмущенного движения самолета 55
Сапунков Я. Г., Молоденков А. В. Численное решение задачи оптимальной перераспределения вращающегося космического аппарата 55
Борисенко Ю. Г., Володина Л. А., Кербер О. Б. Основные принципы формирования закона управления по каналам руля высоты и тяги в режиме "Уход на 2-й круг" 55
Заведеев А. И. Исследование характеристик системы дистанционного зондирования Земли с помощью космического аппарата 55
Contents 56

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание степени доктора наук

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

УДК 628.562

Б. К. Гранкин, д-р техн. наук,
В. В. Козлов, д-р техн. наук,
И. В. Лысенко, д-р техн. наук,
Санкт-Петербургский институт
информатики и автоматизации РАН

Принципы декомпозиции сложных объектов в проектных исследованиях¹

Изложены принципы декомпозиции, сформулированные с позиций общей теории систем, без опоры на физическую природу объектов, особенностью которых является возможность согласованной декомпозиции моделей объектов, их функций и параметров, что позволяет решать задачи синтеза функциональной структуры объектов мехатроники. Принципы рекомендуются для решения типовых задач проектных исследований (формализации требований, функций и структуры систем, их синтеза, анализа и оптимизации).

Введение

Декомпозиция, или диакоптика (лат. *dekompositio*, греч. *diacopto* — разделение) — это научный метод, при котором исследование сложных объектов [1] заменяется исследованием отдельных элементов, проводимым с учетом их взаимного влияния и с отращением целостных свойств системы.

Методологические и теоретические аспекты исследований декомпозиции достаточно подробно рассмотрены в [2] применительно к электрическим системам и их аналогам. В представленной статье сформулированы общие принципы декомпозиции для более широкого класса сложных объектов, рассматриваемых как системы [3, 4].

Под сложными объектами будем подразумевать объекты, содержащие составные части и элементы различной физической природы. Типовыми примерами таких объектов являются системы эксплуатации ракетно-космических комплексов (РКК) [5], энергетические [6], производственные и другие (не обязательно технические) комплексы [7]. В них реализуется концепция "управляющей системы", сформулированная С. Яблонским [8], и присутствуют аспекты сложности, присущие объектам системотехники. Функционирование таких объектов может быть обобщенно представлено как передача от

источников к потребителям потоков вещества, энергии и информации, рассматриваемых как объекты управления, а также преобразование свойств данных потоков в процессе передачи.

Передаваемые и преобразуемые вещества, энергия и информация далее будут условно называться "рабочей средой". Применительно к РКК "рабочими средами" в различных задачах проектных исследований являются составные части ракет и космические аппараты, преобразуемые (агрегируемые) в готовые к пуску ракеты космического назначения, проектная документация, преобразуемая из содержания требований в готовые проектные решения и проект в целом, информация контроля и управления, энергия двигательных установок, силовых приводов, систем кондиционирования и пр.

Типовые задачи и цели декомпозиции

Необходимость в декомпозиции объектов возникает уже при формировании требований к элементам, вытекающих из требований к объектам в целом, т. е. с самого первого этапа их жизненного цикла [9].

Задачи декомпозиции конкретизируются для этапов исследования и решаемой задачи. При этом могут иметь место следующие типовые случаи.

При формировании требований к создаваемым объектам исходной является информация о желаемых свойствах объектов в целом, так как состав элементов еще не определен. Поэтому декомпозиция требований к объекту на требования к его составным частям осуществляется в процессе синтеза структуры. Этот процесс может быть многоступенчатым, а структура — многоуровневой. Для РКК, например, может быть выявлена иерархическая структура, содержащая, по крайней мере, девять уровней (рис. 1). Однако общие принципы декомпозиции (межуровневых переходов) для всех уровней остаются неизменными с той разницей, что элементы декомпозиции вышестоящего уровня иерархии становятся системой (объектом декомпозиции) последующего уровня.

При синтезе структуры систем [10, 11] требуется определить множество элементов и их связей, обеспечивающих выполнение системой заданных функций с требуемыми показателями. Поэтому необходимыми этапами синтеза являются:

- разделение заданных функций системы и требований к их выполнению на функции элементов, из которых состоит объект;
- последующее обоснование требований к элементам, вытекающих из требований к объекту.

¹ Работа выполнена в рамках проекта № 07 08 00810 а: "Концептуально-логические методы оценивания сложных технических систем ракетно-космической техники на различных этапах жизненного цикла", поддержанного грантом РФФИ.

Цель декомпозиции при синтезе состоит в представлении требуемых функций и показателей системы в виде функций элементов и требований к ним.

При анализе [12, 13, 14] определяют функциональные возможности и показатели качества функционирования системы. Поскольку для сложного объекта, как правило, отсутствуют явные аналитические соотношения для получения выходных показателей, то возникает задача разделения модели анализируемого объекта на такие части, для которых могут быть аналитически или экспериментально получены выходные показатели. Цель декомпозиции при анализе состоит в получении описания систем и их показателей на уровне элементов с известными функциями и показателями.

При проектировании сложных объектов [15] возникают задачи оптимизации, формулировка которых основывается, как правило, на физических закономерностях процессов взаимодействия объектов. Такие физические закономерности справедливы внутри классов физически однородных элементов (электрических, теплоэнергетических, механических, гидравлических и пр.), для которых действуют законы механики, теплоэнергетики, электричества, газодинамики и др. В таких случаях цель декомпозиции состоит в получении групп физически однородных элементов, для которых могут быть использованы физические закономерности преобразования электроэнергетических, массоэнергетических или информационных свойств.

Наиболее разработанными и употребительными в настоящее время являются методы декомпозиции, снижающие сложность исследуемых объектов и решаемых задач. Цель декомпозиции при этом состоит в представлении сложного объекта в виде частей ограниченной сложности, которая соответствует возможностям средств вычислений и исследований.

Далее описываются принципы декомпозиции, основанные на конкретизации идей Г. Крона, М. Ме-



Рис. 1. Вариант схемы иерархии стартового комплекса:

СК — стартовый комплекс; СО КА — стартовое оборудование космического аппарата; СО РБ — стартовое оборудование разгонного блока; СО РН — стартовое оборудование ракеты-носителя; ПО — пусковое оборудование; ТУО — транспортно-установочное оборудование; КПО — контрольно-проверочное оборудование; ЗО — заправочное оборудование; ППО — подъемно-перегрузочное оборудование; ПС — пусковой стол; ФО — фермы обслуживания; СЗ — системы заправки; СН — системы нейтрализации; ТУА — транспортно-установочные агрегаты; КМ — кабель-мачты; ТУТ — транспортно-установочные тележки; АС — агрегаты стыковки; СТР — системы терморегулирования

саровича и С. Яблонского для рассматриваемых сложных объектов.

Принципы декомпозиции

Излагаемый подход призван снизить уровень субъективизма при декомпозиции, т. е. обеспечить, во-первых, адекватность объекта и совокупности выделенных элементов; во-вторых, обратимость процедуры (возможность "агрегирования" объекта и его характеристик из элементов и их характеристик); в-третьих, возможность формализации усло-

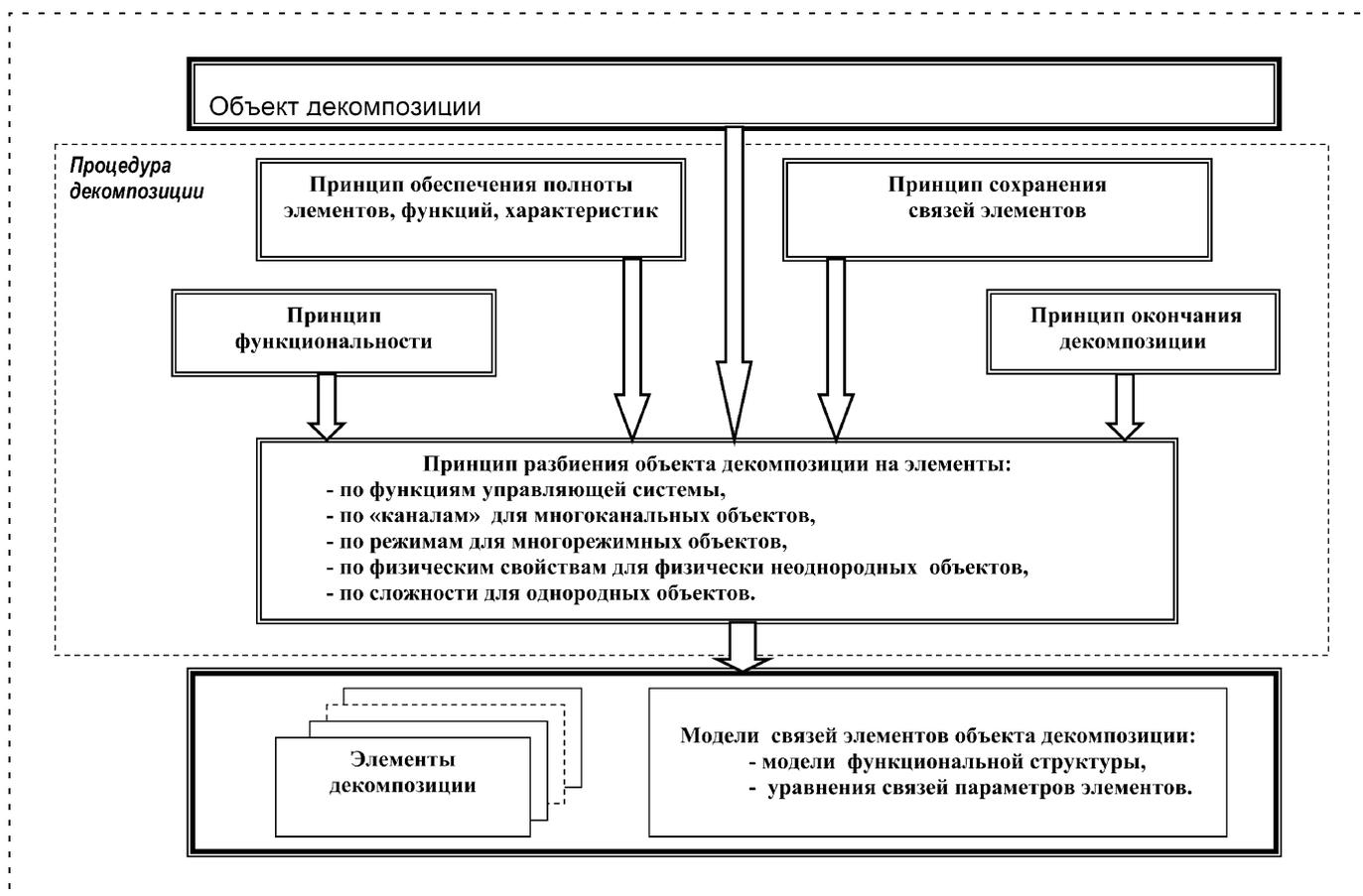


Рис. 2. Схема связей принципов декомпозиции

вий окончания процедур в зависимости от специфики решаемой задачи. Достижение целей декомпозиции при упомянутых условиях, по нашему мнению, может быть обеспечено применением совокупности принципов, условно называемых принципами *разбиения, функциональности, обеспечения полноты, сохранения связей и окончания декомпозиции*. Состав и взаимосвязи этих принципов при декомпозиции показаны на рис. 2.

На схеме видно, что ведущим конструктивным принципом декомпозиции является *принцип разбиения* объекта на элементы. Этот принцип основан на классификации аспектов сложности, содержащихся в общей теории систем [3], системотехнике [4] и на концепции "управляющей системы" [8]. Остальные принципы формируют систему условий, одновременное выполнение которых обеспечивает сохранение системных свойств объекта, обратимость процедуры и однозначность решения о прекращении декомпозиции.

Принцип разбиения сформулирован с учетом наличия возможных системных трактовок объектов декомпозиции.

1. Сложные объекты могут рассматриваться как *управляющие системы* (по С. Яблонскому), в кото-

рые входят элементы, выполняющие функции контроля, принятия решения, реализации управляющих воздействий и обеспечения перечисленных элементов материалами, энергией и информацией. Отсюда следует возможность декомпозиции путем разбиения исходного объекта на элементы "управляющей системы", т. е. на подсистемы контроля, управления, исполнительных органов и обеспечения.

2. Объекты могут рассматриваться как *многоканальные системы*, т. е. имеющие множество входов для приема потоков "рабочей среды", а также множество выходов для выдачи преобразованных потоков. Это позволяет проводить декомпозицию объекта на части, обеспечивающие передачу потоков с конкретного входа на конкретный выход, т. е. по одному каналу. В результате многополюсный объект представляется совокупностью двухполюсных элементов.

3. Объекты могут рассматриваться как *многорежимные системы*. Здесь под режимом понимается состояние системы [3], в котором положения управляющих элементов не меняются, и реализуется определенный процесс преобразования свойств объекта управления. Применительно к РКК под режи-

мом понимается процесс, в котором сохраняются неизменными состав функциональных элементов и распределение потоков энергии и информации при передаче их от источников к потребителям (например, "стыковка блоков ракеты и космических аппаратов", "транспортировка ракеты", "установка ракеты на пусковой стол", "заправка ракеты" и др.). Такое представление объекта декомпозиции позволяет проводить его разбиение на компоненты, участвующие в каждом из режимов функционирования (в РКК это комплексы или агрегаты соответственно стыковочного, транспортного, установочного, заправочного и другого оборудования).

4. Преобразования свойств сложных объектов часто реализуются в виде сочетаний более простых преобразований физических свойств в элементах. Это позволяет проводить декомпозицию объектов на части, в которых происходят преобразования однородных в физическом смысле свойств. Так, в составе систем эксплуатации РКК могут быть выделены комплексы механического, пневмогидравлического, электрического и других видов оборудования, организационные структуры и информационные системы.

5. В случаях, когда сложность объектов превышает возможности средств исследований или не удовлетворяет заданным ограничениям, проводится деление на элементы соответствующей сложности.

В общем случае процедура разбиения может быть многоэтапной, на каждом этапе может быть применен любой из перечисленных принципов разбиения, в лучшей степени соответствующий условиям, содержащимся в формулируемых ниже принципах.

Принцип функциональности соответствует требованию, согласно которому каждый элемент должен иметь самостоятельную функцию, показатели качества выполнения которой зависят только от этого элемента.

Принцип обеспечения полноты соответствует выполнению следующих условий:

- совокупность элементов декомпозиции эквивалентна составу объекта декомпозиции;
- совокупность функций всех элементов эквивалентна функции системы;
- совокупность характеристик элементов достаточна для определения характеристик системы.

Этот принцип обеспечивает возможность адекватных межуровневых переходов в иерархической многоуровневой модели системы. Он в самом общем виде отражает "законы сохранения" при моделировании и исследовании одного и того же объекта на различных уровнях иерархии. Правильно построенная модель иерархии отображает исследуемую систему столько раз, сколько имеется уровней

иерархии, при этом множество элементов на каждом уровне эквивалентно одному и тому же объекту, представленному в разных "масштабах".

Принцип сохранения связей соответствует требованию формирования на каждом шаге декомпозиции дополнительных моделей и соотношений, описывающих:

- вертикальные связи между объектом и элементами декомпозиции;
- горизонтальные связи между элементами одного уровня декомпозиции (модели структуры);
- уравнения для входных и выходных параметров элементов одного уровня (уравнения горизонтальных связей);
- уравнения для одноименных параметров объектов и элементов декомпозиции (уравнения вертикальных связей).

Принцип окончания декомпозиции (останова) состоит в требовании завершения процедуры разбиения независимо от сложности полученных элементов, если:

- каждым полученным при декомпозиции характеристикой и функцией может быть поставлен в соответствие функциональный элемент из множества базовых элементов (при формировании требований и синтезе);
- для элемента декомпозиции известны или могут быть получены аналитически соответствующие характеристики (при анализе);
- элементу декомпозиции могут быть поставлены в соответствие физические закономерности единой физической природы (при оптимизации физических характеристик);
- каждый элемент имеет сложность, согласующуюся с возможностями применяемого инструмента исследования (при снижении сложности задачи).

Как следует из сформулированных принципов, многоуровневая декомпозиция может проводиться неоднозначным образом из-за возможности выбора принципа разбиения. Это позволяет использовать методы декомпозиции для оптимизационных постановок задач различного проектирования. Поскольку возможны различные варианты разбиения, в равной мере удовлетворяющие перечисленным выше условиям, то следует выбирать вариант, в котором число образующихся связей между элементами минимально.

Из приведенных выше рассуждений следует, что математическое описание систем и математические соотношения в виде равенств отражают всего два вида соответствий: соответствие параметров при переходе от одного уровня иерархии к другому (вертикальные связи) и при обмене потоками вещества, энергии и информации между элементами одного уровня (горизонтальные связи).

Заключение

Сформулированные выше принципы могут быть использованы и для систематизации научно-технических задач и математических моделей в виде иерархической структуры функций объекта исследования и его частей при проектировании новых и модернизации существующих сложных объектов мехатроники. Корректное проведение декомпозиции объекта проектирования позволяет обосновать комплекс математических моделей, необходимых и достаточных для определения (прогнозирования) значений показателей для всех уровней декомпозиции.

Список литературы

1. Берг А. И., Бирюков Б. В. Познание сложных систем и проблема нетранзитивности научного объяснения // *Философско-методологические основания системных исследований*. М.: Наука, 1983. С. 56—68.
2. Крон Г. Исследование сложных систем по частям — диалектика. М.: Наука, 1972. 544 с.
3. Месарович А. А., Такахара Я. *Общая теория систем: математические основы*. М.: Мир, 1978. 230 с.

4. Резников Б. А. Системный анализ и методы системотехники (методология системных исследований): Учебник. Ч. 1. М.: МО СССР, 1990. 522 с.
5. Теория и практика эксплуатации объектов космической инфраструктуры. Т. 1. Объекты космической инфраструктуры. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 400 с.
6. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 248 с.
7. Организационные структуры управления производством / Под ред. Б. З. Мильнера. М.: Экономика, 1975. 319 с.
8. Яблонский С. В. Основные понятия кибернетики // *Проблемы кибернетики*. Вып. 2. М.: Наука, 1959. С. 25—34.
9. Баранов Л. Т., Гузенко В. Л., Ковалев А. П., Поляков А. П., Прохорович В. Е. Справочник по эксплуатации космических средств / Под ред. А. П. Полякова. 2-е изд. перер. и доп. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2006. 758 с.
10. Цвиркун А. Д., Акинфеев В. И., Филиппов В. А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем: Оптимизационно-имитационный подход. М.: Наука, 1985. 231 с.
11. Лысенко И. В. Анализ и синтез сложных технических систем. Ч. 1. М.: Воениздат, 1995. 365 с.
12. Квейд Э. Анализ сложных систем. М.: Сов. радио, 1965. 452 с.
13. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 388 с.
14. Яблонский А. И. Методологические вопросы анализа сложных систем // *Системные исследования: Методологические проблемы*. Ежегодник. М.: Наука, 1984. С. 45—59.
15. Красношеев П. С., Морозов В. В., Федоров В. В. Декомпозиция в задачах проектирования // *Изв. АН СССР. Сер. Техническая кибернетика*. 1979. № 2. С. 7—18.

УДК 004.89

Ю. В. Ведерников, канд. техн. наук, доц.,
Михайловская военная артиллерийская академия,
Санкт-Петербург

Некоторые подходы к решению задачи выбора сложных систем на основе нечетких отношений предпочтения

Рассматривается задача обоснования выбора сложных технических систем, характеризующихся множеством разнородных критериев оптимальности. В основу метода решения положена идея нормализации неоднородных критериев на основе построения нечеткого отношения предпочтения.

Введение

Важной задачей, решаемой на ранних этапах проектирования сложных технических систем (СТС), является задача выбора оптимального варианта системы из множества альтернативных. В настоящее время накоплен большой опыт выбора оптимальных систем [3, 4, 9, 10]. Однако разработанные в настоящее время методы принятия решений (математического программирования, теории игр, теории

статистических решений, исследования операций и т. д.) позволяют осуществлять выбор наилучших систем лишь в условиях одного конкретного вида исходных данных. Разработка методов, которые могли бы решать задачи выбора в условиях комплексного использования неоднородной информации, на сегодняшний день еще полностью не завершена. Это создает определенную трудность при выборе оптимальных систем.

В статье предлагается подход, который позволяет решать указанный класс задач. При этом используется математический аппарат теории нечетких множеств [1, 5, 6, 8] как основной аппарат формирования и нормализации (т. е. приведения к единой величине и виду, удобному для сравнения) исходных данных при решении задач многокритериальной оптимизации СТС.

1. Метод построения нечеткого отношения предпочтения на множестве сложных систем, характеризующихся скалярными разнородными критериями качества

Задача обоснования выбора сложной технической системы — это процедура поиска оптимального (т. е. лучшего в данных условиях) решения.

Для характеристики качества принимаемого решения вводятся специальные величины — критерии оптимальности. Независимо от типа задач в системном анализе и теории принятия решений общим является подход к использованию критериев: оптимальным является то решение, которому соответствует экстремальное значение критерия.

Рассмотрим математическую постановку классической задачи многокритериального выбора и с этой целью введем необходимые в дальнейшем обозначения [11, 12]. Пусть имеется некоторое семейство систем, где

- $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$ — множество возможных альтернативных вариантов СТС;
- $K(S_\alpha) = \{K_1(S_\alpha), K_2(S_\alpha), \dots, K_j(S_\alpha), \dots, K_r(S_\alpha)\}$ — векторный критерий, характеризующий каждую отдельную систему S_α ;
- $K_j(S_\alpha), j = \overline{1, r}$, — частный скалярный критерий качества, характеризующий систему S_α ;
- $A = \{a_j, j = \overline{1, r}\}$ — множество коэффициентов важности скалярных критериев качества, где a_j — коэффициент важности j -го критерия, причем $\sum_{j=1}^r a_j = 1$;
- $S^P(S_{k_i}^0 \in S^P)$ — множество эффективных (Парето-оптимальных) систем с числом элементов n^P , $S^P \subset S$;
- $P = (S_{k_1}^0, S_{k_2}^0, \dots, S_{k_{n^P}}^0)$ — упорядоченное множество эффективных систем (кортеж Парето); элементы кортежа ранжированы так, что выполняется условие

$$S_{k_1}^0 > S_{k_2}^0 > \dots > S_{k_{n^P}}^0, \quad (1)$$

где ">" — знак отношения доминирования, $k_i \in \overline{1, n^P}$. Длина кортежа равна n^P .

Перейдем к постановке задачи. Требуется найти упорядоченное множество эффективных систем (кортеж Парето) P , для элементов которого $S_{k_i}^0$ в зависимости от смысла задачи выполняются условия

$$K(S_{k_i}^0) = \min_{j \in \{1, r\}} K_j(S_\alpha), S_{k_i}^0 \in S^P \quad (2)$$

или

$$K(S_{k_i}^0) = \max_{j \in \{1, r\}} K_j(S_\alpha), S_{k_i}^0 \in S^P. \quad (3)$$

Проведенный анализ [1, 3, 4, 7] показал, что основная трудность при решении задач подобного

класса заключается в наличии неоднородных скалярных критериев оптимальности. Это связано с тем, что достаточно сложно соизмерять улучшение значения одного критерия с ухудшением значения другого критерия, когда критерии представлены в различных измерительных шкалах; невозможно адекватно определить расстояние между разными классами эквивалентности. Кроме того, в одной и той же задаче условие (2) определяет необходимость брать минимум частного скалярного критерия качества, а условие (3) — необходимость брать его максимум.

В работе [7] справедливо отмечается, что только при наличии условия, *обеспечивающего сравнимость частных критериев*, возможно в дальнейшем построение принципа оптимальности и вытекающих из него алгоритмов решения многокритериальных задач. Несравнимость частных критериев является основной особенностью и главным препятствием к решению задач многокритериальной оптимизации.

В основу метода, позволяющего преодолеть перечисленные трудности и решить представленный класс задач, положена идея нормализации разнородных скалярных критериев качества на основе построения нечеткого отношения предпочтения (НОП) [8]. Сущность метода заключается в следующем.

Выполняем попарное сравнение систем $S_k \in S$, $S_l \in S$ ($k = \overline{1, n}$; $l = \overline{1, n}$; $k \neq l$) и определяем нечеткое отношение предпочтения $PK_j(S_k, S_l)$ по j -му частному критерию качества для каждой пары систем (S_k, S_l) функцией принадлежности в виде [2, 8, 13]

$$\begin{aligned} \mu K_j(S_k, S_l) &= \\ &= \begin{cases} \frac{K_j(S_k) - K_j(S_l)}{m_j}, & \text{если } K_j(S_k) > K_j(S_l); \\ 0, & \text{если } K_j(S_k) \leq K_j(S_l), \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

где m_j — ширина интервала оценок по j -му критерию качества; $K_j(S_k)$ и $K_j(S_l)$ — значения j -го критерия для систем S_k и S_l соответственно.

Важным моментом в данном случае является назначение величины m_j .

Согласно [1] шириной $m(A)$ интервала $A = [\bar{a}; \underline{a}]$ называется величина $m(A) = \bar{a} - \underline{a}$. В отличие от метода "нечеткого" ранжирования [2, 11] в рассматриваемой постановке ширина m_j интервала оценок систем по j -му критерию качества $K_j(S_\alpha) = [0; \max_{\alpha = \overline{1, n}} K_j(S_k)]$ будет равна максимальному его значению на множестве систем S_α , где $\alpha = \overline{1, n}$, т. е. $\max_{\alpha = \overline{1, n}} K_j(S_k)$.

При необходимости можно использовать в качестве m_j значения

- критериев эталонной системы;
- критериев, которые хотелось бы достигнуть в ходе решения задачи оптимизации;
- выделяемых ресурсов по каждому из критериев.

В задачах контроля значениями m_j могут выступать предельно допустимые значения контролируемых параметров.

Результаты определения функции предпочтения НОП для каждой пары систем S_k и S_l по каждому из рассматриваемых критериев будем заносить в специальные оценочные матрицы $\|\mu_{ND}K_j(S_k, S_l)\|$, в которых системы S_k будем располагать в строках оценочных матриц, а системы S_l — в столбцах.

Отношение недоминирования системы S_k системой S_l определим функцией принадлежности $\mu_{ND}K_j(S_k, S_l)$ в следующем виде [2, 8, 13]:

$$\mu_{ND}K_j(S_k, S_l) = 1 - \mu_D K_j(S_k, S_l). \quad (5)$$

Результаты будем заносить в специальные оценочные матрицы $\|\mu_{ND}K_j(S_k, S_l)\|$.

Степень "недоминируемости" системы S_k ни одной другой системой по j -му частному критерию характеризуется функцией принадлежности нечеткому множеству недоминируемых систем $\mu_D^* K_j(S_k)$ в виде

$$\mu_D^* K_j(S_k) = \min_{j=1, r} \mu_{ND}K_j(S_k, S_l). \quad (6)$$

Значение функции принадлежности $\mu_D^* K_j(S_k)$ показывает степень близости системы S_k к эффективной (Парето-оптимальной) по рассматриваемому скалярному j -му критерию качества.

Если в процессе решения в зависимости от смысла задачи необходимо выполнить условие (2), то выбор значения $\mu_D^* K_j(S_k)$ необходимо осуществлять из k -й ($k = \overline{1, n}; k \neq l$) строки оценочной матрицы $\|\mu_{ND}K_j(S_k, S_l)\|$.

Если в процессе решения в зависимости от смысла задачи необходимо выполнить условие (3), то выбор значения $\mu_D^* K_j(S_k)$ необходимо осуществ-

лять из l -го ($l = \overline{1, n}; l \neq k$) столбца оценочной матрицы $\|\mu_{ND}K_j(S_k, S_l)\|$.

Величину $\mu_D^* K_j(S_k)$ будем рассматривать как меру предпочтения, обеспечивающую объективный и достаточно адекватный реальности способ сравнения сложных систем, характеризующихся разнородными критериальными значениями, и устанавливающую значение приоритета системы при решении задачи выбора.

Проиллюстрируем рассматриваемый метод практическим примером.

Пример. Необходимо обосновать выбор лучшего варианта измерительной системы типа GANTRY, оставшиеся системы расположить в порядке убывания предпочтительности. Неэффективные системы из рассмотрения исключить.

Системы типа GANTRY осуществляют рентгеновскую компьютерную томографию сложных объектов и являются уникальным методом технической диагностики, которые объединяют информативные достоинства рентгеновского излучения с последними достижениями науки и вычислительной техники. Компьютерная томография — это метод получения изображения внутренней структуры объекта путем достаточно сложных вычислительных процедур при анализе первичных данных, получаемых посредством измерения поглощения рентгеновского излучения объектом исследования. Название *гентри* (GANTRY) в радиолокации обозначает систему антенн.

Выбор будем осуществлять из четырех вариантов систем, характеризующихся четырьмя критериями оптимальности, причем для критериев $K_1(S_\alpha)$, $K_3(S_\alpha)$, $K_4(S_\alpha)$ должно выполняться условие (3), а для критерия $K_2(S_\alpha)$ — условие (2). Варианты систем и значения критериев оптимальности представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, измеряемые критериальные величины разнородны и представлены в различных единицах измерения. Кроме того, в одной и той же задаче необходимо брать как минимум, так и максимум частных критериев качества.

Решение задачи

1. С использованием (4) определим значения функции принадлежности НОП $\mu_{K_1}(S_k, S_l)$ для

Таблица 1

Исходные данные для решения задачи

Критерии $K_j(S_\alpha)$	Системы S_α	<i>Mx8000Dual</i> (S_1)	<i>HiSpeed NX/i</i> (S_2)	<i>Somatom Plus 4</i> (S_3)	<i>Asteion Multi</i> (S_4)
Возможность реконфигурации системы в ходе измерения, $K_1(S_\alpha)$, баллы		1	3	4	5
Диаметр объекта контроля, $K_2(S_\alpha)$, см ²		31,2	15,6	37,4	18,7
Максимальная длина поля сканирования, $K_3(S_\alpha)$, см		171,7	367,2	149,49	304,44
Скорость движения опоры под объектом, $K_4(S_\alpha)$, мм/с		800	1200	1150	1100

всех k и l и результаты сведем в табл. 2, при этом $m_1 = 5$. Порядок расчета $\mu_{K_1}(S_k, S_l)$ следующий:

$$\mu_{K_1}(S_1, S_2) = \frac{1-3}{5} = 0; \mu_{K_1}(S_1, S_3) = \frac{1-4}{5} = 0;$$

$$\mu_{K_1}(S_1, S_4) = \frac{1-5}{5} = 0;$$

$$\mu_{K_1}(S_2, S_1) = \frac{3-1}{5} = 0,4; \mu_{K_1}(S_2, S_3) = \frac{3-4}{5} = 0;$$

$$\mu_{K_1}(S_2, S_4) = \frac{3-5}{5} = 0;$$

$$\mu_{K_1}(S_3, S_1) = \frac{4-1}{5} = 0,6; \mu_{K_1}(S_3, S_2) = \frac{4-3}{5} = 0,2;$$

$$\mu_{K_1}(S_3, S_4) = \frac{4-5}{5} = 0;$$

$$\mu_{K_1}(S_4, S_1) = \frac{5-1}{5} = 0,8; \mu_{K_1}(S_4, S_2) = \frac{5-3}{5} = 0,4;$$

$$\mu_{K_1}(S_4, S_3) = \frac{5-4}{5} = 0,2.$$

Аналогично определяем значения $\mu_{K_2}(S_k, S_l)$, $\mu_{K_3}(S_k, S_l)$, $\mu_{K_4}(S_k, S_l)$ для $m_2 = 37,4 \text{ см}^2$; $m_3 = 367,2 \text{ см}$; $m_4 = 1200 \text{ мм/с}$.

2. С использованием (5) находим значения $\mu_{NDK_1}(S_k, S_l)$, $\mu_{NDK_2}(S_k, S_l)$, $\mu_{NDK_3}(S_k, S_l)$ и $\mu_{NDK_4}(S_k, S_l)$. Полученные данные для $\mu_{NDK_1}(S_k, S_l)$ приведены в табл. 3.

3. С помощью (6) вычисляем интенсивность доминирования $\mu_D^* K_j(S_k)$ каждого варианта системы S_k по критериям K_1, K_2, K_3, K_4 . Данные сводим в табл. 4.

Функция принадлежности $\mu_D^* K_j(S_k)$ показывает степень полезности системы S_k по рассматриваемому частому критерию качества $K_j(S_k)$, и ее уже можно рассматривать как новый нормализованный критерий.

Графически результаты нормализации разнородных критериальных оценок вариантов измерительных систем представлены на рисунке (см. вторую сторону обложки).

Значения $\mu_D^* K_j(S_k)$ определяются в диапазоне $[0; 1]$, причем $\mu_D^* K_j(S_k) = 1$ означает, что система S_k является лучшей по j -му скалярному критерию в рассматриваемом множестве систем; $\mu_D^* K_j(S_k) = 0$ — худшей, а значение из диапазона $[0; 1]$ показывает приоритет системы при выборе. Чем приоритет выше, тем предпочтительней является рассматриваемая система S_k по j -му частному критерию качества.

В результате решения задачи все критериальные оценки приведены к общему виду, удобному для сравнения при решении задачи многокритериальной оптимизации СТС.

Таблица 2

Значения $\mu_{K_1}(S_k, S_l)$

Системы S_l \ Системы S_k	S_1	S_2	S_3	S_4
S_1	0	0	0	0
S_2	0,4	0	0	0
S_3	0,6	0,2	0	0
S_4	0,8	0,4	0,2	0

Таблица 3

Значения $\mu_{NDK_1}(S_k, S_l)$

Системы S_l \ Системы S_k	S_1	S_2	S_3	S_4
S_1	1	1	1	1
S_2	0,6	1	1	1
S_3	0,4	0,8	1	1
S_4	0,2	0,6	0,8	1
$\min \mu_{NDK_1}(S_k, S_l)$	0,2	0,6	0,8	1

Таблица 4

Значения $\mu_D^* K_j(S_k)$

Системы S_k \ $\mu_D^* K_j(S_k)$	$\mu_D^* K_1(S_k)$	$\mu_D^* K_2(S_k)$	$\mu_D^* K_3(S_k)$	$\mu_D^* K_4(S_k)$
S_1	0,2	0,59	0,47	0,67
S_2	0,6	1	1	1
S_3	0,8	0,42	0,41	0,96
S_4	1	0,92	0,83	0,92

Рассмотренный метод построения нечеткого отношения предпочтения на множестве сложных систем, характеризующихся скалярными разнородными критериями качества, позволил **постановку задачи** обоснования выбора СТС при выполнении условий (2), (3) преобразовать к следующему общему виду.

Требуется найти множество эффективных упорядоченных систем (кортеж предпочтений Парето) P^μ , для элементов которого $S_{k_i}^0$ справедливо

$$S_{k_1}^0 > S_{k_2}^0 > \dots > S_{k_n}^0$$

при выполнении условия

$$\mu_D^* K(S_{k_i}^0) = \max_{S_\alpha \in S} \mu_D^* K(S_\alpha). \quad (7)$$

2. Метод построения нечеткого отношения предпочтения на множестве сложных систем, характеризующихся векторным неоднородным критерием оптимальности

Проведенный анализ показал, что для решения задачи (7) наиболее эффективным представляется метод "жесткого" ранжирования. В ходе решения

этим методом анализируется множество упорядоченных пар систем $S_k \in S, S_l \in S (k = \overline{1, n}; l = \overline{1, n}; k \neq l)$, а результаты анализа заносятся в специальную оценочную матрицу $\|C_{kl}\|$. Сущность метода подробно изложена в [11, 12].

В ходе построения решающих правил "жесткого" ранжирования были использованы аналитические выражения Б. Руа. Ответственным этапом решения задачи этим методом является формирование коэффициентов важности критериев.

При несомненных достоинствах такого подхода недостатком метода "жесткого" ранжирования, как, впрочем, и всех аксиоматических методов принятия решений, к которым он относится [7], является то, что идет определение предпочтительности одного критерия над другим (т. е. определение того, что одна система лучше (хуже) другой по рассматриваемому критерию); далее каким бы то ни было субъективным (как правило, эвристическим или экспертным) методом вводятся коэффициенты важности критериев и уже с ними в дальнейшем проводятся различные вычисления. Однако не учитывается, на какое значение соответствующих критериев рассматриваемая система больше (меньше) друг друга; не определяется, насколько далека система от идеальной, кроме того, субъективизм назначения коэффициентов важности понижает достоверность принимаемого решения.

Для устранения этих недостатков при определении решающих правил предлагается применять не только схему Руа, но и метод построения нечеткого отношения предпочтения на множестве сложных систем, характеризующихся скалярными разнородными критериями качества. В результате такого подхода формула (8) для вычисления элементов C_{kl}

оценочной матрицы $\|C_{kl}\|$ при $N_{kl}^+ \neq \emptyset, N_{kl}^- \neq \emptyset, |N_{kl}^-| \geq 0$, где $N_{kl}^+, N_{kl}^-, N_{kl}^-$ — номера (соответственно лучших, худших и равных критериев), имеющая вид [11, 12]

$$C_{kl} = \sum_{j \in N_{kl}^+} a_j \left(\sum_{j \in N_{kl}^-} a_j \right)^{-1}, C_{lk} = C_{kl}^{-1}, \quad (8)$$

преобразуется к виду

$$C_{kl} = \left(\sum_{j \in N_{kl}^+} a_j \mu_D^* K_j(S_k) \right) \left(\sum_{j \in N_{kl}^-} a_j \mu_D^* K_j(S_l) \right)^{-1},$$

$$C_{lk} = C_{kl}^{-1}. \quad (9)$$

При этом физический смысл системы показателей $H_l, M_l, C_{kl\max}$, вводимых для формирования решающих правил и реализации метода "жесткого ранжирования" [11, 12], остается прежним, а именно:

- H_l показывает, сколько систем из рассматриваемого множества превышают l -ю;
- M_l — сколько вариантов доминирует l -я система;
- $C_{kl\max}$ определяет, во сколько раз l -я система "превышается" k -й.

Продолжение примера

Значения коэффициентов важности критериев для рассматриваемого примера приведены в табл. 5.

В результате использования формулы (9) оценочная матрица $\|C_{kl}\|$ для примера будет иметь вид, представленный в табл. 6.

Рассмотрим формирование коэффициентов C_{23}, C_{24} методом "жесткого" ранжирования:

$$C_{23} = \frac{a_2 + a_3 + a_4}{a_1} = \frac{0,5 + 0,3 + 0,05}{0,15} = 5,67;$$

$$C_{24} = \frac{a_2 + a_3 + a_4}{a_1} = \frac{0,5 + 0,3 + 0,05}{0,15} = 5,67$$

и с использованием предлагаемой его модификации:

$$C_{23} = \frac{a_2 \mu_D^* K_2(S_2) + a_3 \mu_D^* K_3(S_2) + a_4 \mu_D^* K_3(S_2)}{a_1 \mu_D^* K_1(S_3)} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot 1 + 0,3 \cdot 1 + 0,05 \cdot 1}{0,15 \cdot 0,8} = 7,08;$$

$$C_{24} = \frac{a_2 \mu_D^* K_2(S_2) + a_3 \mu_D^* K_3(S_2) + a_4 \mu_D^* K_3(S_2)}{a_1 \mu_D^* K_1(S_4)} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot 1 + 0,3 \cdot 1 + 0,05 \cdot 1}{0,15 \cdot 1} = 5,67.$$

Анализ формирования коэффициентов $C_{23}, C_{24}, C_{32}, C_{42}$ позволяет сделать вывод о том, что при ре-

Таблица 5

Значения коэффициентов важности

Критерии $K_j(S_k)$	Коэффициенты важности критериев a_j
$K_1(S_k)$	$a_1 = 0,15$
$K_2(S_k)$	$a_2 = 0,5$
$K_3(S_k)$	$a_3 = 0,3$
$K_4(S_k)$	$a_4 = 0,05$

Таблица 6

Оценочная матрица $\|C_{kl}\|$

Системы S_k	Системы S_l			
	S_1	S_2	S_3	S_4
S_1	—	0	2,56	0
S_2	N_2	—	7,08	5,67
S_3	0,39	0,105	—	0,06
S_4	N_2	0,176	17,06	—

Таблица 7

Характерные значения показателей

Характерные значения показателей	Системы			
	S_1	S_2	S_3	S_4
H_l	2	0	3	1
M_l	1	2	0	1
C_{klmax}	N_2	0,176	17,06	5,67

шении задачи методом "жесткого" ранжирования степень превосходства системы S_2 над S_3 и над S_4 одинаковая, а при решении задачи предлагаемым методом видно, что S_2 превосходит S_3 существенно сильнее, чем S_4 . Этот факт становится очевидным, если обратиться к рисунку.

Анализ оценочной матрицы (табл. 6) позволяет получить характерные значения показателей H_l , M_l , C_{klmax} , которые приведены в табл. 7.

В соответствии с решающими правилами "жесткого" ранжирования [11, 12] и анализом табл. 7 определяем, что система S_l является неэффективной (см. теорему 1 [11, 12]), поэтому из рассмотрения систему S_l исключаем.

Лучшей в соответствии с принятыми правилами является система S_2 , ее включаем в кортеж предпочтений Парето P^u .

Лучшей на следующем шаге решения является система S_4 .

Сформируем следующий кортеж предпочтений Парето $P^u = \{S_2, S_4, S_3\}$.

В результате решения задачи получили, что предпочтение при выборе следует отдать второй системе S_2 (*HiSpeed NX/i*).

Однако в реальных ситуациях достаточно часто оказывается, что относительную важность критериев (или признаков, по которым оцениваются альтернативы) невозможно достоверно описать соответствующими коэффициентами [7, 8]. Поэтому рассматриваемый метод позволяет при необходимости вместо коэффициентов важности использовать функции принадлежности $\mu_D^* K_j(S_k)$ и $\mu_D^* K_j(S_l)$, показывающие степень близости систем S_k и S_l к эффективной (Парето-оптимальной) по каждому из j -х частных критериев качества.

Для реализации такого подхода предлагается вместо (9) использовать формулу

$$C_{kl} = \left(\sum_{j=1}^r \mu_D^* K_j(S_k) \right) \left(\sum_{j=1}^r \mu_D^* K_j(S_l) \right)^{-1},$$

$$C_{kl} = C_{kl}^{-1}. \quad (10)$$

Порядок практической реализации предлагаемого подхода аналогичен представленным выше вычислениям.

Заключение

Таким образом, поставлена и решена важная в прикладном плане задача определения отношений предпочтения на множестве сложных технических систем для случая, когда критерии качества разнородны. Задача сводится к построению упорядоченного множества эффективных вариантов (кортежа предпочтений Парето) СТС.

Предложенный метод позволяет формировать многокритериальное предпочтение на множестве систем, характеризующихся векторным разнородным критерием качества, основан на сочетании отличительных свойств аксиоматических методов теории принятия решений и нечетких множеств. Отличительной особенностью предлагаемого метода является реализация идеи нормализации разнородных критериев оптимальности и возможность отказа от коэффициентов важности критериев при решении задач обоснования выбора сложных систем. На наш взгляд, метод может эффективно применяться при решении прикладных задач в экономике, социальной сфере, оценке вариантов сложных технических систем, в том числе и военного назначения.

Список литературы

1. Алтунин А. Е., Семухин М. В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2000. 352 с.
2. Ведерников Ю. В. Современные методы системного анализа. Монография. СПб.: Изд-во СПбИЭУ, 2007. 154 с.
3. Дубов Ю. А., Травкин С. И., Якимец В. Н. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. М.: Наука, 1986. 296 с.
4. Емельянов С. В., Ларичев О. И. Многокритериальные методы принятия решений. М.: Знание, 1985. 32 с.
5. Жуковин В. Е. Нечеткие многокритериальные модели принятия решений. Тбилиси: Мецниереба, 1988. 71 с.
6. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
7. Захаров И. Г. Обоснование выбора. Теория практики. СПб.: Судостроение, 2006. 528 с.
8. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, 1981, 203 с.
9. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Введение в системный анализ: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1989. 367 с.
10. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1982. 256 с.
11. Сафронов В. В., Ведерников Ю. В. Научно-методический аппарат векторной оптимизации систем контроля и управления сложными динамическими объектами при разнородных исходных данных // Приложение к журналу "Информационные технологии". № 11. С. 1—32.
12. Сафронов В. В. Основы системного анализа: методы многокритериального ранжирования: Монография / Поволж. кооп. ин-т Российского ун-та кооперации. Энгельс: Ред.-изд. центр ПКИ, 2007. 185 с.
13. Трахтенгерц Э. А. Взаимодействие агентов в многоагентных системах // АиТ. 1998. № 8. С. 3—52.

УДК 004.3

В. Н. Ефанов, д-р техн. наук, проф.,
Е. Н. Шевяхов,
 УГАТУ, г. Уфа

Согласованно- децентрализованное управление сложными техническими объектами

Предлагается принцип согласования динамических характеристик отдельных подсистем, которые образуются при декомпозиции сложной многосвязной системы в целях уменьшения ее размерности. Суть данного принципа состоит в том, что процедура синтеза сводится к последовательному включению локальных подсистем управления. При этом очередная подсистема, вводимая в управляющую часть, не нарушает динамические характеристики системы, заданные на предыдущих этапах синтеза. Приводится пример синтеза многосвязной системы управления газотурбинным двигателем.

Современные системы автоматического управления сложными техническими объектами строятся, как правило, в виде определенной совокупности подсистем, между которыми осуществлено функциональное распределение задач управления, т. е. строятся по децентрализованному способу [1]. Такая децентрализованная организация системы приводит к проблеме интеграции (композиции) локальных подсистем в единое целое [2]. Это связано с тем, что стремление подсистем управления оптимизировать собственные показатели качества функционирования препятствуют достижению того же в других подсистемах. В результате возникает так называемый интегративный эффект [3], суть которого заключается в том, что объединение оптимальных подсистем не обеспечивает оптимальных характеристик всей системы. Для устранения такого негативного эффекта приходится использовать критерии управления, позволяющие оценить поведение системы "в целом". В классе линейных систем с этой целью широко используется метод локализации корней характеристического полинома замкнутой системы в заданной области [4].

В настоящее время известны два подхода к решению данной задачи: децентрализованная стабилизация, предусматривающая использование локальных управлений для обеспечения желаемого распределения полюсов всей системы [5], и согласованное децентрализованное управление [6], при реализации которого вводятся дополнительные перекрестные связи между локальными подсистемами. Первый подход позволяет упростить задачу синтеза, разбив ее на ряд задач меньшей размерности. Однако, как показывают исследования, система должна

обладать в этом случае специальными структурными свойствами, иначе желаемое распределение всех полюсов оказывается невозможным. Второй подход имеет более универсальный характер, но при его использовании необходимо учитывать динамические характеристики всех взаимодействующих подсистем, что значительно увеличивает размерность задачи.

В данной статье предпринимается попытка использовать преимущества обоих подходов за счет специального механизма согласования локальных подсистем управляющей части.

Пусть объект управления описывается следующей системой уравнений в пространстве состояний:

$$\dot{\mathbf{x}}_0(t) = \mathbf{A}_0 \mathbf{x}_0(t) + \mathbf{B}_0 \mathbf{u}_0(t); \mathbf{y}_0(t) = \mathbf{C}_0 \mathbf{x}_0(t),$$

где $\mathbf{x}_0(t)$, $\mathbf{u}_0(t)$, $\mathbf{y}_0(t)$ — векторы переменных состояния, управлений и выходных координат с размерностями $\dim \mathbf{x}_0(t) = n$, $\dim \mathbf{u}_0(t) = l$ и $\dim \mathbf{y}_0(t) = m$ ($m < l$) соответственно; \mathbf{A}_0 , \mathbf{B}_0 , \mathbf{C}_0 — матрицы соответствующих размерностей.

Управляющую часть системы представим в виде совокупности подсистем следующего вида:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}}_i(t) &= \mathbf{F}_i \mathbf{z}_i(t) + \mathbf{v}_i(t); \\ \mathbf{y}_i(t) &= \mathbf{z}_i(t) + \mathbf{E}_i \mathbf{v}_i(t), \quad i = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{где } \mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\lambda_{n_i}^i & -\lambda_{n_i-1}^i & \dots & -\lambda_1^i \end{bmatrix}; \quad \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

$$\dim \mathbf{z}_i(t) = \dim \mathbf{v}_i(t) = n_i.$$

Элементы λ_j^i матрицы \mathbf{F}_i могут задаваться исходя из требований к заданному порядку астатизма системы и к заданной полосе пропускания, обеспечивающей требуемые фильтрующие свойства управляющей части. Взаимодействие объекта управления и управляющих подсистем опишем с помощью уравнений связей

$$\mathbf{v}_i(t) = \mathbf{T}_i [\mathbf{g}(t) - \mathbf{y}_0(t)]; \quad \mathbf{u}_0(t) = \sum_{i=1}^m \mathbf{G}_i \mathbf{y}_i(t), \quad i = \overline{1, m},$$

где $\mathbf{g}(t)$ — вектор задающих воздействий системы.

Процедура синтеза разбивается на ряд этапов, на каждом из которых в состав системы последовательно вводится соответствующая подсистема (1). При этом параметры матриц \mathbf{T}_i и \mathbf{G}_i выбирают таким образом, чтобы обеспечить желаемое распределение определенного числа корней характеристического полинома замкнутой системы. Чтобы

очередная подсистема не нарушала достигнутого распределения полюсов, структура матриц \mathbf{T}_i и \mathbf{G}_i должна обеспечивать билинейную зависимость коэффициентов характеристического полинома от элементов этих матриц.

Покажем, что сформулированному требованию удовлетворяют матрицы со следующей структурой:

$$\begin{aligned} (\mathbf{T}_i)_{pq} &= 0 \text{ для } p = \overline{1, v_i - 1}; (\mathbf{T}_i)_{pq} \neq 0 \text{ для } p = \overline{v_i, n_i}; \\ (\mathbf{G}_i)_{pq} &\neq 0 \text{ для } q = \overline{1, \gamma_i}; (\mathbf{G}_i)_{pq} = 0 \text{ для } q = \overline{\gamma_i + 1, n_i}, \\ p &= \overline{1, l}, \text{ причем } \gamma_i = v_i + 1. \end{aligned}$$

Для этого предположим, что в состав системы уже введено k подсистем ($k = \overline{0, m - 1}$) и вводится $(k + 1)$ -я подсистема. Тогда уравнения состояния системы будут иметь вид

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_k(t) &= (\mathbf{A}_k - \mathbf{B}_k \mathbf{G}_{k+1} \mathbf{E}_{k+1} \mathbf{T}_{k+1} \mathbf{C}_k) \mathbf{x}_k(t) + \\ &+ \mathbf{B}_k \mathbf{G}_{k+1} \mathbf{z}_{k+1}(t) + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_{k+1}(t) + \mathbf{Q}_{k+1} \mathbf{g}(t); \\ \dot{\mathbf{z}}_{k+1}(t) &= \mathbf{F}_{k+1} \mathbf{z}_{k+1}(t) - \\ &- \mathbf{T}_{k+1} \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k(t) + \mathbf{T}_{k+1} \mathbf{g}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{x}_k(t)$ — прямая сумма векторов $\mathbf{x}_0(t), \mathbf{z}_1(t), \mathbf{z}_2(t), \dots, \mathbf{z}_k(t)$ размерности $\dim \mathbf{x}_i(t) = N_k = n + \sum_{j=1}^k n_j$; $\mathbf{B}_k, \mathbf{C}_k$ — блочные матрицы, причем

$$\mathbf{B}_k = [\mathbf{B}_0, 0, \dots, 0]_{1 \times (k+1)}^T; \mathbf{C}_k = [\mathbf{C}_0, 0, \dots, 0]_{1 \times (k+1)}$$

$$\mathbf{u}_{k+1}(t) = \sum_{i=k+2}^m \mathbf{G}_i \mathbf{y}_i(t);$$

$$\mathbf{Q}_{k+1} = \mathbf{Q}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{G}_{k+1} \mathbf{E}_{k+1} \mathbf{T}_{k+1} (\mathbf{Q}_0 \equiv 0).$$

Рассмотрим выражение для характеристического полинома системы (2):

$$\begin{aligned} P_{k+1}(s) &= \\ &= \det \left[\frac{s \mathbf{I}_{N_k} - \mathbf{A}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{G}_{k+1} \mathbf{E}_{k+1} \mathbf{T}_{k+1} \mathbf{C}_k}{\mathbf{T}_{k+1} \mathbf{C}_k} \middle| \frac{-\mathbf{B}_k \mathbf{G}_{k+1}}{s \mathbf{I}_{n_{k+1}} - \mathbf{F}_{k+1}} \right]. \end{aligned}$$

Осуществляя эквивалентное преобразование определителя, которое заключается в том, что к первому столбцу блочной матрицы прибавляем второй столбец, умноженный справа на $\mathbf{E}_{k+1} \mathbf{T}_{k+1} \mathbf{C}_k$, получаем

$$P_{k+1}(s) = \det \mathbf{V}_{k+1}(s),$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{k+1}(s) &= \\ &= \left[\frac{s \mathbf{I}_{N_k} - \mathbf{A}_k}{(\mathbf{I}_{n_{k+1}} + (s \mathbf{I}_{n_{k+1}} - \mathbf{F}_{k+1}) \mathbf{E}_{k+1}) \mathbf{T}_{k+1} \mathbf{C}_k} \middle| \frac{-\mathbf{B}_k \mathbf{G}_{k+1}}{s \mathbf{I}_{n_{k+1}} - \mathbf{F}_{k+1}} \right]. \end{aligned}$$

Воспользуемся теоремой Лапласа для разложения определителя матрицы $\mathbf{V}_{k+1}(s)$ по элементам ее первых N_k строк:

$$\begin{aligned} \det \mathbf{V}_{k+1}(s) &= \sum_{\beta \in R_{N_k, N_k + n_{k+1}}} (-1)^{\delta(\alpha) + \delta(\beta)} \times \\ &\times \det \mathbf{V}_{k+1}[\alpha/\beta] \det \mathbf{V}_{k+1}(\alpha/\beta), \end{aligned} \quad (3)$$

здесь $\mathbf{V}_{k+1}[\alpha/\beta], \mathbf{V}_{k+1}(\alpha/\beta)$ — подматрицы матрицы $\mathbf{V}_{k+1}(s)$, стоящие на пересечении строк и столбцов с номерами, соответственно, принадлежащими множествам α и β и не принадлежащими этим множествам; $\alpha = \{\overline{1, N_k}\}$; $R_{N_k, N_k + n_{k+1}}$ — совокупность всех строго возрастающих последовательностей из N_k элементов множества $\{\overline{1, N_k + n_{k+1}}\}$; $\delta(\alpha) = \sum i_p$ для всех $i_p \in \alpha$; $\delta(\beta) = \sum i_p$ для всех $i_p \in \beta$.

Учитывая структуру матриц $\mathbf{T}_{k+1}, \mathbf{G}_{k+1}$ и \mathbf{F}_{k+1} , получаем

$$\det \mathbf{V}_{k+1}[\alpha/\beta] = 0, \text{ если } i_p \in \beta \text{ и } i_p > N_k + \gamma_{k+1};$$

$$\det \mathbf{V}_{k+1}(\alpha/\beta) = 0, \text{ если } \beta_p \subset \beta \text{ и } \beta_p = \{\overline{i_1, i_p}\},$$

где $N_k < i_r \leq N_k + \gamma_{k+1}, r = \overline{1, p}, p \geq 2$. В результате оказывается, что в формуле (3) $\det \mathbf{V}_{k+1}[\alpha/\beta] \times \det \mathbf{V}_{k+1}(\alpha/\beta) \neq 0$ только при $\beta = \alpha$ и $\beta = \{1, 2, \dots, i_1 - 1, i_1 + 1, \dots, N_k, N_k + i_2\}$ ($1 \leq i_1 \leq N_k, 1 \leq i_2 \leq \gamma_{k+1}$). В этом случае

$$\det \mathbf{V}_{k+1}[\alpha/\alpha] = \det(s \mathbf{I}_{N_k} - \mathbf{A}_k);$$

$$\det \mathbf{V}_{k+1}(\alpha/\alpha) = \det(s \mathbf{I}_{N_{k+1}} - \mathbf{F}_{k+1});$$

$$\begin{aligned} \det \mathbf{V}_{k+1}[\alpha/\beta] &= \\ &= \sum_{j_1=1}^{N_k} \sum_{j_2=1}^l (-1)^{N_k + j_1 + 1} \det(s \mathbf{I}_{N_k} - \mathbf{A}_k) \mathbf{B}_{j_1 j_2}^k \mathbf{G}_{j_2 i_2}^{k+1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \det \mathbf{V}_{k+1}(\alpha/\beta) &= \sum_{j_3=1}^{n_{k+1}} \sum_{j_4=1}^m (-1)^{j_3 + 1} \det(s \mathbf{I}_{n_{k+1}} - \\ &- \mathbf{F}_{k+1})(j_3/j_2) \mathbf{D}_{j_3 j_4}^{k+1}(s) \mathbf{C}_{j_4 i_1}^k. \end{aligned}$$

Здесь введено обозначение

$$\mathbf{D}_{k+1}(s) = (\mathbf{I}_{n_{k+1}} + (s\mathbf{I}_{n_{k+1}} - \mathbf{F}_{k+1})\mathbf{E}_{k+1})\mathbf{T}_{k+1};$$

$\mathbf{B}_{j_1 j_2}^k$, $\mathbf{G}_{j_2 i_2}^{k+1}$, $\mathbf{D}_{j_3 j_4}^{k+1}(s)$, $\mathbf{C}_{j_4 i_1}^k$ обозначены элементы матриц \mathbf{B}_k , \mathbf{G}_{k+1} , $\mathbf{D}_{k+1}(s)$, \mathbf{C}_k . В свою очередь,

$$\begin{aligned} \det(s\mathbf{I}_{n_{k+1}} - \mathbf{F}_{k+1})(j_3/i_2) = \\ = (-1)^{i_2+j_3} s^{i_2-1} \sum_{i_3}^{n_{k+1}-j_3} \lambda_{i_3}^{k+1} s^{n_{k+1}-j_3-i_3}, \end{aligned}$$

где $\lambda_{i_3}^{k+1} = 0$ при $i_3 = 0$.

Чтобы в более компактной форме записать выражение для $P_{k+1}(s)$, сформируем предварительно суммы

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{j_4 j_2}^k(s) = \\ = \sum_{i_1=1}^{N_k} \sum_{j_1=1}^{N_k} (-1)^{j_1+i_1} \mathbf{C}_{j_4 i_1}^k \det(s\mathbf{I}_{N_k} - \mathbf{A}_k)(j_1/i_1) \mathbf{B}_{j_1 j_2}^k; \\ \lambda_{j_3}^{k+1}(s) = \sum_{i_3=0}^{n_{k+1}-j_3} \lambda_{i_3}^{k+1} s^{n_{k+1}-j_3-i_3}. \end{aligned}$$

Используя введенные обозначения, находим

$$\begin{aligned} P_{k+1}(s) = \det(s\mathbf{I}_{N_k} - \mathbf{A}_k) \det(s\mathbf{I}_{n_{k+1}} - \mathbf{F}_{k+1}) + \\ + \sum_{j_2=1}^l \sum_{j_4=1}^m \left[\sum_{j_3=1}^{n_{k+1}} \lambda_{j_3}^{k+1}(s) \mathbf{D}_{j_3 j_4}^{k+1}(s) \right] \times \\ \times \mathbf{W}_{j_4 j_2}^k(s) \sum_{i_2=1}^{\gamma_{k+1}} \mathbf{G}_{j_2 i_2}^{k+1} s^{i_2-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

В матричной форме записи выражение (4) может быть представлено следующим образом:

$$P_{k+1}(s) = \det(s\mathbf{I}_{N_k} - \mathbf{A}_k) \det(s\mathbf{I}_{n_{k+1}} - \mathbf{F}_{k+1}) + \mathbf{\Lambda}_{k+1}(s) \mathbf{D}_{k+1}(s) \mathbf{W}_k(s) \mathbf{G}_{k+1} \mathbf{\Phi}_{k+1}(s), \quad (5)$$

где $\mathbf{\Phi}_{k+1}(s) = [\Phi_i(s)]_{n_{k+1} \times 1}$, $\Phi_i(s) = s^{i-1}$; $\mathbf{\Lambda}_{k+1}(s) = [\lambda_i(s)]_{1 \times n_{k+1}}$.

Таким образом, матрицы \mathbf{T}_{k+1} и \mathbf{G}_{k+1} входят в запись выражения для $P_{k+1}(s)$ билинейно.

Предположим теперь, что за счет введенных ранее подсистем в системе уже задано некоторое множество $\Xi_k^* = \{s_1^*, s_2^*, \dots, s_{\xi_k}^*\}$ полюсов. Чтобы $(k+1)$ -я подсистема не нарушала согласованное

взаимодействие уже введенных подсистем, необходимо сохранить распределение полюсов, заданных на предыдущих этапах синтеза. Для этого достаточно потребовать выполнения условий

$$\mathbf{W}_k(s_i^*) \mathbf{G}_{k+1} \mathbf{\Phi}_{k+1}(s_i^*) = 0; \quad s_i^* \in \Xi_k^*. \quad (6)$$

Поскольку $\text{rank}(\mathbf{W}_k(s_i^*)) = 1$, то вместо матрицы $\mathbf{W}_k(s_i^*)$ можно использовать любую ее строку $\mathbf{W}_j^k(s_i^*)$. В результате условия (6) будут эквивалентны системе линейных алгебраических уравнений относительно элементов матрицы \mathbf{G}_{k+1} :

$$(\mathbf{\Phi}_{k+1}^T(s_i^*) \otimes \mathbf{W}_j^k(s_i^*)) \widehat{\mathbf{G}}_{k+1} = 0$$

для любого $j \in \{\overline{1, m}\}$, $s_i^* \in \Xi_k^*$,

где $\widehat{\mathbf{G}}_{k+1}$ — прямая сумма столбцов матрицы \mathbf{G}_{k+1} ; \otimes — означает прямое (кронекерово) произведение матриц. Данная система имеет нетривиальное решение, если $h_{k+1} > \xi_k$.

Потребуем, чтобы с помощью матрицы \mathbf{T}_{k+1} было задано очередное множество $Z_{k+1}^* = \{s_{\xi_k+1}^*, s_{\xi_k+2}^*, \dots, s_{\xi_k+\zeta_{k+1}}^*\}$ полюсов синтезируемой системы

$$P_{k+1}(s_i^*) = 0, \quad s_i^* \in Z_{k+1}^*. \quad (7)$$

Последнее требование (7) тоже сводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно параметров искомой матрицы \mathbf{T}_{k+1}

$$\begin{aligned} [(\mathbf{W}_k(s_i^*) \mathbf{G}_{k+1} \mathbf{\Phi}_{k+1}(s_i^*))^T \otimes (\mathbf{\Lambda}_{k+1}(s_i^*) (\mathbf{I}_{n_{k+1}} + \\ + (s_i^* \mathbf{I}_{n_{k+1}} - \mathbf{F}_{k+1}) \mathbf{E}_{k+1}))] \widehat{\mathbf{T}}_{k+1} = -\det(s_i^* \mathbf{I}_{N_k} - \\ - \mathbf{A}_k) \det(s_i^* \mathbf{I}_{n_{k+1}} - \mathbf{F}_{k+1}), \quad s_i^* \in Z_{k+1}^*, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\widehat{\mathbf{T}}_{k+1}$ — прямая сумма столбцов матрицы \mathbf{T}_{k+1} .

Процедура синтеза завершится с введением в состав управляющей части последней подсистемы, если суммарное число полюсов, заданное на отдельных этапах синтеза, будет равно порядку синтезируемой системы

$$\sum_{i=1}^m \zeta_i = n + \sum_{i=1}^m n_i. \quad (9)$$

Для иллюстрации предложенного метода рассмотрим задачу синтеза системы автоматического управления турбореактивным двигателем с форсажной камерой и регулируемым реактивным соплом (ТРДФ).

Линеаризованная математическая модель одно-вального ТРДФ с учетом численных значений коэффициентов на максимальном режиме включает следующую совокупность дифференциальных уравнений [7]:

$$\begin{aligned} 0,606\dot{x}^{(0)}(t) + x^{(0)}(t) &= 0,655u_1^{(0)}(t) + \\ &+ 0,779u_2^{(0)}(t) - 0,224u_3^{(0)}(t); \\ y_1^{(0)}(t) &= 1,000x^{(0)}(t); \\ y_2^{(0)}(t) &= 0,192x^{(0)}(t) + 0,165u_1^{(0)}(t) + \\ &+ 1,053u_2^{(0)}(t) - 0,302u_3^{(0)}(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $y_1^{(0)}(t) = x^{(0)}(t)$ — частота вращения ротора турбокомпрессора; $y_2^{(0)}(t)$ — степень расширения газа в турбине; $u_1^{(0)}(t)$ — расход основного топлива; $u_2^{(0)}(t)$ — площадь проходного сечения реактивно-го сопла; $u_3^{(0)}(t)$ — расход форсажного топлива.

Приведем данную систему уравнений к виду

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}^{(0)}(t) &= \mathbf{A}_0\mathbf{x}^{(0)}(t) + \mathbf{B}_0\mathbf{u}^{(0)}(t); \\ \mathbf{y}^{(0)}(t) &= \mathbf{C}_0\mathbf{x}^{(0)}(t) + \mathbf{D}_0\mathbf{u}^{(0)}(t). \end{aligned} \quad (11)$$

Фигурирующие в (11) матрицы принимают следующие числовые значения: $\mathbf{A}_0 = [-1,650]$; $\mathbf{B}_0 = [1,081 \ 1,285 \ -0,370]$; $\mathbf{C}_0 = [1,000 \ 0,192]^T$; $\mathbf{D}_0 = [0 \ \mathbf{D}_0^{II}]^T$ — блочная матрица, $\mathbf{D}_0^{II} = [0,165 \ 1,053 \ -0,302]$.

Для обеспечения максимальной тяги двигателя на форсированном режиме с учетом сохранения условий для нормального протекания процессов в турбокомпрессоре воспользуемся следующим комплексом программ управления:

$$y_1^{(0)} = \text{const}; \quad y_2^{(0)} = \text{const}.$$

Реализация выбранных программ управления предусматривает независимое изменение параметров $y_1^{(0)}$ и $y_2^{(0)}$. Совместное управление этим комплексом выходных переменных с учетом минимизации их взаимного влияния обуславливает необходимость построения многосвязного регулятора. Еще одно важное требование, которое предъявляется к системе автоматического регулирования

ТРДФ, состоит в высокой точности реализации выбранных программ, что обуславливает использование астатических законов управления. Характер переходных процессов, вызванных управляющими воздействиями или возмущениями, должен быть по возможности монотонным, перерегулирование не должно превышать 2...4 %, а длительность переходного процесса не должна быть более 3...5 секунд.

Используя предложенную методику, разобьем процедуру синтеза на два этапа. На первом этапе осуществим синтез подсистемы управления частотой вращения ротора турбокомпрессора. Принимая во внимание изложенные выше соображения относительно использования астатических законов управления, данный регулятор опишем в виде (1)

$$\dot{z}_1(t) = v_1(t), \quad y_1(t) = z_1(t),$$

а взаимодействие объекта и управляющей подсистемы — уравнениями связи

$$v_1(t) = [T_1^{(1)} \ T_2^{(1)}]\varepsilon(t) = \mathbf{T}_1\varepsilon(t), \quad \varepsilon(t) = \mathbf{g}(t) - \mathbf{y}^{(0)}(t);$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{(0)}(t) &= [G_1^{(1)} \ G_2^{(1)} \ G_3^{(1)}]^T y_1(t) + \mathbf{r}_2(t) = \\ &= \mathbf{G}_1 y_1(t) + \mathbf{r}_2(t). \end{aligned}$$

Здесь слагаемое $\mathbf{r}_2(t)$ указывает на присутствие управления со стороны второй подсистемы, которая будет введена позднее.

Уравнения состояния системы, замкнутой первым регулятором, имеют вид

$$\dot{\mathbf{x}}^{(0)}(t) = \mathbf{A}_0\mathbf{x}^{(0)}(t) + \mathbf{B}_0\mathbf{G}_1 z_1(t) + \mathbf{B}_0\mathbf{r}_2(t);$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= -\mathbf{T}_1\mathbf{C}_0\mathbf{x}^{(0)}(t) - \mathbf{T}_1\mathbf{D}_0\mathbf{G}_1 z_1(t) - \\ &- \mathbf{T}_1\mathbf{D}_0\mathbf{r}_2(t) + \mathbf{T}_1\mathbf{g}(t). \end{aligned}$$

Запишем выражение для характеристического полинома системы

$$\begin{aligned} P_1(s) &= \det \left[\begin{array}{c|c} s - \mathbf{A}_0 & -\mathbf{B}_0\mathbf{G}_1 \\ \hline \mathbf{T}_1\mathbf{C}_0 & s + \mathbf{T}_1\mathbf{D}_0\mathbf{G}_1 \end{array} \right] = \\ &= (s - \mathbf{A}_0)(s + \mathbf{T}_1\mathbf{D}_0\mathbf{G}_1) + \mathbf{B}_0\mathbf{G}_1\mathbf{T}_1\mathbf{C}_0. \end{aligned} \quad (12)$$

При введении первой подсистемы заданные полюсы отсутствуют, поэтому параметры матрицы \mathbf{G}_1 могут быть выбраны произвольно, например, $\mathbf{G}_1 = [3,000 \ 5,000 \ 7,000]^T$.

Для обеспечения заданного быстродействия в системе потребуем, чтобы полюсы системы были локализованы в окрестности точки минус один.

Матрицу \mathbf{T}_1 найдем из условия (7) $P_1(s_1^*) = 0$, где $s_1^* = -1$ — первый желаемый полюс синтезируемой системы. Тогда уравнение (12) принимает вид

$$7,078 T_1^{(1)} + 3,729 T_2^{(1)} = 0,650.$$

Одно из возможных решений этого уравнения будет следующим:

$$\mathbf{T}_1 = [11 \quad -20,705].$$

Далее осуществляем синтез второго регулятора управляющей части, который опишем также в виде (1):

$$\dot{z}_2(t) = v_2(t), y_2(t) = z_2(t),$$

при этом

$$v_2(t) = [T_1^{(2)} \quad T_2^{(2)}] \varepsilon(t) = \mathbf{T}_2 \varepsilon(t), \varepsilon(t) = \mathbf{g}(t) - \mathbf{y}^{(0)}(t);$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{(0)}(t) &= \mathbf{G}_1 y_1(t) + [G_1^{(2)} \quad G_2^{(2)} \quad G_3^{(2)}] \Gamma y_2(t) = \\ &= \mathbf{G}_1 y_1(t) + \mathbf{G}_2 y_2(t). \end{aligned}$$

Тогда уравнения состояния замкнутой системы будут иметь вид

$$\dot{\mathbf{x}}^{(0)}(t) = \mathbf{A}_0 \mathbf{x}^{(0)}(t) + \mathbf{B}_0 \mathbf{G}_1 z_1(t) + \mathbf{B}_0 \mathbf{G}_2 z_2(t);$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= -\mathbf{T}_1 \mathbf{C}_0 \mathbf{x}^{(0)}(t) - \mathbf{T}_1 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_1 z_1(t) - \\ &- \mathbf{T}_1 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_2 z_2(t) + \mathbf{T}_1 \mathbf{g}(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_2(t) &= -\mathbf{T}_2 \mathbf{C}_0 \mathbf{x}^{(0)}(t) - \mathbf{T}_2 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_1 z_1(t) - \\ &- \mathbf{T}_2 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_2 z_2(t) + \mathbf{T}_2 \mathbf{g}(t). \end{aligned}$$

Рассмотрим характеристический полином этой системы:

$$\begin{aligned} P_2(s) &= \det \left[\begin{array}{cc|c} s - \mathbf{A}_0 & -\mathbf{B}_0 \mathbf{G}_1 & -\mathbf{B}_0 \mathbf{G}_2 \\ \mathbf{T}_1 \mathbf{C}_0 & s + \mathbf{T}_1 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_1 & \mathbf{T}_1 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_2 \\ \mathbf{T}_2 \mathbf{C}_0 & \mathbf{T}_2 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_1 & s + \mathbf{T}_2 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_2 \end{array} \right] = \\ &= (s + \mathbf{T}_2 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_2) P_1(s) - \mathbf{B}_0 \mathbf{G}_2 \mathbf{T}_2 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_1 \mathbf{T}_1 \mathbf{C}_0 + \\ &+ \mathbf{B}_0 \mathbf{G}_2 (s + \mathbf{T}_1 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_1) \mathbf{T}_2 \mathbf{C}_0 - \mathbf{T}_1 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_2 (s - \mathbf{A}_0) \mathbf{T}_2 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_1 - \\ &- \mathbf{T}_1 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_2 \mathbf{T}_2 \mathbf{C}_0 \mathbf{B}_0 \mathbf{G}_1. \end{aligned}$$

В соответствии с предложенным механизмом согласования взаимодействия подсистем, для сохранения динамических свойств системы, заданных на предыдущем этапе синтеза, потребуем выполнения равенства $P_2(s_1^*) = 0$. Учитывая, что $P_1(s_1^*) = 0$ по результатам первого этапа синтеза, это условие можно записать следующим образом: $\mathbf{T}_2 \mathbf{W}_1(s_1^*) \mathbf{G}_2 = 0$, где матрица $\mathbf{W}_1(s)$ имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_1(s) &= -\mathbf{D}_0 \mathbf{G}_1 [\mathbf{T}_1 \mathbf{C}_0 \mathbf{B}_0 + (s - \mathbf{A}_0) \mathbf{T}_1 \mathbf{D}_0] - \\ &- \mathbf{C}_0 [\mathbf{B}_0 \mathbf{G}_1 \mathbf{T}_1 \mathbf{D}_0 + (s + \mathbf{T}_1 \mathbf{D}_0 \mathbf{G}_1) \mathbf{B}_0]. \end{aligned}$$

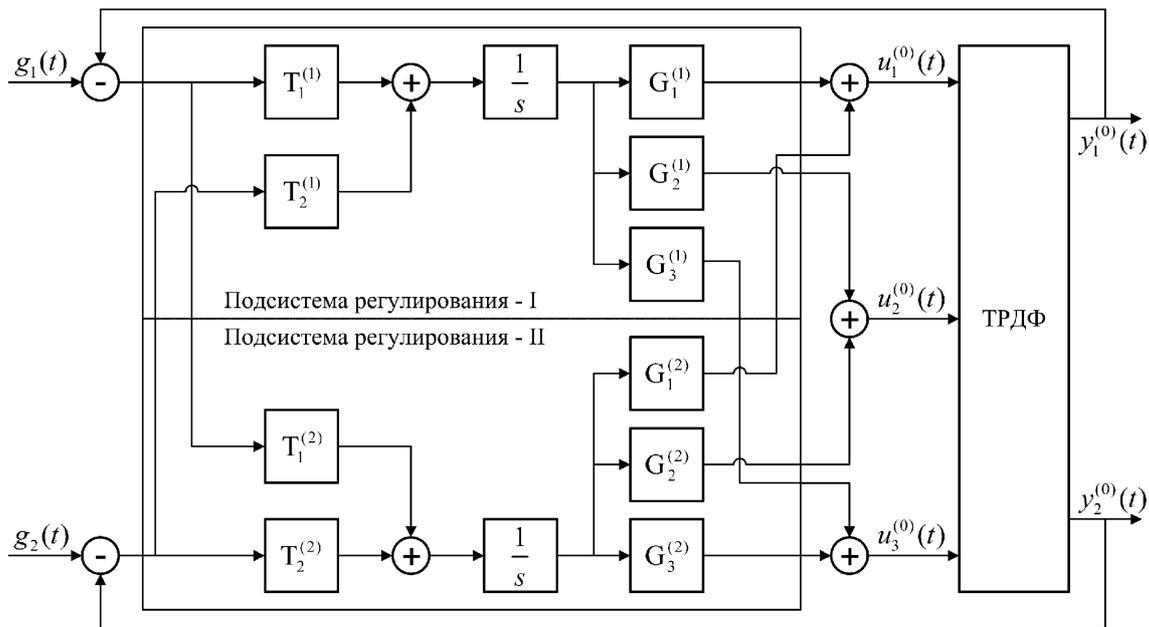


Рис. 1. Многосвязная система управления ТРДФ

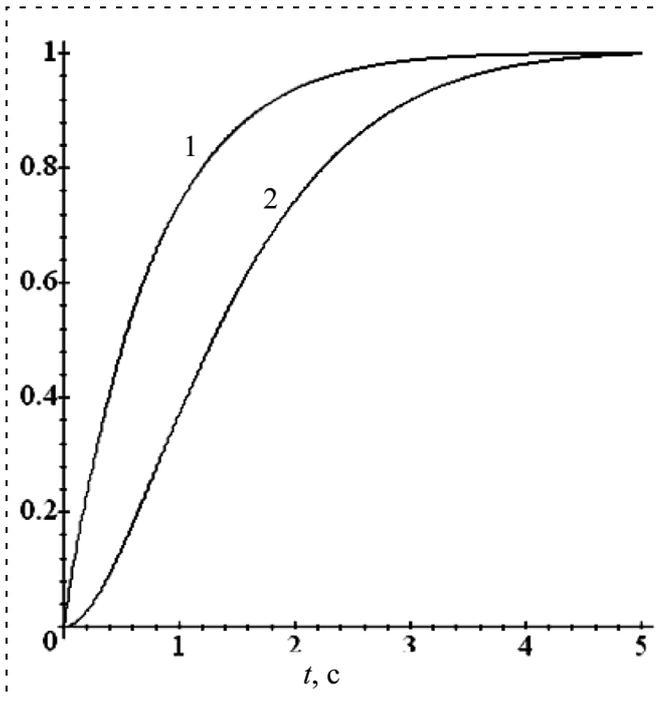


Рис. 2. Переходные процессы в синтезированной системе

Таким образом, чтобы вторая подсистема не изменяла положения заданного корня, необходимо обеспечить выполнение условия $W_1(s_1^*)G_2 = 0$. Так как $\text{rank}W_1(s) = 1$, то вместо матрицы

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} -57,426 + 1,081s & 57,313 + 1,285s & -16,327 - 0,370s \\ -18,159 + 12,664s & 109,257 + 79,740s & -31,276 - 22,870s \end{bmatrix}$$

можно использовать любую ее строку.

Выбирая первую строку указанной матрицы, получим уравнение вида (6):

$$-58,506 G_1^{(2)} + 56,028 G_2^{(2)} - 15,957 G_3^{(2)} = 0,$$

отсюда $G_2 = [13,000 \ -17,000 \ -107,355]^T$.

Учитывая, что порядок синтезируемой системы управления равен трем и с помощью первой подсистемы задан один полюс, необходимо задать еще два полюса $s_2^* = -1,05$, $s_3^* = -1,1$, следовательно, вновь составляем систему (7):

$$\begin{aligned} -1,596 T_1^{(2)} + 0,027 T_2^{(2)} &= 3,984; \\ -3,193 T_1^{(2)} + 0,137 T_2^{(2)} &= 8,354, \end{aligned}$$

из которой находим матрицу

$$T_2 = [-2,418 \ 4,619].$$

Характеристический полином многосвязной системы (рис. 1), замкнутой синтезированным регулятором, будет следующим:

$$P(s) = s^3 + 6s^2 + 11s + 6.$$

На рис. 2 показаны выходные реакции ТРДФ, где 1, 2 — переходные функции для степени расширения газа в турбине и частоты вращения ротора турбокомпрессора соответственно.

Предложенный принцип декомпозиции многосвязных регуляторов позволяет уменьшить размерность задачи синтеза за счет последовательного введения подсистем в управляющую часть системы, а также снизить сложность вычислений за счет сведения процедуры нелинейного параметрического синтеза к последовательности линейных задач. В то же время механизм согласованной децентрализации обеспечивает желаемое распределение всех полюсов замкнутой системы, что гарантирует заданный характер динамических процессов во всех каналах управления.

Список литературы

1. **Robust** stabilization of large space structures via displacement feedback / T. Wada, D. Siljak, Y. Ohta, and M. Ikeda // Proceedings of the International Symposium on the Mathematical Theory of Networks and Systems. 1991. P. 377—382.
2. **Decentralized** Controller Design of Large Scale System by Aggregation / M. Kidouche, A. Charef, M. Zelmat // The 17th IMACS World Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation. Paris. 2005. Paper T4-1-103-0789.
3. **Лазарев И. А.** Композиционное проектирование сложных агрегативных систем. М.: Радио и связь, 1986.
4. **Егупов Н. Д., Пупков К. А.** Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5 т. Изд. 2. М.: Изд-во МГТУ, 2004.
5. **Darwish M., Fantin I., Soliman H.** Dezentralized stabilization of large-scale dynamical systems // IEEE Trans. on system man. and cybern. 1979. SMC-9. № 11. P. 717—720.
6. **Воронов А. А.** Введение в динамику сложных управляемых систем. М.: Наука, 1985. 352 с.
7. **Сняжков А. Н., Шаймарданов Ф. А.** Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками. М.: Машиностроение, 1991. 320 с.

УДК 004.89 + 004.4'242:004.65:004.896

И. М. Макаров, акад. РАН,

В. М. Лохин, д-р техн. наук, проф.,

С. В. Манько, д-р техн. наук, проф.,

М. В. Кадочников, **М. С. Ситников**,

Московский государственный институт
радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет)

Использование генетических алгоритмов для автоматического формирования базы знаний интеллектуальной системы управления автономным мобильным роботом

Обсуждаются вопросы использования генетических алгоритмов для автоматического формирования базы знаний интеллектуальной системы управления автономным мобильным роботом. Показано, что один из самых сложных этапов автоматизации синтеза и настройки баз знаний на основе генетических алгоритмов, связанный с формированием функции полезности для оценки получаемых решений, можно существенно упростить за счет перехода от аналитической формы записи к логико-лингвистическому представлению, принятому в теории нечеткой логики.

Генетические алгоритмы являются эффективным инструментом не только для решения задач оптимизации, но и для реализации процессов обучения и самообучения в интеллектуальных системах управления. Однако применение генетических алгоритмов в этих целях должно в каждом конкретном случае осуществляться с учетом особенностей тех форм представления и технологий обработки знаний, которые положены в основу создаваемых образцов интеллектуальных систем управления.

Наглядным примером использования генетических алгоритмов для решения задач самообучения может служить разработка средств автоматического формирования базы знаний интеллектуальной системы управления движением автономного мобильного робота, предназначенного для работы в среде с препятствиями.

В качестве экспериментального прототипа рассматривается автономный мобильный мини-робот учебного назначения (рис. 1, см. вторую сторону обложки), собранный из стандартных элементов электромеханического конструктора LEGO.

Как показано на рис. 1, б (см. вторую сторону обложки), этот робот представляет собой мобильную платформу с двумя исполнительными двигателями постоянного тока, двумя инкрементными датчиками

вращения колес и восемь инфракрасными датчиками внешнего осязания для обнаружения препятствий в процессе движения. Аппаратные средства интеллектуальной бортовой системы управления включают микрокомпьютер LEGO MindStorms RCX и специализированный блок коммутации датчиков. Автономное питание обеспечивается бытовой малогабаритной батареей с напряжением +9 В.

Обобщенная функциональная схема интеллектуальной системы управления, представленная на рис. 2, построена по иерархическому принципу и включает подсистемы трех уровней.

Информационно-измерительная подсистема, имеющая в своем составе инкрементные датчики вращения колес, а также инфракрасные датчики обнаружения препятствий, обеспечивает сбор и обработку сенсорных данных для определения текущего состояния робота и решения навигационной задачи по определению рассогласования текущего положения и ориентации робота по отношению к заданной целевой точке.

Подсистема тактического уровня обеспечивает планирование целенаправленных перемещений робота с учетом его текущего положения по отношению к препятствиям внешней среды в соответствии с показаниями датчиков. Решение этой задачи в реальном времени при отсутствии априорно заданной карты местности осуществляется на основе обработки знаний, которые регламентируют правила поведения робота в тех или иных ситуациях. Следует отметить, что совокупность необходимых знаний может быть заложена в систему либо на этапе ее разработки, либо в процессе самообучения робота.

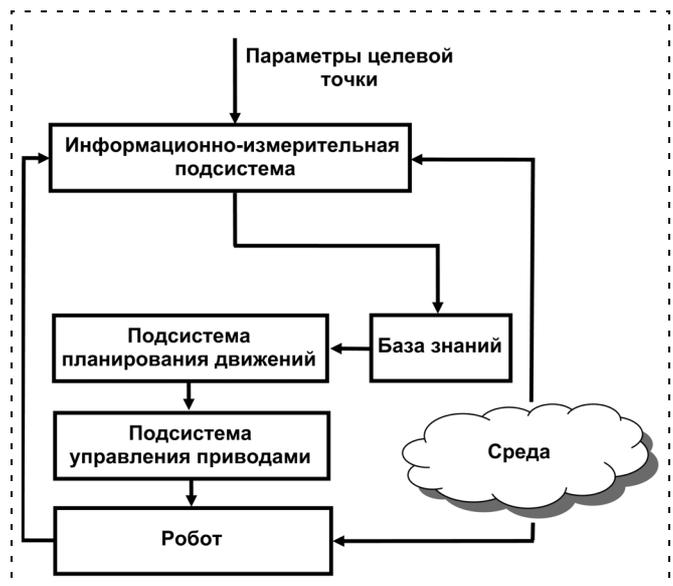


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема интеллектуальной системы управления автономным мобильным роботом

В свою очередь, подсистема исполнительного уровня обеспечивает независимое управление приводами в прямом и обратном направлениях для реализации тех или иных движений робота в соответствии с командами тактического уровня.

Таким образом, содержимое базы знаний тактического уровня управления, по существу, должно оговаривать некоторый набор правил, определяющих логику работы исполнительных приводов в зависимости от показаний датчиков обнаружения препятствий с учетом навигационных данных. Важно отметить, что для ряда принципиально различных ситуаций, примеры которых представлены на рис. 3, допустимо единое представление правил поведения робота, интерпретируемых на уровне состояний активированных датчиков, с одной стороны, и команд управления исполнительными приводами — с другой. Как видно из таблицы, подаваемые в соответствующих сочетаниях команды управления приводами двигателей колес задают допустимые типы движений робота.

В общем случае целый ряд различных ситуаций относительного текущего и конечного положений робота в среде с препятствиями может обуславливать необходимость выбора одного и того же типа движения. Поэтому условная часть правил целесообразного поведения автономного мобильного робота должна охватывать те альтернативные варианты сочетаний в показаниях датчиков обнаружения препятствий, которым сопоставляются определенные команды управления приводами колес.

В данном контексте постановка задачи самообучения автономного мобильного робота на основе использования генетических алгоритмов может быть фактически сведена к формированию некоторой совокупности логических связей между датчиками внешнего очувствления и приводами колес, обеспечивающей реализацию требуемых поведенческих функций.

Тогда каждой из двух команд управления отдельным приводом будет соответствовать свой дизъюнктивный набор датчиков, срабатывание которых должно приводить к вращению колеса в нужном направлении. Такие наборы могут кодироваться единой битовой последовательностью, составляющей содержательную часть базы знаний автономного мобильного робота.

Как показано на рис. 4, при наличии восьми датчиков внешнего очувствления, показания которых определяют вызов двух из четырех допустимых команд управления приводами колес робота, общая длина кодовой последовательности, выступающей в роли хромосомы, составляет 32 бита.

Ввиду ограниченности ресурсов вычислителя, установленного на борту экспериментального образца автономного мобильного робота, подсистема самообучения может быть реализована на внеш-

нем персональном компьютере в соответствии со схемой, которая представлена на рис. 5. При этом проверка работоспособности интеллектуальной системы управления, функционирующей на основе знаний, которые синтезируются в процессе самообучения с помощью генетического алгоритма, осуществляется в режиме машинного моделирования.

Эффективность использования генетических алгоритмов для решения различных прикладных за-

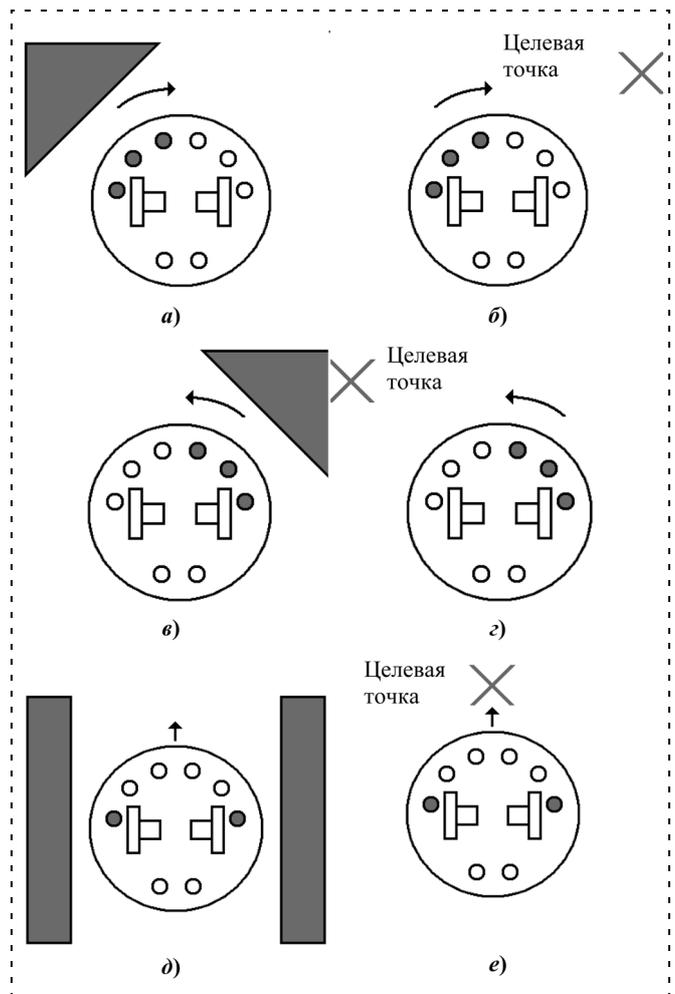


Рис. 3. Примеры действий автономного мобильного робота в различных типовых ситуациях: при обходе препятствий (а, в, д); при движении к заданной целевой точке (б, г, е)

Соответствие команд управления приводами колес типам движения робота

Команды управления приводами колес	Типы движения робота
Вращение обоих колес в одном направлении	Движение робота вперед/назад
Левое колесо вперед, правое колесо назад	Разворот робота вправо
Правое колесо вперед, левое колесо назад	Разворот робота влево

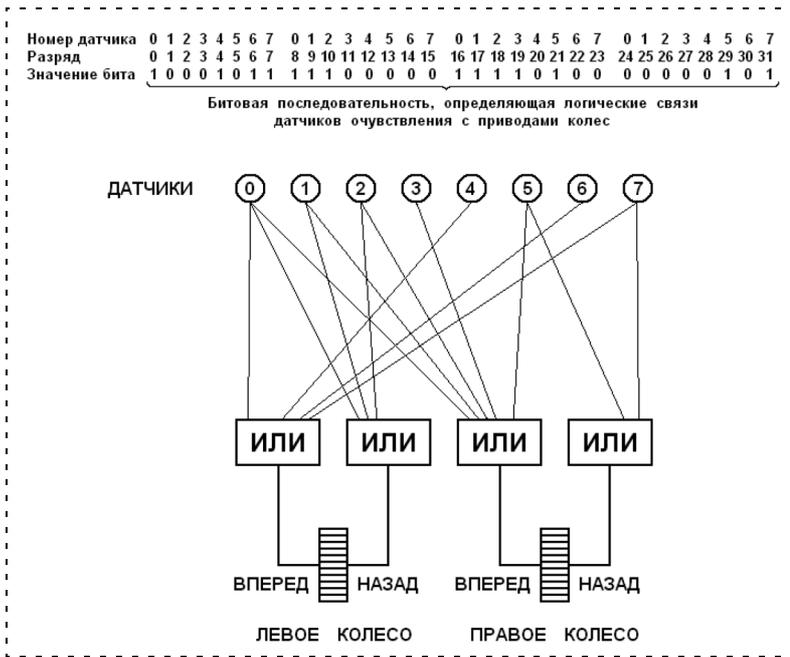


Рис. 4. Представление правил целесообразного поведения мобильного робота в виде кодируемой совокупности логических связей датчиков внешнего ощущения и приводов двигателей колес

дач, включая организацию процедур самообучения, во многом зависит от выбора функции оценки степени полезности порождаемых хромосом. В данном конкретном случае, когда отдельно взятая хромосома определяет поведенческие возможности мобильного робота, функция оценки ее полезности, очевидно, должна обеспечивать учет всего многооб-

разия параметров, которые характеризуют реализацию движений, направленных на достижение заданного целевого положения.

Так, совокупность факторов, качественно отличающих поведение робота при целенаправленном движении в среде с препятствиями, включает изменение рассогласования между текущим и заданным конечным положениями мобильной платформы, пройденное суммарное расстояние для каждого из колес, число и углы поворотов и т. д. Поэтому функция оценки степени полезности хромосом, формируемая в аналитической форме записи, будет иметь достаточно сложный вид, а именно

$$f = \left(\frac{\sum_0^t \left((1 - T) \frac{1}{1 + |Q|} + T \right) A}{1 + \frac{\Delta X_k \times 100}{\Delta X_n}} \right), \quad (1)$$

где t — априорно задаваемое время жизни особи; Q — угол поворота робота (в радианах); $T = (0, 1)$ — логическая переменная, определяющая факт отсутствия или наличия препятствий соответственно; $A = (0, 1)$ — логическая переменная, определяющая факт отсутствия или наличия движения соответственно; ΔX_n — начальное рассогласование робота с целевой точкой ($t = 0$); ΔX_k — конечное рассогласование робота с целевой точкой по истечению времени жизни особи t .

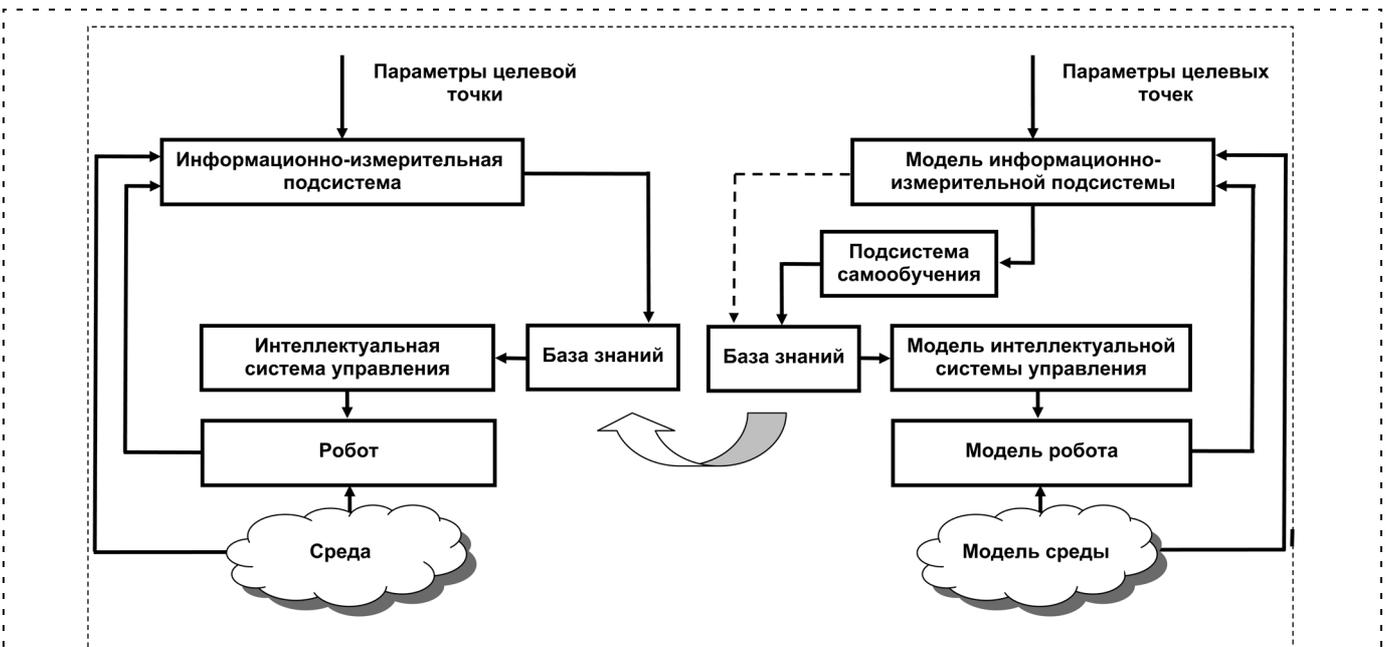


Рис. 5. Организация процессов самообучения интеллектуальной системы управления экспериментальным образцом автономного мобильного робота

Знаменатель этого выражения соответствует оценке относительного изменения рассогласования текущего и целевого положений робота. Если по истечению времени жизни особи рассогласование остается неизменным ($\Delta X_k = \Delta X_n$), то знаменатель принимает максимально возможное значение и становится равным $1 + 1 \cdot 100 \approx 100$. В этом случае при прочих равных условиях значение функции полезности будет наименьшим. Если по истечению времени жизни особи рассогласование принимает нулевое значение ($\Delta X_k = 0$), то знаменатель становится равным 1. В этом случае при прочих равных условиях значение функции полезности будет наибольшим.

Числитель функции полезности (1) состоит из суммы двух сомножителей, физический смысл каждого из которых соответствует отдельным аспектам оценки рассматриваемой особи. При этом исследуется качество движений робота, выполняемых в течение заданного периода времени t на основе той системы поведенческих правил, которые регламентируются данной конкретной хромосомой.

Первый сомножитель позволяет обеспечить оценку целесообразности перемещений робота с учетом поворотов, совершаемых при отсутствии препятствий ($T = 0$), и представляет собой довольно сложное выражение:

$$\left((1 - T) \left(\frac{1}{1 + |Q|} \right) + T \right). \quad (2)$$

При наличии препятствий ($T = 1$) единичное значение выражения (2) позволяет обеспечить оценку целесообразности линейных перемещений робота в соответствии с соотношением (1).

Последний сомножитель в числителе функции полезности (1) предотвращает увеличение текущего значения функции полезности при отсутствии самого факта движения робота.

Как показано на рис. 6, 7 (см. третью сторону обложки), сформированная в аналитическом виде функция полезности (пригодности) (1) обусловила возможность успешного применения генетического алгоритма для реализации процесса самообучения интеллектуальной системы управления движением мобильного робота в среде с препятствиями.

Организация процессов самообучения на основе генетических алгоритмов с нечеткой функцией полезности. Использование генетических алгоритмов в качестве инструментального средства для решения различных практических задач, включая автоматизацию синтеза и настройки баз знаний, самообучение и самоорганизацию интеллектуальных систем, предполагает наличие функции полезности, позволяющей обеспечить оценку получаемых решений по тем или иным критериям.

При этом формирование функции полезности в аналитической форме записи является одним из

самых сложных и ответственных этапов, трудоемкость выполнения которого во многих случаях (например, тогда, когда речь идет о самообучении интеллектуального робота или самоорганизации многозвенной мехатронно-модульной структуры в контексте возникновения новых прикладных постановок) вступает в принципиальное противоречие с пониманием и идеологией автоматизации.

Исходя из перспектив развития средств естественно-языкового человеко-машинного интерфейса [1] использование методов и технологий нечеткой логики [2] для лингвистического описания задач и критериев качества обучения интеллектуальных систем является гораздо более привлекательным.

В связи с этим исследование возможностей организации процесса самообучения интеллектуального мобильного робота на основе применения генетического алгоритма с "нечеткой" функцией полезности представляет особый интерес и актуальность.

В своем простейшем варианте логико-лингвистическая модель для формирования нечетких оценок эффективности обучения интеллектуального мобильного робота должна обеспечивать отражение качественных взаимосвязей между параметрами рассогласования колесной платформы с точкой ее целевого позиционирования, с одной стороны, и соответствующими величинами функции полезности — с другой. Подобная модель создается в виде набора отдельных правил, сопоставляющих лингвистические значения входных и выходных переменных:

ЕСЛИ рассогласование по величине ЕСТЬ малое, ТО полезность ЕСТЬ очень большая;

ЕСЛИ рассогласование по величине ЕСТЬ большое, ТО полезность ЕСТЬ очень малая;

ЕСЛИ рассогласование по углу ЕСТЬ малое, ТО полезность ЕСТЬ большая;

ЕСЛИ рассогласование по углу ЕСТЬ большое, ТО полезность ЕСТЬ малая;

ЕСЛИ движение ЕСТЬ нулевое, ТО полезность ЕСТЬ нулевая.

Следует отметить, что представленная логико-лингвистическая модель ориентирована на оценку целесообразности поведения робота при движении в свободной среде. При движении робота в среде с препятствиями выполняемые им маневры сопряжены, в первую очередь, с изменением ориентации, что приводит к увеличению угла рассогласования по отношению к направлению на целевую точку. Поэтому в данном случае оценка целесообразности движений робота должна проводиться без учета третьего и четвертого правил.

Приведенные соображения позволяют скомпоновать логико-лингвистическую модель для формирования нечетких оценок эффективности обучения интеллектуального мобильного робота в следующем конечном виде:

ЕСЛИ *рассогласование по величине* **ЕСТЬ** *малое,*
ТО *полезность* **ЕСТЬ** *очень большая;*
ЕСЛИ *рассогласование по величине* **ЕСТЬ** *большое,*
ТО *полезность* **ЕСТЬ** *очень малая;*
ЕСЛИ *препятствия* **ЕСТЬ** *отсутствуют*
И *рассогласование по углу* **ЕСТЬ** *малое,*
ТО *полезность* **ЕСТЬ** *большая;*
ЕСЛИ *препятствия* **ЕСТЬ** *отсутствуют*
И *рассогласование по углу* **ЕСТЬ** *большое,*
ТО *полезность* **ЕСТЬ** *малая;*
ЕСЛИ *движение* **ЕСТЬ** *отсутствует,*
ТО *полезность* **ЕСТЬ** *нулевая.*

Функции принадлежности, характеризующие один из допустимых вариантов настройки модели и определяющие степень достоверности, с которой значения физических параметров могут быть соотнесены с конкретными категориями той или иной лингвистической переменной, приведены на рис. 8, 9. Подобное построение функций принадлежности с равномерным распределением вдоль осей изменения входных и выходных параметров может быть полностью автоматизировано, что позволяет ограничить участие пользователя в формировании функции полезности исключительно составлением собственно совокупности правил, входящих в состав логико-лингвистической модели. Логическая обработка правил и вывод заключений, осуществляемые традиционным способом на основе отыскания центра тяжести композиции MAX-MIN [3], обеспечивают расчет значений функции полезности, которые суммируются на периоде жизни тестируемой особи.

Результаты проведенных модельных экспериментов и последующих натурных испытаний подтвердили эффективность предложенного подхода к автоматизации процессов формирования базы знаний интеллектуального мобильного робота в режиме самообучения на основе применения генетического алгоритма с нечеткой функцией оценки полезности хромосом.

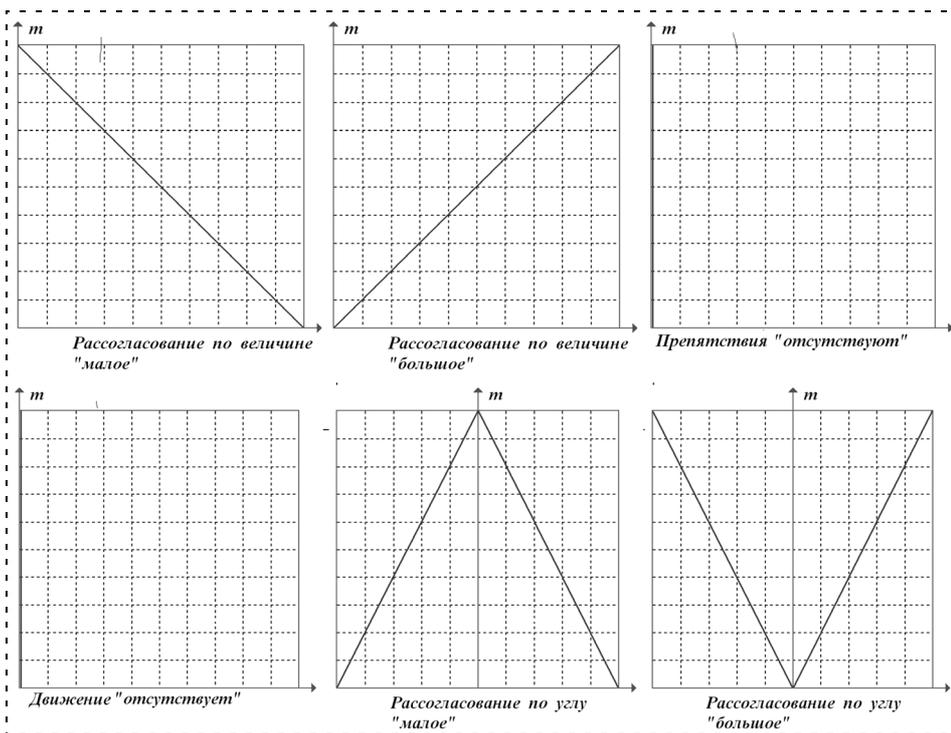


Рис. 8. Функции принадлежности входных переменных логико-лингвистической модели для формирования нечетких оценок эффективности обучения интеллектуального мобильного робота с помощью генетического алгоритма

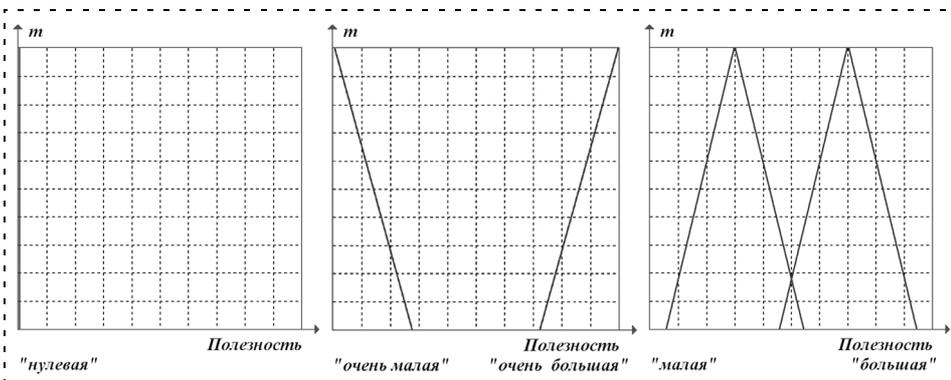


Рис. 9. Функции принадлежности выходной переменной логико-лингвистической модели для формирования нечетких оценок эффективности обучения интеллектуального мобильного робота с помощью генетического алгоритма

Список литературы

1. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Евстигнеев Д. В., Семенов А. В. Интеллектуальные робототехнические системы: принципы построения и примеры реализации. Ч. 1, 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 11, 12.
2. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. Макарова И. М., Лохина В. М. М.: Физматлит, 2001.
3. Прикладные нечеткие системы / Под ред. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. М.: Мир, 1993.

УДК 621.865.8

Ермолов И. Л., канд. техн. наук, доц.,
Московский государственный
технологический университет "СТАНКИН"

Автономность мобильных роботов, ее сравнительные меры и пути повышения

Рассмотрен вопрос автономности мобильных роботов — одно из ключевых направлений исследований, проводимых на кафедре робототехники и мехатроники МГТУ "СТАНКИН". Целью данных исследований является повышение автономности мобильных роботов.

Мобильная робототехника. Отличительные черты состояния развития

В отличие от промышленной робототехники мобильная робототехника продолжает интенсивно развиваться. Фактически развитие мобильной робототехники в ее современном виде стало возможным после появления компактных ЭВМ, которые сделали реальным построение бортовых систем управления для мобильных роботов. Бурное развитие мобильной робототехники началось в первой половине 90-х годов XX века и продолжается в настоящее время.

Такое развитие обусловило: резкое повышение производительности бортовых систем управления, применение новых типов датчиков, появление различных конфигураций механического компонента роботов, обеспечение выполнения роботами новых функций, оснащение мобильных роботов новым оборудованием.

Как следствие, наблюдается расширение областей применения мобильных роботов. В настоящее время мобильные роботы наиболее активно используются в системах вооружения, службами безопасности, коммунальными службами.

Трудно выделить доминирующих мировых производителей мобильных роботов, поскольку рынок в этой сфере еще не сложился и также переживает бурное развитие. Среди отечественных производителей следует отметить Ковровский электромеханический завод (мобильные робототехнические комплексы для служб безопасности), ОАО "Конструкторское бюро "Луч" (беспилотные летающие аппараты) и НПО "ТАРИС" (мобильные инспекционные и технологические роботы для коммунальных служб). Эти производители не только выпускают мобильные роботы серийно, но уже сменили несколько поколений выпускаемой техники.

В целом можно отметить, что основные развитые страны сделали однозначный вывод о значимости мобильной робототехники. Индикатором может

быть активное развитие робототехники в США, принятие специальной программы развития робототехники Европейским Союзом, признание важности этой области техники руководством РФ.

Многие страны выделяют в качестве одного из важнейших направлений исследований, связанное с повышением автономности мобильных роботов.

Понятие "автономность" в мобильной робототехнике

Основной проблемой автоматизации управления роботов является особенность среды функционирования роботов. Мобильные роботы, как правило, работают в условиях, когда информация о состоянии окружающей среды минимальна (т. е. в так называемых недетерминированных средах), причем эта информация недетерминирована как статически (наличие и местоположение препятствий, форма и состояние дорожного покрытия), так и динамически (текущее местоположение и скорость движущихся объектов).

По этой причине большинство мобильных роботов, начиная с прототипа мобильной робототехники — советского "Лунохода-1" и вплоть до современных серийно выпускаемых мобильных роботов (например, С-200 производства НПО "ТАРИС", рис. 1, см. вторую сторону обложки), как правило, управляются человеком-оператором в дистанционно-управляемом или супервизорном режиме.

Однако такое вмешательство человека налагает определенные ограничения на работу робота, поскольку

- существует возможность ошибки человека-оператора;
- скорость принятия решений человеком-оператором низкая, и, как следствие, имеются существенные временные задержки;
- требуется преобразование информации, поступающей от робота, в вид, воспринимаемый человеком-оператором.

Эти ограничения могут привести к неисправностям робота, невозможности выполнить задание, разрушению робота или повреждению элементов окружающей среды.

Способность робота выполнять поставленные ему задачи без непосредственного участия человека-оператора определяется термином "автономность робота".

Соответственно комплекс мер по обеспечению самостоятельности функционирования робота обозначают как действия по *повышению автономности робота*.

В технике этот термин впервые активно стал применяться в морском деле. Так, в БСЭ появляется термин "автономность корабля", определяемый как продолжительность непрерывного плава-

ния корабля без пополнения запасов, причем эта характеристика определяется как наличие запасов топлива, воды, продовольствия и боеприпасов.

Появление мобильных роботов, являющихся синергетическим воплощением мехатронного принципа, внесло новую струю в понимание автономности в технике [4, 5]. В [6] дается определение автономности мобильного робота как уровня его взаимодействия с оператором, чем более абстрактны задачи, выдаваемые оператором роботу, тем более автономен робот.

В специальном труде, посвященном вопросам автономности [3], дается определение, что автономность — это способность робота четко реагировать на изменения окружающей среды. Данное определение затрагивает важный аспект автономности — изменяющиеся условия среды, однако при этом упускаются другие, не менее важные, составляющие автономности.

В [2] предлагается определение: автономные системы управления должны хорошо функционировать при условии наличия неопределенности как самих систем, так и окружающей среды в течение продолжительных периодов времени; они должны быть способны компенсировать сбои системы без внешнего вмешательства. Данное определение является, очевидно, наиболее полным. Однако в нем отсутствует такой фактор, как фактор пространства, важный для мобильной робототехники. Без него понятие автономности в значительной мере совпадает с определением интеллектуальности [1].

В целом, по мнению автора, до настоящего времени не удалось найти такое определение автономности, чтобы оно было достаточно обобщенным и могло использоваться не только на современной стадии развития робототехники, но и в перспективе. Это важно, поскольку правильно сформулированное определение фактически обозначает направление развития техники в данной области.

В связи с этим автор предлагает следующее определение: *автономность робота — это способность робота существовать и выполнять свое функциональное предназначение в протяженных времени и пространстве, а также при изменяющихся задачах и ус-*

ловиях окружающей среды, без необходимости взаимодействия с другими дружественными субъектами или субъектами высшего уровня иерархии.

Можно привести классификацию автономности *по видам* как автономность во времени, в пространстве, в условиях изменяющихся задач и в условиях недетерминированной окружающей среды (рис. 2).

Исходя из природы мобильных роботов можно обобщенно различать три вида автономности *по средствам* или способам обеспечения автономности (рис. 3):

- автономность информационная;
- автономность интеллектуальная (или автономность управления);
- автономность материально-техническая.

Очевидно, что различные средства обеспечения различных видов автономности могут дополнять друг друга, быть независимыми или же противоречить друг другу.

Фактически такая классификация проистекает из базового принципа функционирования индивида. В зарубежной военной литературе этот принцип известен как *"процесс почувствуй — осознай — отреагируй"* (*Sense—Reason—Act process*).

Автономность информационная характеризует способность субъекта получать информацию о самом себе и о состоянии окружающей среды без непосредственного участия других субъектов и субъектов высшего уровня иерархии.

Автономность интеллектуальная (ее также называют автономностью управления) характеризует способность субъекта принимать решения в зависимости от имеющегося задания, а также от состояния самого субъекта и окружающей среды без непосредственного участия в принятии решения других субъектов и, прежде всего, субъектов высшего уровня иерархии. Этот вид автономности, по сути, характеризует степень интеллектуальности робота.

Автономность материально-техническая характеризует способность субъекта самостоятельно выполнять функциональные задания без получения дополнительных материально-технических средств от других дружественных субъектов и, прежде всего, субъектов высшего уровня иерархии.

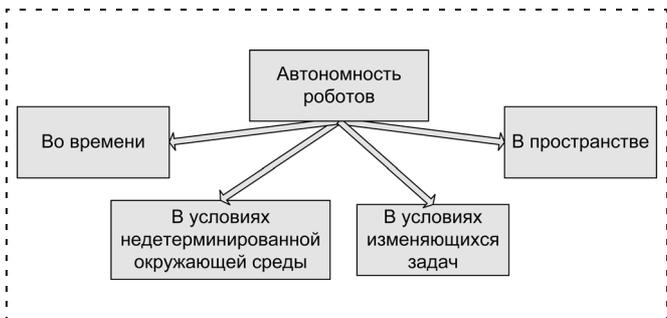


Рис. 2. Виды автономности роботов

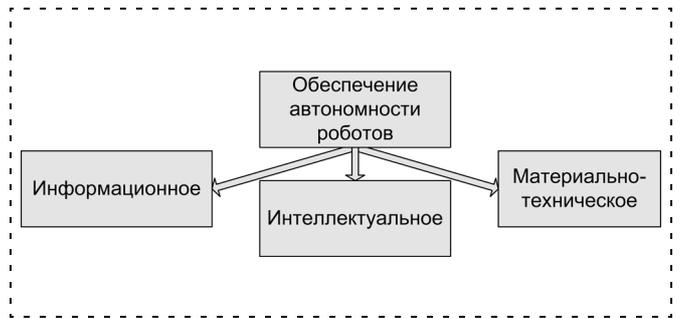


Рис. 3. Виды обеспечения автономности роботов

Сравнительные меры, определяющие уровень автономности роботов

В целях эффективного применения, проектирования, модернизации, подготовки операторов целесообразно сформулировать меру, характеризующую уровень автономности различных моделей роботов. Эта задача является достаточно сложной, поскольку описание функционирования робота и его взаимодействия со средой требует рассмотрения множества параметров и характеристик.

Одна из первых мер автономности, разработанная и примененная в технике, впервые была представлена в 1992 г. Шериданом (Sheridan) в [10].

В 2000 г. Национальное агентство по авионавтике и исследованию космического пространства США (NASA) представило более подробную категоризацию уровней автономности в соответствии с различными этапами функционирования автономной системы (в данной статье рассматривается взаимодействие космонавта и автоматизированной системы управления космического корабля). Автономность оценивалась по следующим категориям: получение данных, получение информации, принятие решения, осуществление действия.

В июле 2003 г. в США в рамках сотрудничества Министерства обороны США и Национального института стандартов и технологии США (*National Institute of Standards and Technology*) сформирована специальная рабочая группа ALFUS (*Autonomy Levels for Unmanned Systems Ad Hoc Work*) по выработке мер автономности для автоматизированных безоператорных систем (имеются в виду, в первую очередь, роботизированные системы).

К настоящему времени рабочая группа ALFUS разработала следующую модель определения автономности робота (рис. 4) [9].

Эта модель является трехосевой, в которой показатель уровня автономности определяется интегрально: сложностью задания, выполняемого роботом; сложностью окружающей среды; степенью взаимодействия с человеком-оператором, необходимого для выполнения миссии. Кривые обозначают свойства автономности различных роботов. Они могут, в том числе, определять максимальные показатели автономности, поскольку образуют поверхность, характеризующую гарантированную автономность робота для данных условий.

Сложность окружающей среды:

- статическая: тип рельефа, почвы
- динамическая: число объектов, их плотность, тип
- наличие радиопомех
- городская, сельская, климатическая
- операционная: угрозы, ложные цели

Сложность задачи:

- подзадачи, решения
- организация
- совместные действия
- уровень исполнения
- детерминированность ситуации
- требования к уровню знаний

Независимость от человека:

- % решений/времени супервизорного управления, степень доверия
- наличие опыта/квалификации
- тип и соотношение коммуникаций между человеком и роботом

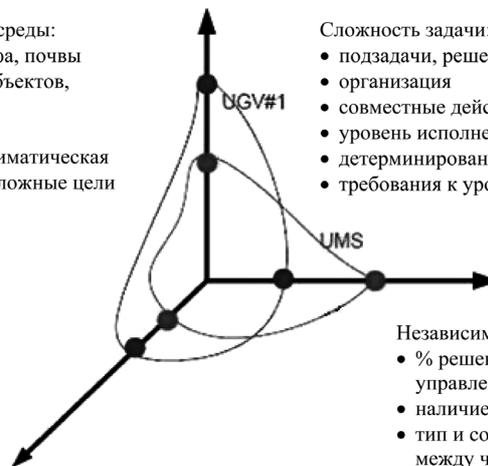


Рис. 4. Модель автономности по ALFUS (UGV, UMS — различные модели мобильных роботов)

Для определения же единого показателя автономности предлагается применять обобщающую методику. В итоге каждая модель робота должна получить обобщенную оценку автономности — целое число от 1 до 10, где 10 соответствует показателю автономности робота, способного выполнять сложнейшие задачи, делая это в оптимальном режиме и полностью независимо от человека-оператора.

Данная работа находится пока в исследовательской стадии.

Более актуальным, с точки зрения практического применения роботов, является определение так называемой локальной автономности, т. е. способности робота независимо функционировать в определенной среде, для выполнения определенных заданий в течение определенного интервала времени.

Работы в данном направлении в настоящее время активно ведутся в системе научно-исследовательских институтов Франции CNRS, особенно в подразделении LAAS (*Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systemes* — Лаборатория анализа архитектуры систем), расположенном в Тулузе.

В частности, в качестве математической меры для описания свойств окружающей среды предлагается применять выражение для энтропии

$$H = \sum_i - p(dens_i) \log(p(dens_i)),$$

где $p(dens_i)$ — число препятствий i -го размера на рассматриваемом участке среды. При этом подразумевается, что

$$\sum_i p(dens_i) = 1.$$

Фактически, таким образом, описывается распределение препятствий на рассматриваемом участке среды, однако заверченный вид системы определения автономности пока не приводится.

Автор предлагает использовать численные меры F^* (от английского *feasibility* — *выполнимость*), F_t и F_{en} , характеризующие, соответственно, возможность (вероятность) выполнения в полностью автономном режиме данным роботом данного задания на данном участке среды в данных условиях окружающей среды, а также временные и энергетические затраты на осуществление этой работы.

Таким образом, эти меры являются сугубо локальными и не могут решить все вопросы, связанные с описанием автономности роботов. Однако они позволяют оценить применимость того или иного типа робота для автономного выполнения задания и сравнить предпочтительности применения той или иной модели роботов для выполнения задания.

Для определения величин F^* , F_t и F_{en} автор предлагает использовать следующую методику (рис. 5).

Решение о возможности автономного выполнения задания принимается на основе анализа совокупности информации трех типов:

- информация о состоянии участка окружающей среды, в котором роботу предстоит функционировать;
- информация о роботе, планируемом для выполнения задания;

- информация о задании, которое должно быть выполнено.

Информация об участке среды. В блоке присутствует информация об участке окружающей среды, в котором роботу предстоит автономно выполнять поставленную задачу. Причем эта информация может быть троякого характера: статического, динамического и вероятностного.

Информация о роботе. Этот блок служит для предоставления наиболее полной информации о состоянии робота. Важно отметить, что эта информация будет отражать не только непосредственное взаимодействие робота со средой, но и внутреннее состояние робота. По аналогии с информацией о среде, информация о роботе также может быть трех видов.

Информация о задании. Блок служит для описания выполняемого задания в виде совокупности задач, причем эти задачи могут быть предписаны как для последовательного, так и параллельного и последовательно-параллельного выполнения.

Диспетчер выполнения задания мобильного робота. Фактически этот блок является генератором траектории движения мобильного робота. Планирование траектории мобильных роботов подробно рассматривается в [7]. Однако в основном эти работы продолжают иметь чисто научный оттенок, т. е. не имеют практического внедрения в промышленности. Как показывают проведенные исследования, применение мобильных роботов на практике, как правило, не обеспечено инструментом для планирования траектории движения мобильного робота.

В настоящее время разработан ряд алгоритмов планирования траекторий. Наиболее известными из них являются: алгоритм Дейкстры, алгоритм BFS (*Best-First-Search* — первый найденный), алгоритм A^* , алгоритм D^* .

Среди приведенных алгоритмов A^* обладает преимуществом, поскольку позволяет использовать элементы оптимизации (например, поиск кратчайшего пути) и обладает достаточным быстродействием [8].

Блок оценки выполнимости задач. Данный

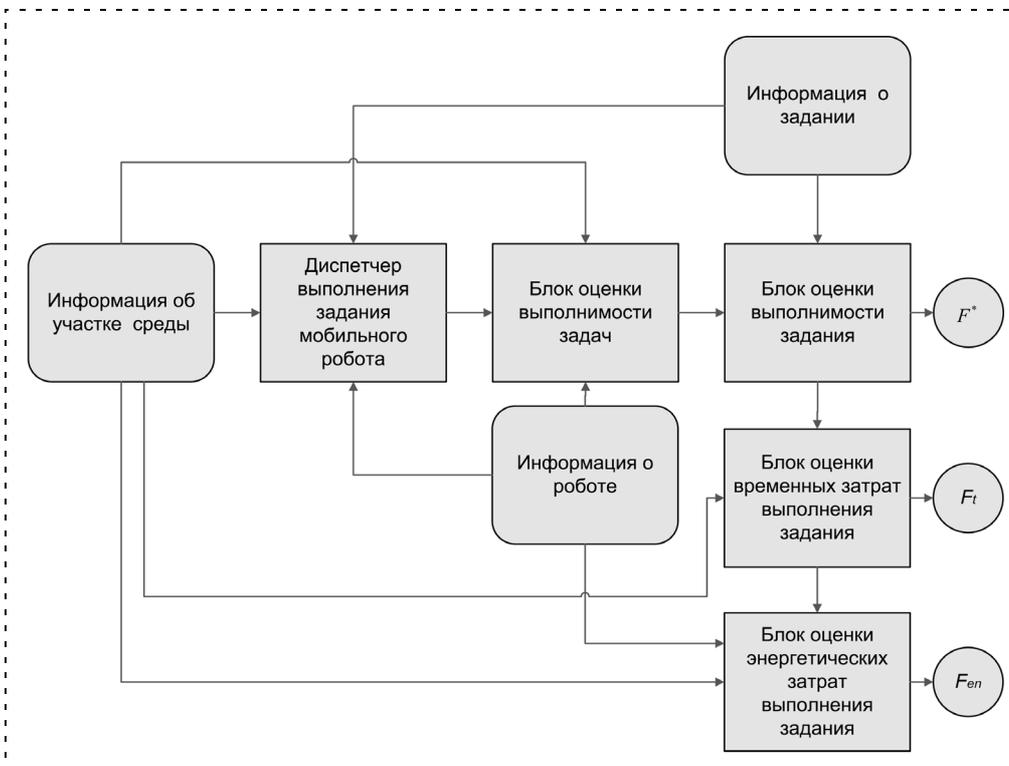


Рис. 5. Методика определения локальных мер автономности F^* , F_t и F_{en}

блок служит для оценки вероятности выполнения задач мобильным роботом. Каждый участок выбранной траектории уже имеет описание его свойств (т. е. свойств среды, ему присущих). Исходя из этих свойств, а также информации о характеристиках самого робота на каждом этапе траектории делается оценка вероятности выполнения задач, предписанных этому участку (например, взятия проб грунта, измерения температуры почвы и подобное).

Блок оценки выполнимости задания. Блок оценки временных затрат выполнения задания. Блок оценки энергетических затрат выполнения задания. Данный этап является одним из заключительных в оценке мер автономности робота. В нем оценивается вероятность выполнения заданий в соответствии с приоритетами их выполнения, затраты на их выполнение и доступность ресурсов. Формируется итоговое значение мер F^* , F_t и F_{en} .

Средства повышения автономности мобильных роботов

Теперь необходимо обратиться к вопросу повышения автономности мобильных роботов. Для этого стоит обратить внимание на функциональную структуру роботов и типичные ее компоненты.

В общем виде в робототехнике можно различать следующие функции робота: энергетическую, транспортную, технологическую, информационную, коммуникационную и интеллектуальную (рис. 6).

К *энергетической* функции относят действия, связанные с хранением, преобразованием и переда-

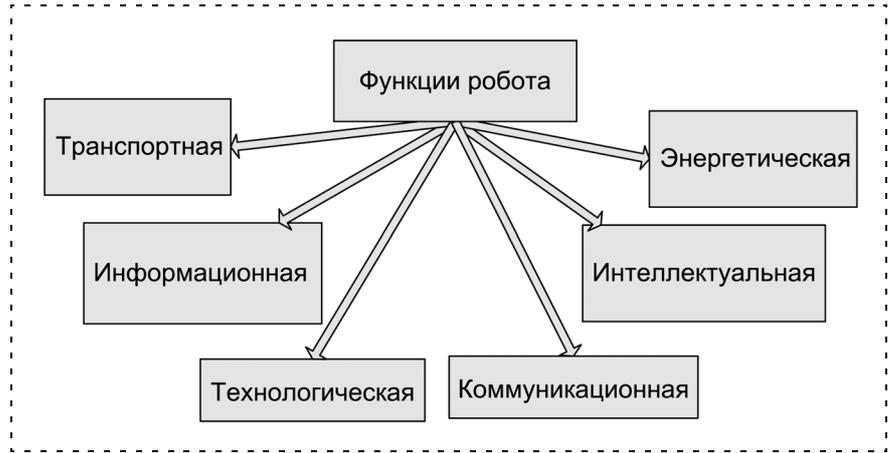


Рис. 6. Функции, осуществляемые роботами

чей энергии. *Транспортная* функция связана с осуществлением механических перемещений. *Технологическая* функция охватывает действия, связанные с изменением структуры и свойств частей среды и робота. *Информационная* функция отвечает за получение необходимой информации. *Коммуникационная* функция обеспечивает информационный обмен. *Интеллектуальная* функция служит для обеспечения решения задач управления.

С помощью этих функций можно классифицировать и различные компоненты мобильных роботов. При этом часть этих функций будет служить для самообеспечения функционирования робота (внутреннее взаимодействие), а часть — для обеспечения взаимодействия робота со средой (внешнее взаимодействие). Основные различия в структуре роботов различных типов (технологические роботы, инспекционные и пр.) будут заключаться преимущественно в соотношении развитости и доминирования различных функций (а значит и компонентов) внешнего взаимодействия.

Совершенствование функций мобильных и технологических роботов как способ повышения их автономности

Совершенствуемая функция робота	Повышаемая автономность (по средствам)	Повышаемая автономность (по виду)
Внешняя транспортная	Технического обеспечения	В пространстве
Внутренняя транспортная	Интеллектуальная, обслуживания и ремонта	Во времени, недетерминированности среды
Внутренняя информационная	Интеллектуальная, обслуживания и ремонта	Во времени
Внешняя информационная	Интеллектуальная	Недетерминированности среды
Внутренняя интеллектуальная	Интеллектуальная	Изменяющихся задач
Внутренняя энергетическая	Энергетическая	В пространстве, во времени
Внешняя технологическая	Технического обеспечения	Недетерминированности среды, изменяющихся задач

Можно отметить, что различные виды обеспечения автономности могут реализовываться путем совершенствования различных функций мобильных и технологических роботов и вести к повышению различных видов автономности (см. таблицу).

Таблица отражает лишь доминирующие тенденции, поскольку совершенствование отдельных функций может приводить к изменениям (как позитивным, так и негативным) практически во всех видах автономности.

Меры, повышающие уровень автономности мобильных роботов

Для повышения уровня автономности мобильных роботов предлагаются следующие первоочередные мероприятия с указанием типа совершенствуемой функции:

- применение энергосберегающих компонентов в составе робота (внешние и внутренние компоненты всех видов);
- применение источников энергии повышенной емкости (высокоемких аккумуляторных батарей) для увеличения внутреннего энергетического компонента;
- повышение эффективности источников энергии для увеличения внутреннего энергетического компонента;
- применение высокоэффективных движителей для повышения проходимости робота (внешний транспортный компонент);
- применение энергосберегающих движителей в составе робота (внешний транспортный компонент);
- применение интеллектуальных алгоритмов управления для оптимизации энергозатрат транспортными и технологическими модулями (внутренний интеллектуальный компонент);
- установка дополнительных датчиков для повышения обеспеченности информацией о среде и роботе (внешний и внутренний информационный компонент);
- минимизация числа применяемых датчиков для уменьшения энергопотребления робота при сохранении достаточного уровня обеспеченности информацией о среде и роботе за счет использования интеллектуальных методов обработки данных (внутренний интеллектуальный компонент);
- применение интеллектуальных методов обработки данных для повышения информационной обеспеченности робота (внутренний интеллектуальный компонент);

- применение методов интеллектуального планирования траектории для оптимизации использования ресурсов робота (внутренний интеллектуальный компонент).

Очевидно, что в реальности этот список может быть значительно расширен. Здесь приведены действия, требующие первоочередного осуществления.

В настоящее время отдельные из совершенствуемых функций развиты уже достаточно хорошо. Как правило, это обусловлено исторически более ранним развитием технологий, применяемых для их реализации.

Другие же компоненты только начали активно развиваться. Это, в частности, относится к интеллектуальному способу повышения автономности. Для его реализации потребовалось революционное развитие информационных технологий, которое сейчас и наблюдается. Поэтому в ближайшее время именно этот способ повышения автономности и будет играть доминирующую роль в робототехнике.

Список литературы

1. **Интеллектуальные** системы автоматического управления / Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Физматлит, 2001.
2. **Antsaklis P. J., Passino K. M. and Wang S. J.** Towards Intelligent Autonomous control Systems; Architecture and Fundamental Issues // Journal of Intelligent and Robotic Systems. Vol. 1. N 4. P. 315—342.
3. **Lampe Alexandre and Chatila Raja.** Performance Measure For the Evaluation of Mobile Robot Autonomy // Proc. Of IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 15—19. Orlando, Florida, USA 2006.
4. **Bielli Maurizio, Mecoli Mariagrazia, Villa Agostino.** Autonomy Versus Efficiency In Management Of Large-Scale Logistics Networks // Proc. Of 16 World IFAC Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
5. **Weichhart G., Fessl K.** Organisational Network Models And The Implications For Decision Support Systems // Proc. Of 16 World IFAC Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
6. **Goodrich M. A., Olsen D. R., Crandall J. W. and Palmer T. J.** Experiments in adjustable autonomy // In: Workshop on Autonomy Delegation and Control. IJCAI. Seattle WA. 2001.
7. **Chanthery Elodie, Barbier Magali, Farges Jean-Loup.** Planning Algorithms For Autonomous Aerial Vehicle // Proc. Of 16 World IFAC Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
8. **Patel A. J.** <http://theory.stanford.edu/~amitp/GameProgramming/index.html>.
9. **Hui-Min H., Pavcek K., Albus J. and Messina E.** Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: An Update // Proceedings of the 2005 SPIE Defense and Security Symposium, Orlando, Florida. March 2005.
10. **Parasuraman R., Sheridan T. B., and Wickens C. D.** A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 2000. Part A. Vol. 30. P. 286—297.

УДК 62-50

Ж. Ш. Шаршеналиев, д-р техн. наук,
Институт автоматики Национальной
академии наук Кыргызской Республики, Бишкек,
В. Д. Даровских, канд. техн. наук,
КГТУ им. И. Раззакова, Бишкек

Эмергентность многосвязной гибкой производственной системы

Обсуждается проблема эмергентности мехатронной гибкой производственной системы нового поколения. Приводятся качественные и количественные оценки эмергентности системы и рассматривается их влияние на интенсификацию производства.

Новый уровень современных гибких производственных систем (ГПС) определен в исследованиях И. М. Макарова, Е. И. Юревича, А. С. Ющенко, Ю. В. Подураева и др. и невозможен без использования принципов мехатроники [1].

Важно отметить противоречие между техническим совершенством создаваемых систем и крайне низким уровнем их эксплуатации. Объективно существующее снижение уровня автоматизации управления, связанное с развитием интеграционных процессов в системе, сдерживает наметившиеся прогрессивные тенденции в сокращении "живого" труда и себестоимости продукта, нарастании фактической производительности и децентрализации управления через его самоорганизацию.

Дальнейшее повышение эффективности гибкой автоматизации связано с использованием новых образцов техники, проектируемых на основе организационно-экономических, технических и технологических критериев.

Ключевым моментом здесь является выявление так называемой системной эмергентности, т. е. степени несоответствия свойств системы свойствам входящих в нее элементарных модулей. Поскольку эмергентность является внезапно возникающим свойством системы, то она в известной мере помогает усилить ее адаптационные свойства и существенно снизить инерционность процессов. Создание и применение техники, обладающей системной эмергентностью, особенно актуально для мехатроники и робототехники, где уровни интеграции управления, информации и технологии велики, а учет организационных факторов обязателен [2].

Методическую процедуру оценки эмергентности рассмотрим на примере модуля нового поколения [3], который важен в реализации интенсивных технологий машино- и приборостроения, фармаколо-

гии и медицины, авиационного, железнодорожного и автомобильного транспорта, а также военной техники. Подобная универсализация достижима, если данный модуль имеет многосвязную структуру, допускающую его эволюцию от простого модуля движения к мехатронному и далее интеллектуальному мехатронному модулям движения.

Современная ГПС, которая является элементом мехатронной автоматизации, состоит [4] из объединенных в многосвязную структуру рабочих позиций. Так, например, в компоновочной схеме, представленной на рис. 1, ГПС имеется 24 рабочие позиции, оснащенные гибкими производственными модулями (ГПМ) [5], и семь роботов ($P_i, i = 1, 7$), каждый из которых обслуживает по шесть рабочих позиций. У плоского варианта многосвязной ГПС принципиальным является наличие структурных взаимосвязей каждого ГПМ с каждым из имеющихся посредством введенных роботов. Шестиэлементный базис ГПС является естественной организацией, внутри которой искусственно образован седьмой модуль, требующий дополнительной установки центрального робота для обеспечения работоспособности системы в целом.

Указанная особенность рассматриваемой ГПС является источником активного проявления объективно нарастающей эмергентности как системной закономерности. Из потенциально имеющихся в шести модулях ГПС 36 рабочих позиций в комплексное решение организованы лишь 24. Это обусловлено тем, что двенадцать рабочих позиций принадлежат двум модулям одновременно. Рассмотрен элементарный случай эффективности макропроектирования, приводящий к прогрессивному решению.

В пространственной ГПС с многосвязной структурой содержится в общем случае 36 автономных модулей. Последние могут располагаться на шести,

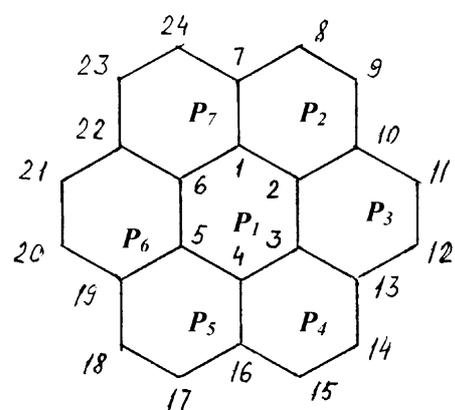


Рис. 1. Схема расположения рабочих позиций с ГПМ (пронумерованы) в плоской многосвязной ГПС: P_1, \dots, P_7 — робот

Таблица 1

Модули, уровни их расположения и рабочие позиции

Максимально возможное число рабочих позиций	Число модулей на структурном уровне	Число структурных уровней	Максимально возможное число рабочих позиций в системе
q	n	U	N
6	1	6	36
	2	3	
	3	2	
	4	1,5	32
	5	1,2	28
	6	1	24

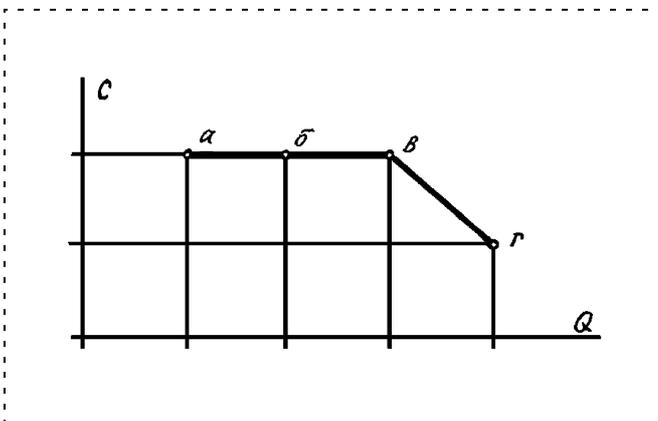


Рис. 2. Соотношения между стоимостью (С) средств производства и цикловой производительностью (Q) ГПС, имеющей шесть (а), три (б), два (в) и один (г) уровень расположения модулей

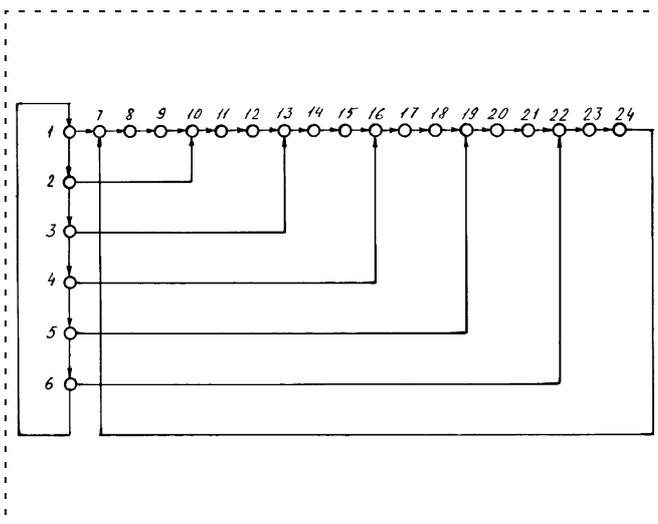


Рис. 3. Функциональная схема плоской многосвязной ГПС: 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 23, 24 — автономные рабочие позиции

трех, двух или одном уровне соответственно. В табл. 1 показаны расчетные соотношения числа рабочих позиций ГПС, по которым видно, что сокращение структурных уровней с шести до одного также приводит к уменьшению на треть числа рабочих позиций. У систем с четырьмя и пятью модулями нет структурного замыкания, поэтому они не рассматриваются.

Очевиден и рост цикловой производительности системы при сокращении числа уровней из-за экономии временных затрат на транспортировку объектов между рабочими позициями. У шестилурьевого исполнения системы имеет место максимальный осевой габаритный размер, занимающий пять межуровневых шагов (5l). Эти расстояния в разных наборах сочетаний технологических переходов робота между уровнями относятся к его холостым ходам. Последнее принципиально снижает цикловую производительность системы. Далее при трех- и двухуровневой организации ГПС ее осевые габаритные размеры снижаются лишь до 2l и l соответственно. У одноуровневой системы осевых перемещений робота в модуле уже не требуется (l = 0). Диаметральный габаритный размер всех вариантов является при этом единым.

Если шесть модулей располагаются на единой плоскости, то при дальнейшем росте цикловой производительности при сокращении пути перемещения объектов наблюдается дополнительное сокращение на треть издержек на оборудование и управление. Возникает эффект технической производительности: непрерывный рост производительности не ведет к нарастанию средств производства, который отражен на рис. 2. Иными словами, вновь возникает нарастание несоответствия между свойствами системы и ее составными компонентами. Для развития функционального разнообразия типового элемента требуются капитальные вложения, а у многосвязной системы, наоборот, происходит снижение этих вложений.

Преобразование системы в функциональный вид (рис. 3) вскрывает технологические маршруты, показывает принципиальную возможность достижения требуемой в конкретный мгновенный момент времени технологии. В функциональном отношении у системы в целом нет ограничений ни в выборе рабочей позиции, ни в направлениях рабочих или холостых перемещений, поскольку пятнадцать возможных в каждом модуле технологических маршрутов развиваются в ГПС семикратно. Это и есть конкретная технологическая характеристика эмергентности и прогрессивности.

Позиции, принадлежащие одновременно двум модулям, отличаются в функциональной схеме от автономных наличием у каждой из них трех связей.

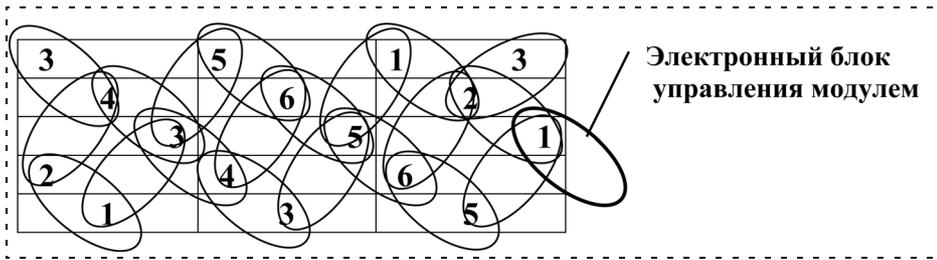


Рис. 5. Развитие логики управления для многосвязной ГПС

Управление рабочими позициями, имеющими лишь две связи, создает у логической схемы резерв функций, которые необходимы для нестандартных технологических команд различного вида, не входящих в рабочие циклы оборудования или системы. Логическая схема (рис. 4, в) унифицирована с серийно выпускаемыми вариантами.

При схмотехническом развитии управления возникает эффект повторения структурного функционального аналога (рис. 5). Теоретические положения, на которых основаны функциональная и кинематическая разработки ГПС с многосвязной структурой, оказываются применимыми для их управления и особенно автоматизации управления, что усиливает методологическую значимость выполненных проектов.

Характерной спецификой целевого функционирования робота P_i в организованной совокупности модулей является дизъюнкция как операция логического выбора. Это свойство снимает значительную долю централизации, что, однако, при детерминированности цели гарантирует ее достижение рациио-

нальным образом. Многосвязная ГПС приобретает важнейшее свойство целевой технологической специализации: объект ищет свободную позицию, а не последняя ждет загрузки. Рассмотрим действия роботов в системе (см. рис. 1), характеристика которых дана в табл. 2. Информация отражает способности роботов и к выбору позиции, и к синхронизации действий, причем отображена лишь часть системы, которая включает в себя два смежных модуля. Выбор модулей произволен и не изменяет поведения роботов. Индексом "о" обозначено осевое перемещение, а индексом "п" — поперечное. Знаки +, -, ± обозначают, соответственно, вращение робота по часовой стрелке, в противоположном направлении, в произвольном направлении. Дискретность действий роботов кратная, и это создает однозначность синхронизации управления.

Если на рабочую позицию приходят объекты и эти события распределены случайно, то законы распределения времени попадания объекта на позицию являются функциями как самого времени, так и интенсивности поступления объектов. Математическое ожидание данного распределения показывает влияние интенсивности поступления объектов на уровень вероятности попадания объекта на рабочую позицию.

Система в начальный момент времени $t = 0$ имеет N незагруженных рабочих позиций. Вероятность

Таблица 2

Виды, число и направления целевых движений робота P_i в многосвязной ГПС при переводе объекта из позиции в позицию в структуре

Конечная рабочая позиция	1							Число шагов P_i
	7	8	9	10	22	23	24	
Исходная рабочая позиция								1
Вращение робота осевое по или против часовой стрелки	P_{20-} P_{70+}							
Вращение робота поперечное без ограничения направления			$P_{2п±}$			$P_{7п±}$		2
Вращение робота осевое в соответствующем направлении		P_{20-}		P_{20+}	P_{70-}		P_{70+}	
Вращение роботов осевое и последовательное на один шаг				P_{20+} P_{10-}	P_{10+} P_{20-}			
Вращение роботов осевое или осевое и поперечное последовательное на один шаг		P_{20-} $P_{2п±}$ P_{10-}					P_{70+} $P_{7п±}$ P_{10+}	
Вращение робота осевое без ограничения направления			$P_{20±}$			$P_{70±}$		3

прихода объекта на любую из них в интервал времени $(t, t + \Delta t)$ равна $\alpha N(t)\Delta t + 0(\Delta t)$, где $\alpha > 0$ — постоянное число, а $N(t)$ — число рабочих позиций, не загруженных до момента t . Здесь имеет место дискретное изменение состояний системы, характеризуемое разрывами, когда вероятность более чем одного изменения $N(t)$ за интервал времени Δt есть $0(\Delta t)$, а вероятность изменения состояния есть $p(t, x)\Delta t + 0(\Delta t)$, где $p(t, x)$ — вероятность прихода величины x в новое состояние за время t . Если рассматривать процесс без последствия, то функция распределения дальнейших после скачка изменений $N(t)$ уже не зависит от того, какое значение имела величина $N(t)$ в момент, предшествующий скачку. Теперь очевидной становится вероятность того, что за время от t до τ произойдет включение n рабочих позиций в действие $[n = 0, 1, 2, 3, \dots, N(t)]$. Образован типовой разрывной случайный процесс.

Изначально зададим вероятность загрузки x рабочих позиций за время t :

$$P(t, x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq 0 \text{ и } x \geq N; \\ \alpha(N-x), & \text{при } 0 \leq x < N; \end{cases}$$

$$P(t, x, y) = \begin{cases} 0, & \text{при } y \leq x; \\ 1, & \text{при } y > x, \end{cases}$$

где $P(t, x, y)$ — условная функция распределения $n(t)$ в предположении, что в момент t происходит скачок, и непосредственно до скачка $n(t)$ была равна x , т. е. $n(t-0) = x$.

Отсюда появляется возможность найти величину α . Так как $p(x, t)$ в пределе есть 1, то $\alpha(N-x) \leq 1$. Тогда при известных значениях N и x очевидна величина α . Например, при $N = 6$ и $x = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ имеем $\alpha = 0,17; 0,20; 0,25; 0,33; 0,50, 1,00$. Полученная информация графически представлена на рис. 6. Отсюда видно, что до значения 0,25 величина α определяется все возрастающим диапазоном изменения x . Таким образом, вероятность запуска рабочей позиции в действие мало зависит от общего числа этих позиций и естественно, что эмергентность такого состояния невелика.

По вероятности $p(t, x, \tau)$ и функции распределения $P(t, x, y)$ осуществим выход на любую вероятность $p_n(t, x, y)$ через способ n -кратного изменения состояния, которое происходит следующим образом:

- до момента s ($t < s < \tau$) система не меняет состояния, и вероятность этого события равна $p_n(t, x, y)$;
- в промежутке $(s, s + \Delta s)$ система меняет состояние, и вероятность этого события равна $p_1(s, x, s + \Delta s) = p(s, x, s + \Delta s) + 0(\Delta s)$;
- вероятность того, что новое состояние, в котором окажется система, будет заключаться между y и $(y + \Delta y)$, равна $p(s, x, y + \Delta y) - p(s, x, y) = \Delta y p(s, x, y)$;
- за время $(s + \Delta s, \tau)$ система изменит свое состояние $(n-1)$ раз, и вероятность этого события равна $p_{n-1}(s + \Delta s, y, \tau)$.

Значения s и y могут быть произвольными в диапазонах $t < s < \tau$ и $-\infty < y < \infty$.

Оценим прежде всего вероятность $p(t, x, \tau)$ того, что, переходя из состояния x , в момент t система n раз изменит свое состояние до момента τ . Вычисления начинаются со случая $n = 0; t = 0$ и по определению разрывного процесса

$$p_0(0, 0, \tau) = e^{-\int_0^\tau p(t, 0) dt} = e^{-\alpha \tau}$$

Точно так же $p_0(t, k, \tau) = e^{-\alpha(N-k)(\tau-t)}$ и далее

$$\begin{aligned} p_1(0, 0, \tau) &= \int_0^\tau p_0(0, 0, s) p(s, 0) p_0(s, 1, \tau) ds = \\ &= \int_0^\tau e^{\alpha N s} \alpha N e^{-\alpha(N-1)(\tau-s)} ds = \\ &= N e^{-\alpha N \tau} \int_0^\tau \alpha e^{-\alpha(N-1)s} ds = \\ &= N e^{-\alpha N \tau} [e^{\alpha \tau} - 1]. \end{aligned}$$

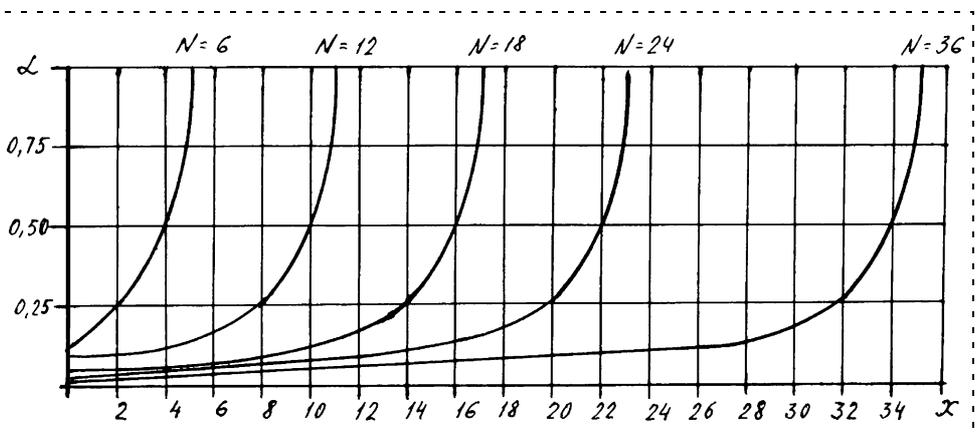


Рис. 6. График функций $\alpha(x, N)$

Выполнение последовательных вычислений $p_2(0, 0, \tau)$, $p_3(0, 0, \tau)$ и т. д. приводит к следующему результату:

$$p_n(0, 0, \tau) = C_N^n e^{-\alpha N \tau} [e^{\alpha \tau} - 1]^n.$$

Очевидно, что при $0 \leq n \leq (N - k)$ имеет место следующее равенство:

$$p_n(t, k, n) = C_{N-k}^n e^{-\alpha(N-k)(\tau-t)} [e^{\alpha(\tau-t)} - 1]^n,$$

где $C_N^n = \frac{N!}{n!(N-n)!}$.

Теперь возможен переход к вероятности $p_n(t, \tau)$ осуществления запуска n рабочих позиций системы:

$$\begin{aligned} p_n(t, \tau) &= \sum_{k=0}^{N-n} p_k(0, 0, t) p_n(t, k, \tau) = \\ &= \sum_{k=0}^{N-n} C_N^k e^{-\alpha N t} [e^{\alpha t} - 1]^k C_{N-k}^n e^{-\alpha(N-k)(\tau-t)} \times \\ &\times [e^{\alpha(\tau-t)} - 1]^n = e^{-\alpha N \tau} [e^{\alpha(\tau-t)} - 1]^n \times \\ &\times \sum_{k=0}^{N-n} C_N^k C_{N-k}^n e^{\alpha k(\tau-t)} [e^{\alpha t} - 1]^k. \end{aligned}$$

Так как $C_N^k C_{N-k}^n = C_N^n C_{N-n}^k$ и $\sum_{k=0}^{N-n} C_{N-n}^k \times [e^{\alpha(\tau-t)}(e^{\alpha t} - 1)]^k = [1 + e^{\alpha t} - e^{\alpha(\tau-t)}]^{N-n}$, то окончательно

$$p_n(t, \tau) = C_N^n [e^{-\alpha t} - e^{-\alpha \tau}]^n [e^{-\alpha \tau} + 1 - e^{-\alpha t}]^{N-n}.$$

Приложим к результату исходные данные, сведенные в табл. 3, а на рис. 7 подведем итоги расчета.

В качестве диапазона ожидания прихода объектов на рабочую позицию приняты два значения: 2 с и 4 с (кривые с данными значениями диапазона на рис. 7 обозначены цифрами без штриха и со штрихом). Становится очевидным, что чем больше времени проходит от пуска системы, тем меньше вероятность включения в работу одной, двух, трех, четырех и, наконец, пяти рабочих позиций в шести-элементном исполнении системы для любого значе-

Таблица 3

Параметры, необходимые для расчета функции $p_n(t, \tau)$

Параметр	N	n	α	t	τ
Размерность		—			с
Значение	6	1...5	0,3	2...10	4...12 (6...14)

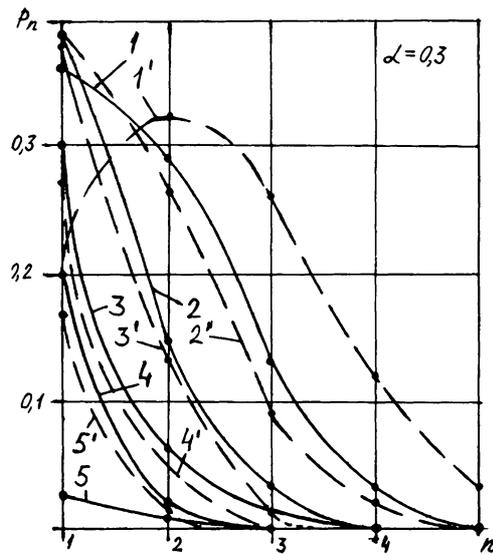


Рис. 7. Вероятность запуска в действие рабочих позиций: 1, $t - t = 2, \tau = 4,6$; 2, $2' - t = 4, \tau = 6,8$; 3, $3' - t = 6, \tau = 8,10$; 4, $4' - t = 8, \tau = 10,12$; 5, $5' - t = 10, \tau = 12,14$

ния α ($\alpha = 0,3; 0,6; 0,9$). Вследствие этого свойства возникает условие непрерывной подпитки рабочей позиции атрибутами функциональной активности. Для этого включаются в действие и специфика управления, и организационные факторы. Вновь достигаются условия необходимости глобальной универсализации технических решений технологий, конструкций и управления. Вместе с тем, увеличение временного диапазона, отводимого на загрузку системы объектами (в нашем случае с 2 до 4 с), гарантирует нарастание этой вероятности.

Задачи ГПС в системных технологии и организации следующие: гарантировать способность достижения единственным объектом свободной рабочей позиции по регламенту, но возможно несколькими вариантами и в каждый конкретный момент времени; то же, но несколькими объектами. Эти задачи решаются только при наличии эмергентных свойств и с применением мехатронного комплекса, действующего по схеме, приведенной на рис. 8.

Обеспечить рабочие позиции ГПС объектами, предназначенными для технологического преобразования, достичь условия непрерывности их прохождения через все стадии, когда фактическая производительность системы не снижается ниже цикловой, можно при наличии в системе управления мониторинга параметров, поведения и эволюции, выполнением чего и занимается мехатронный компонент ГПС.

При участии мехатронного компонента ГПС достигается новое качество организации, присущее сис-

теме, которое задает непрерывный поток объектов в условиях дискретно действующих технологических процессов. Здесь объект способен искать рабочую позицию, готовую решить необходимую этому объекту технологическую задачу. В системе нового вида не оснастка, управление и оборудование ищут объект, а наоборот. Этот эффект стал возможен при задании производству и его компонентам многосвязной структуры, когда в плоском исполнении производства каждый его компонент взаимосвязан с каждым иным из введенных в систему. Складская система исключается, упрощается процедура удаления отходов, контроль не просто упрощается, а и ужесточается, и ведется в параллельных с транспортными операциями ситуациями. Основное технологическое оборудование нового поколения систем гарантирует обслуживание от одного до трех потоков одновременно, причем в последнем крайнем случае эксплуатация ГПМ предпочтительней. Система инструментального обеспечения становится тождественной системе питания, что повышает уровень унификации конструкции, ускоряет процесс внедрения и снижает трудоемкость эксплуатации. Транспортная функция передается роботам, выполняющим вспомогательные операции, что повышает уровень их использования. Каждый модуль имеет возможность принципиального обновления технологий, что характеризует прогрессивность исполнения системы.

Система управления ГПС способна:

- задавать эволюционные процессы и идентифицировать запрос об объекте, оснастке, ГПМ и управляющей программе (УП) и давать отклик (+ или -);
- адресовать объект и УП к заданной и свободной рабочим позициям ГПС по сети;
- принимать УП от любой рабочей позиции по сети;
- запрашивать необходимые данные из библиотеки более высокого уровня и возвращать их обратно для корректировки;
- контролировать перемещение информации по всей сети.

Кроме того, система управления ГПС имеет активно организуемую память программ. Необходимое системное свойство генерируется управлением в многосвязной эмергентной ГПС в каждый требуемый момент времени и заранее не определено [6]. Устройство ввода заготовок является многопозиционной системой, способно менять параметры

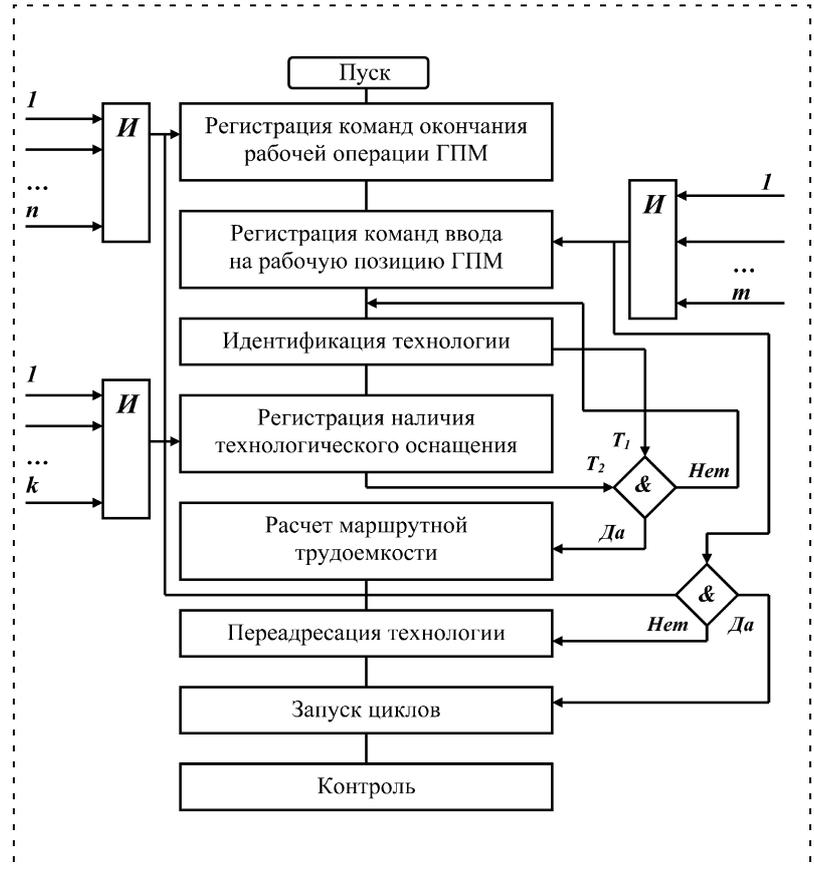


Рис. 8. Функциональная схема мехатронного влияния на ГПС:

И — интерфейсы датчиков рабочих операций ОТО (n), устройств ввода заготовок (m), систем управления рабочими позициями (k); n , m , k — число датчиков; & — логическая операция конъюнкция; T_1 , T_2 — технологии имеющаяся и требуемая

и режимы, имеет способность к мобильности внутри ГПС. Основное технологическое оборудование (ГПМ) — многооперационное, имеет мобильную пространственную рабочую зону, способную принимать объекты, движущиеся по пяти направлениям.

Список литературы

1. Юревич Е. И., Игнатова Е. И. Основные принципы мехатроники // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 3. С. 10–12.
2. Darovskih V. D. New generation of multi connected systems of flexible automation and the ways of strategic control of them // Proc. of ESDA2006. 8th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis. July 4–7, 2006, Torino, Italy. 10 p.
3. Патент 908 (Кыргызская Республика). Даровских В. Д. Способ позиционирования рабочих позиций гибкой производственной системы // Б. и. № 11. 2006.
4. Патент 909 (Кыргызская Республика) Шаршеналиев Ж. Ш., Даровских В. Д. Гибкая производственная система // Б. и. № 11. 2006.
5. Патент 983 (Кыргызская Республика) Даровских В. Д. Гибкий производственный модуль // Б. и. № 92007.
6. Даровских В. Д. Оценка вероятностных возможностей производственных систем. Б.: Текник, 2007. 52 с.

УДК 681.5: 622.276.1

С. А. Баталов, канд. техн. наук, доц.,
Уфимская государственная академия
экономики и сервиса

Синтез системы управления нефтедобычей и контроля нефтенасыщенности пласта на ранней стадии его разработки

Предлагается метод определения интервалов нефтенасыщенностей продуктивных пластов на основе постоянного тестирования их реологических параметров в процессе ранней стадии разработки месторождения. Обсуждается структура построения линейной многосвязной системы управления нефтедобычей с применением операций тестового контроля, методика исследования систем в линейном режиме их функционирования и упрощения расчетов их параметров. Выполнение таких результатов является необходимым условием получения инвариантной системы нефтедобычи для перевода режимов работы пластов в позднюю стадию разработки.

Введение

В статье рассматривается метод синтеза системы управления процессом нефтеизвлечения (МСУ ПН) из продуктивных пластов нефтегазовых месторождений с водонапорным методом их эксплуатации [1, 2]. Попытки оптимизации нефтедобычи по упрощенным моделям МСУ в сетках действующих скважин не могут обеспечить положительных результатов вследствие неполного учета комплексов влияющих факторов [2, 3].

К настоящему времени процесс выработки нефтегазовой залежи выполняется в основном на ранней стадии разработки и завершается с получением низкой объемной концентрации нефтяной продукции (до 0,1...0,05 %). Переход на поздние стадии разработки месторождений, как правило, сводится только к совершенствованию капитального ремонта скважин и не приводит к увеличению нефтяной продукции.

Кратковременное увеличение нефтедобычи достигается за счет использования дополнительных методов воздействия на скважинные зоны перфорации (тепловых, акустических, электромагнитных), вскрывающих продуктивные пласты. Но такие методы не позволяют воздействовать на объемы всего пласта в его длительной эксплуатации. Повышение эффективности полной выработки нефтегазовых залежей в основе совершенных МСУ ПН остается

актуальной проблемой. Решение указанной проблемы всецело зависит от полноты и упорядоченности выполнения комплекса геолого-технических мероприятий на ранней стадии разработки месторождения как предыстории полной выработки продуктивных пластов.

Постановка задачи

Чтобы обеспечить синтез обобщенной структуры МСУ ПН на ранней стадии разработки месторождения, необходимо выявить особенности образования векторов входных и выходных ее координат, а также комплексы влияющих воздействий. Эти требования выполняются согласно модели линейной фильтрации пласта [4] в системе на примере работы двух водонагнетательных и двух нефтедобывающих скважин, имеющей вид

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= \frac{dg_{21}}{dt} Q_2 + \frac{dQ_2}{dt} g_{21} + \frac{P_1 dl_{z1}}{l_{z1} dt}; \\ \frac{dP_2}{dt} &= \frac{dg_{12}}{dt} Q_1 + \frac{dQ_1}{dt} g_{12} + \frac{P_2 dl_{z2}}{l_{z2} dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

где P_1 и P_2 — давления в призабойных зонах пласта первой и второй нагнетательных скважин; g_{12} и g_{21} — коэффициенты влияния первой нагнетательной скважины на вторую добывающую скважину, и наоборот; l_{z1} и l_{z2} — координаты местоположения зоны влияния скважин; Q_1 и Q_2 — дебиты скважинных жидкостей.

Система уравнений (1) является основой реализации МСУ ПН по модели в переменных состояния. При этом в качестве переменных состояния выбираются значения поддержки пластового давления P_i в направлении от соответствующих нагнетательных скважин.

Выходными координатами системы являются значения фронта продвижения фильтрующегося агента (воды с плотностью ρ_{pB}) в соотношении $\partial \rho_{pB} / \partial t = Q_i \partial \rho_{pB} / \partial z_i$. Пространственное распределение этого фронта обводненности можно представить через координаты межскважинных расстояний z_i , длины изолинии (пласта) l в виде функционала $\Phi(l) \approx \partial z_i / \partial t$. Поэтому используются косвенные измерения массовых дебитов нефти в глубинных зонах перфораций добывающих скважин. Входные координаты системы представляются массовыми дебитами жидкостей в нагнетательных скважинах.

Ранее было показано [5, 6], что для получения устойчивого функционирования МСУ ПН необхо-

димо обеспечить условия инвариантности ее структуры по отношению к комплексам влияющих воздействий, приведенных к ее входам и выходам, а также к промежуточному комплексу влияющих воздействий на переменные состояния (помехам). Комплекс помех в МСУ ПН обусловлен наличием различных длин низкопроницаемых продуктивных интервалов и высокопроницаемых непродуктивных интервалов в архаичном чередовании вдоль разрабатываемой изолинии l нефтяного пласта. Отметим, что высокопроницаемые интервалы изолинии пласта образуются по причинам вариации его распределенных реологических параметров (коэффициентов пористости), наличия линз и ловушек (зон неподвижных запасов), неоднородности залегающего пласта по разрабатываемым горизонтам.

Условия инвариантности МСУ ПН по отношению к влияющим воздействиям, приведенным к ее входам и выходам, достигаются в результате измерений достоверных комплексов гидродинамических параметров в скважинных интервалах перфораций [6, 7]. С одной стороны, такие измерения дают точные результаты определений массовых дебитов на различных глубинах в скважинных интервалах перфораций по модели [7, 8] вихревых потоков многофазных и многокомпонентных нефтяных смесей с учетом коэффициентов сжимаемости и теплового расширения многофазных сред, а также растворимости газа.

С другой стороны, в системе устанавливается повышение точности исследований дифференциальных и интегральных профилей приемистостей и притока в водонагнетательных и нефтедобывающих скважинах [9, 10]. Для измерений гидродинамических величин в нагнетательной скважине используется набор датчиков температуры, давления и расхода, а для добывающей скважины он может дополняться датчиками влажности нефти [11, 12] в составе каротажной станции [13].

Алгоритм управления системы

Выход на рабочий режим эксплуатации нефтегазовой залежи в первичной стадии разработки месторождения обусловлен особенностью учета статических и динамических свойств продуктивных пластов. Статические свойства пласта учитываются в первоначальной стадии его гидроразрыва и пробной эксплуатации [1, 2], обеспечивающих установку устойчивых гидравлических связей между нагнетательными и добывающими скважинами. На второй стадии вывода пласта в рабочий режим эксплуатации данные свойства позволяют найти первоначальное значение давления поддержки пласта $P_{\text{экс. min}}$, приближенное к минимальному пороговому значению, с которого начинается режим линейной фильтрации. Задание максимального порогового значения

$P_{\text{экс. max}}$ соответствует критическому состоянию пласта в условиях повышенной обводненности добываемой нефтяной продукции.

Необходимость учета динамических свойств продуктивных пластов диктуется требованием оптимизации управления процесса нефтеизвлечения при непрерывном отслеживании местоположения фронта обводненности пласта и корректировке значений $P_{\text{экс. i}}$ в дальнейшей его эксплуатации. Эти требования составляют основу разработки алгоритма управления системой нефтеизвлечения. Как известно, нелинейные свойства гидродинамических процессов, происходящих в интервалах перфораций нагнетательных скважин при больших изменениях дебитов воды, не позволяют непосредственно использовать линейные законы регулирования.

В то же время специфика задачи накладывает жесткие требования на качество управления в широком динамическом диапазоне: высокую точность задания дебитов; низкую нелинейную скорость фильтрации флюидов; минимальное время выхода в режим стабилизации при незначительном переуправлении. Для этого необходимо использовать составной алгоритм регулирования, учитывающий динамические и статические свойства объекта. В используемом алгоритме управления неточность определения параметров регулирования компенсируется отработкой ошибки по пропорционально-интегральному закону. В режиме эксплуатации пласта с постоянной скоростью продвижения фронта обводненности на первом этапе (демпфирующий период управления) в систему подаются фиксированные дебиты Q_0 , обеспечивающие постоянство скоростей фильтрации пласта. Длительность этапа равна нескольким постоянным времени системы. После этого включается управление по алгоритму

$$Q(t) = Q_0(t) + K_{\text{п}}[P_0(t) - P(t)] + K_{\text{и}} \int [P_0(t) - P(t)] dt, \quad (2)$$

где $Q_0(t)$ — заранее подобранная функция дебита после стадии запуска скважин; $P_0(t)$ — величина, задающая первоначальное значение давления поддержки пласта; $P(t)$ — текущие значения пластовых давлений; $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{и}}$ — коэффициенты пропорциональной и интегральной отработки соответственно.

Выбор предельных первоначальных значений давления поддержки пласта $P_0(t)$ определяется усредненными значениями реологических параметров площади пласта, вскрываемой сеткой действующих скважин.

Синтез структуры системы в режиме линейной фильтрации

В соответствии с приведенными требованиями реализации ранней стадии разработки месторождений была использована традиционная архитек-

тура СУ линейной фильтрации пласта. Описание такой системы выражается в следующей векторной форме:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + \Theta f; \\ y &= Cx + Du, \end{aligned} \quad (3)$$

где $x \in R^n$ — вектор состояний; $u \in R^m$ — вектор управляющих воздействий; $y \in R^p$ — вектор выходных переменных; A — матрица коэффициентов системы; B и C — матрицы входа и выхода; Θ — матрица коэффициентов возмущений f ; D — матрица обхода, равная нулю в начальной стадии разработки месторождения.

В линейном режиме работы пласта перемещения фронта обводненности в направлении от нагнетательных к добывающим скважинам сопровождаются обмывкой отработанных интервалов, а также постоянством роста давления поддержки пласта от нижнего значения $P_{\text{экс.мин}}$ к максимальному значению $P_{\text{экс.макс}}$. При этом продуктивные интервалы пласта представляют собой форму пористой структуры нефтенасыщенного фильтра, а изношенные — плоских каналов.

Предварительное определение координат непродуктивных интервалов осуществляется путем отслеживания времени прохождения трассирующих меток инородных формаций от нагнетательных к добывающим скважинам [14]. В качестве таких меток применяются очищенные жидкости (дистиллированная вода, радиоизотопы, хлорированные жидкости, феррожидкости, тепловые метки), а также многокомпонентные жидкости, имеющие различные физико-химические параметры по отношению к параметрам нефтяного флюида.

Таким образом, совмещение режимов эксплуатации и исследований продуктивного пласта должно выполняться в условиях $P_{\text{гидр}} > P_{\text{эк}} = P_{\text{ис}}$, где

$P_{\text{гидр}}$ — давление при первоначальном гидроразрыве пласта; $P_{\text{эк}}$ — давление поддержки пласта в процессе эксплуатации (или линейной фильтрации); $P_{\text{ис}}$ — давление в режиме исследования координат местоположения непродуктивных участков пластов. Для одновременного выполнения режимов эксплуатации и исследований изолиний пласта разработана структурная схема системы нефтеизвлечения (рис. 1).

Структурная схема данной системы в отличие от традиционных моделей системы в переменных состояния дополнительно включает блок логического управления (БЛУ), инвертор и компаратор выходной переменной $M(\alpha_i)$. Компаратор $M(\alpha_i)$ используется для запуска системы из режима пробной эксплуатации в совмещенный режим эксплуатации и исследований пластов. Вход компаратора подключен к выходу СУ, а его выход — к входу БЛУ.

БЛУ предназначен для выработки команд в целях запуска через схему сравнения сигналов настройки дебитов рабочего агента $g_{p.a.}$, причем управляющий вход схемы сравнения подключен к выходу БЛУ. Этот блок состоит из ждущего мультивибратора (ЖМ), делителя частоты (ДЧ) следования импульсов, первого (Э31) и второго (Э32) элементов задержки, инвертора и логического элемента 2И-НЕ. При этом выход ЖМ через ДЧ и Э32 подключен к входам Э31 и элементу 2И-НЕ.

Выход инвертора НЕ подключен к схеме 2И-НЕ. Выход БЛУ дополнительно подключен к входу инвертора НЕ, а выход последнего — к управляющему входу схемы сравнения сигналов дебитов трассирующих меток g_m . Выходы схем сравнений подключены через сумматор на вход блока коэффициентов суммарных дебитов.

На рис. 2 представлены временные диаграммы сигналов выходов блоков СУ с совмещенными режимами эксплуатации и исследований параметров продуктивных пластов.

Начало работы СУ связано с выполнением первоначального этапа гидроразрыва пласта при значении суммарного сигнала настройки $g_{\Sigma} \rightarrow \max$. В фиксированной длительности гидроразрыва ($\tau_{\text{гидр}}$) на выходе компаратора $M(\alpha_i)$ постоянно вырабатывается нулевой сигнал (рис. 2, а, з) и по завершению этого этапа последний перебрасывается в единичное состояние.

Второй этап работы системы связан с режимом ее пробной эксплуатации при выводе на минимальное статическое давление поддержки пласта $P_{\text{экс.мин}}$ с длительностью $\tau_{\text{пр.эк}}$. Третий этап

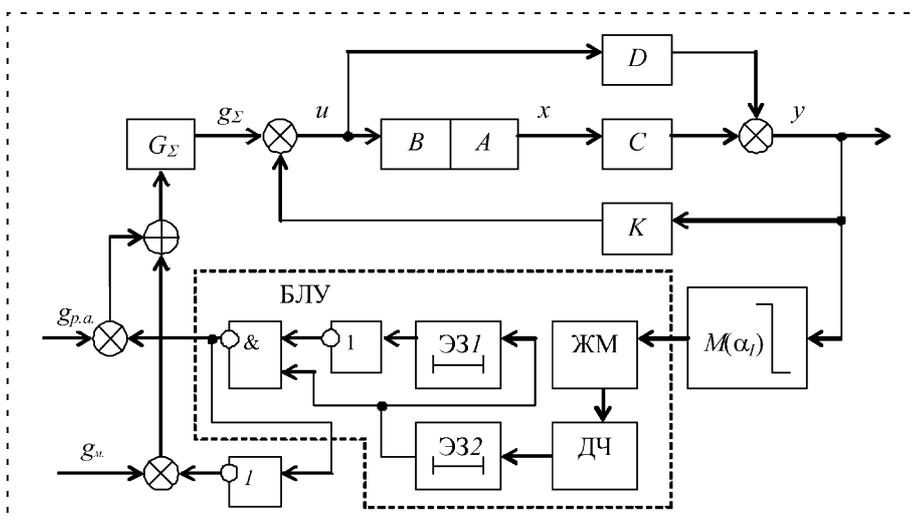


Рис. 1. Структурная схема СУ с режимами эксплуатации и исследований

работы системы связан с совмещением режимов исследований и эксплуатации пластов, когда блок $M(\alpha_j)$ запускает ЖМ и ДЧ (рис. 2, б, в) в БЛУ. Сигнал с выхода ДЧ проходит через Э32 с длительностью задержки $\tau_{пр.эк}$ на входы элемента 2И-НЕ в прямом состоянии (рис. 2, г), а также с задержкой времени на первый цикл исследований $\tau_{ис.1}$ (рис. 2, д) и в инвертированном состоянии (рис. 2, е). Это приводит к выработке нулевого сигнала элементом 2И-НЕ (рис. 2, з), а также единичного сигнала с инвертора (рис. 2, и).

Таким образом, нулевой сигнал с выхода БЛУ отключает сигнал подачи рабочего агента $g_{р.а}$ и включает сигнал подачи трассирующих меток g_m . Вследствие существующих кратковременных задержек исполнительных переключающих устройств в смесительном сепараторе (сумматоре) наблюдаются кратковременные импульсные перепады давлений (рис. 2, к) (обусловленные несовершенством используемых исполнительных механизмов), которые устраняются в зоне перфорации скважин из-за влияния дроссельных гидродинамических процессов.

После завершения импульсов переключения на исследования (с длительностью $\tau_{ис.1}$) выполняется переход в режим эксплуатации с длительностью ($\tau_{эк.1}$) действия импульсов и пауз первого периода их следования (рис. 2, в–и).

Аналогично первому подциклу совмещенных режимов работы системы реализуются ее последующие подциклы. Разница заключается в том, что завершающие жизненные подциклы функционирования СУ характеризуются повышенными значениями поддержки пластовых давлений, вплоть до выхода на верхнее расчетное значение $P_{экс.мах}$. Это означает завершение ранней стадии разработки месторождений, связанной с продвижением фронта обводненности пластов к зонам добывающих скважин.

Обсуждение полученных результатов

Для описания совмещенных циклов эксплуатации и исследования непродуктивных интервалов изолинии пласта можно использовать систему дифференциально-разностных уравнений:

$$\dot{x}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} A_j x(t - h_j) + \sum_{j=0}^{\infty} B_j u(t - h_j), \quad t > 0; \quad (4)$$

$$x(\tau) \equiv 0; \quad u(\tau) \equiv 0; \quad \tau \geq 0,$$

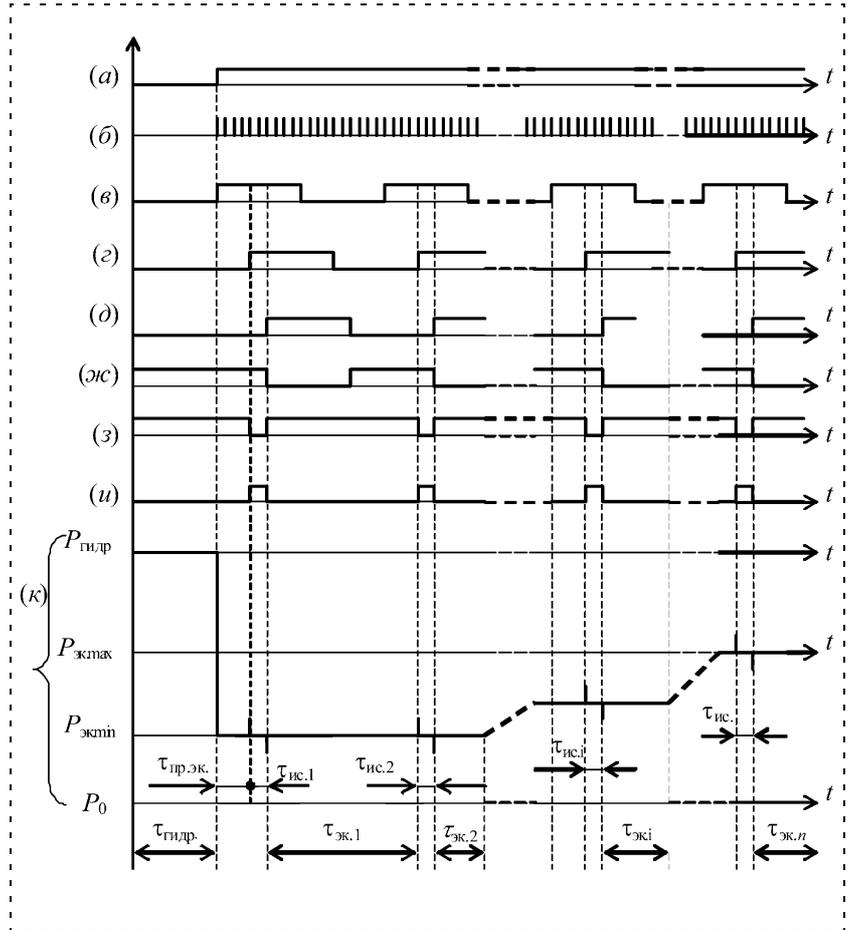


Рис. 2. Временные диаграммы сигналов СУ:
 а – компаратора выходной переменной $M(\alpha_j)$; б – ЖМ; в – ДЧ; г – Э32; д – Э31; е – инвертора БЛУ; з – элемента 2И-НЕ; и – инвертора; к – сигнала $g_{э}$

где $A_j \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_j \in \mathbb{R}^{n \times r}$; $\mathbb{R}^{d \times q}$ – пространство вещественных $(d \times q)$ -матриц; $0 = h_0 < \dots < h_1 < \dots$ – запаздывания; $u(t)$, $t > 0$ – кусочно-непрерывное управление.

Составные элементы выражения (4) определяются спецификой работы МСУ ПН. После впрыскивания в пласт и прохождения через него первой метки при давлении поддержки пласта во время эксплуатации $P_{ф.л} = P_{экс} = 30$ мПа измеряется время ее прохождения с пересчетом на скорость линейной фильтрации $v_{ф.л1}$ в направлении прямых и перекрестных каналов регулирования. Последовательное впрыскивание через одинаковые интервалы времени разнородных меток выполняется при условии, когда их объемные концентрации в зоне перфорации нагнетательной скважины снижаются до значений $\alpha_m < 0,1$.

Таким образом, каждый элемент тестируемой матрицы системы (4) будет состоять из двух коэффициентов, характеризующих линейный режим фильтрации пласта при его эксплуатации и исследовании. Например, для двух нагнетательных и добы-

вающих скважин получаются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{11} &= A_{11}^{\text{ЭК}}(t - 9h_i/10) + A_{11}^{\text{ИС}}(t - h_i/10); \\ \tilde{A}_{22} &= A_{22}^{\text{ЭК}}(t - 6h_i/10) + A_{11}^{\text{ИС}}(t - h_i/10). \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогичным образом рассчитываются другие коэффициенты в перекрестных каналах регулирования (A_{12} , A_{21} и т. д.).

Перемещение меток со скоростями $v_{\text{ф.л1}} + i$ в непропорциональные временные интервалы является критерием структурной неоднородности пласта, что позволяет судить о наличии непродуктивных выработанных участков, а также участков с трещиноватыми средами пласта.

При эксплуатации однопластовой залежи, вскрытой сетками действующих скважин, для исходного описания МСУ ПН на основании выражений (4) и (5) получается тестируемая псевдоматрица системы в следующем виде:

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} & 0 & 0 & 0 \dots 0 & 0 \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} & \tilde{A}_{23} & 0 & 0 \dots 0 & 0 \\ 0 & \tilde{A}_{32} & \tilde{A}_{33} & \tilde{A}_{34} & 0 \dots 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{A}_{43} & \tilde{A}_{44} & 0 \dots 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots \tilde{A}_{n-1} & \tilde{A}_{nn} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Нулевые значения данной квадратной матрицы означают отсутствие соответствующих межскважинных связей. Очевидно, что условия оптимального управления многосвязной системы будут реализовываться в блочном принципе управления. При этом каждый блок формируется из трех строк и трех столбцов относительно главной диагонали.

Заключение

Предложен метод синтеза МСУ ПН с одновременным выполнением режимов исследований распределенных параметров пластов и их эксплуатации на ранней стадии разработки месторождений. Показано, что для устойчивого функционирования МСУ ПН необходим постоянный контроль координат местоположения непродуктивных интервалов пластов и остаточной нефтенасыщенности, значения параметров которых используются для своевременного перевода эксплуатации месторождения на позднюю стадию разработки. Функционирование системы осуществляется на основе алгоритма про-

порционально-интегрального управления разработкой продуктивных пластов с учетом их статических и динамических свойств.

Применяемый подход к синтезу МСУ ПН на основе модели в переменных состояния позволяет оценить особенности межскважинных взаимодействий в их блочном принципе формирования. Полученные результаты являются основой их использования в синтезе инвариантных структур СУ нефтеизвлечения на поздней стадии разработки нефтегазовых месторождений.

Список литературы

1. **Crichlow Н. В.** Modern reservoir engineering — a simulation approach. Englewood Cliffs. N. J.: Prentice hall, 1977. 303 p.
2. **Мееров М. В.** Исследование и оптимизация многосвязных систем управления / Отв. ред. акад. А. А. Воронов. М.: Наука, 1986. 236 с.
3. **Усов С. В., Павельчак А. В.** Изоляция каналов перетока с низкой пропускной способностью для восстановления крепи скважин // Бурение. 1981. № 4. С. 40—43.
4. **Баталов С. А.** Синтез структуры системы управления фильтрацией с сосредоточенными параметрами. М., 2005. 14 с. Деп. в ВИНТИ 16.02.05, № 228-В2005.
5. **Баталов С. А., Коловертнов Ю. Д.** Принцип инвариантности многосвязных систем управления процессом нефтеизвлечения из продуктивных пластов // Приборы и устройства автоматики для нефтяной и газовой промышленности: Межвуз. сб. научн. трудов. Уфа: УНИ. 1989. С. 7—10.
6. **Баталов С. А.** К вопросу гидродинамики фильтрующихся сред // Проблемы и перспективы современных технологий сервиса. Уфа: УТИС. 1998. С. 166—176.
7. **Баталов С. А.** Метрологическая аттестация МВИ комплекса гидромеханических параметров при контроле разработки нефтегазовых месторождений // Метрология и метрологическое обеспечение измерений параметров объектов нефтепромысловой геофизики: Доклад на Всесоюзн. научно-практич. конф. Уфа: ВНИИ НПГ, 1985. С. 7.
8. **Баталов С. А., Коловертнов Ю. Д.** Математическое моделирование разнородных вихревых потоков нефтяных смесей. М., 1988. 5 с. Деп. в ВИНТИ 18.10.88, № 7487 — В88.
9. **Баталов С. А.** Способ исследования продуктивных интервалов нефтяных пластов. Авт. св. 1327614 СССР // Бюлл. "Изобретения". № 27. 1987.
10. **Баталов С. А., Шамкова В. Б.** Многоканальная телеметрическая аппаратура для промысловых исследований скважин. М.: ВНИИОЭНГ, 1988. 68 с.
11. **Баталов С. А., Коловертнов Ю. Д., Дунаев А. И., Лепин Ф. Е.** Комплексный скважинный прибор. Авт. св. 1452958 СССР // Бюлл. "Изобретения". № 3. 1989.
12. **Баталов С. А., Мартынов М. С.** Дистанционный прибор для измерений комплекса гидродинамических параметров // Каталог оборудования местных товаропроизводителей и научно, научно-технических разработок для субъектов малого предпринимательства. Уфа: УТИС, 2000. С. 28.
13. **Баталов С. А., Коловертнов Ю. Д., Дунаев А. И.** и др. Каротажная станция. Авт. св. 1671539 СССР // Бюлл. "Изобретения". № 23. 1991.
14. **Баталов С. А.** Способ оптимизации нефтедобычи. Патент на изобретение РФ № 2230895 // Бюлл. "Изобретения". № 17. 2004.

УДК 658.012 (621.276)

Д. П. Гиберт,

Л. А. Ковригин, д-р техн. наук, проф.,
Пермский государственный
технический университет**Алгоритм управления
дебитом нефтяных скважин
с парафиновыми отложениями**

Предложен алгоритм управления дебитом нефтяных скважин, склонных к образованию парафиновых отложений. Создана модель процесса осаждения парафина и его удаления тепловым методом для системы автоматического управления процессом добычи нефти.

Объект управления

Дебит нефтяных скважин зависит от различных параметров. В [1, 2] показана возможность организации системы автоматического управления технологическим процессом добычи нефти и предложена упрощенная модель нефтеносного пласта как объекта управления.

Эксплуатация многих нефтяных скважин осложняется образованием парафиновых отложений на стенках насосно-компрессорных труб (НКТ). В за-

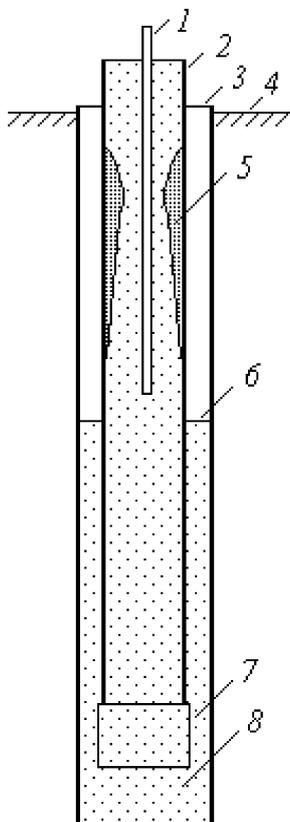


Рис. 1. Отложение парафина на стенках НКТ:

1 — греющий кабель; 2 — НКТ; 3 — обсадная колонна; 4 — поверхность земли; 5 — отложения парафина; 6 — динамический уровень; 7 — насос; 8 — забой

бое парафин растворен в нефти, так как температура на глубине 1000...2500 м составляет 60...120 °С. По мере поднятия нефти происходит понижение ее температуры и резкое снижение растворимости в ней парафинов, что ведет к интенсивному их осаждению на поверхности НКТ (рис. 1). Это вызывает снижение притока жидкости к забою и повышению гидравлических сопротивлений скважин, что снижает их продуктивность [3].

Основными компонентами отложений являются парафины, содержание которых изменяется от 20 до 70 % (по массе), и асфальтосмолистые соединения — от 20 до 40 % [4]. В результате образования парафиновых пробок в простое находится значительная часть добывающих скважин. На мероприятия по предупреждению и ликвидации отложений парафина расходуются значительные материальные и финансовые ресурсы.

Существуют различные методы борьбы с парафиновыми отложениями: тепловые, физические, химические, механические, с использованием покрытия стенок НКТ веществами, которые препятствуют отложению парафина. Наиболее целесообразным для применения в автоматической системе управления процессом ликвидации парафиновых отложений является тепловой метод с использованием протяженного нагревательного элемента в форме кабеля.

Непрерывное нахождение кабеля под током обеспечивает отсутствие отложений, однако это сопровождается значительным расходом электроэнергии [5, 6]. Экономически выгодным следует считать способ тепловой обработки скважин, когда нагревательный кабель включается периодически. Длительность включения кабеля должна быть такой, чтобы удалились все отложения. Затем следует пауза, за время которой вновь нарастают отложения. Решение этой задачи с использованием АСУ ТП возможно при наличии математических моделей отложения и удаления парафина.

Функциональная схема автоматического управления

Нефтяная скважина является объектом управления с распределенными параметрами и ограниченным числом управляющих воздействий — временем включения нагревательного кабеля и током, протекающим по его жилам. Переходный режим в скважине при изменении управляющих и неуправляющих воздействий длительный — несколько недель. Это обусловлено большой массой объекта и медленной перестройкой температурных полей. В данной статье рассматривается управление перестройкой температурного поля скважины из одного стационарного состояния в другое путем расчета по математической модели новых управляющих воздействий.

Классификационные признаки системы автоматического управления нефтяной скважиной [7]:

- цель управления — поддержание дебита скважины на заданном уровне путем периодического удаления отложений;
- характер информации об управляемом процессе — система с полной начальной информацией;
- способ управления — замкнутая система с обратной связью по управляющему независимому входному воздействию при удалении парафина (по температуре скважинной жидкости на устье) и росте парафина (по дебиту);
- принцип формирования сигнала — непрерывно-дискретная система;
- характер зависимости выходных координат от входных — нелинейная связанная система.

Функциональная схема автоматического управления нефтяной скважиной представлена на рис. 2. На вход управляющего устройства (УУ₁) поступают:

- независимое входное управляющее воздействие $T_{зад}$ — заданная температура на устье скважины;
- зависимые входные управляющие воздействия: T_r — геотерма (распределение температуры по глубине вдали от скважины); $T_{п}$ — температура выпадения парафина; μ — вязкость скважинной жидкости; C — теплофизические свойства скважинной жидкости и грунта (теплопроводность, теплоемкость, плотность); G — геометрические размеры (глубина забоя, динамический уровень, глубина подвески насоса, радиусы НКТ и обсадной колонны).

По цепи обратной связи на вход управляющего устройства УУ₁ поступает $T_{изм}$ — измеренная температура на устье скважины.

УУ₁ восстанавливает координату технологического процесса во время работы нагревательного кабеля — распределение температуры движущейся

скважинной жидкости по глубине скважины $T_H = f(L)$ — и формирует выходные управляющие воздействия — ток I_1 и время его протекания τ_1 .

Отложения парафина удаляются за время τ_1 за счет того, что температура скважинной жидкости в любой точке скважины не менее чем на 2...3 °С выше, чем температура отложения парафина. В случае несоответствия $T_{изм}$ с $T_{зад}$ происходит коррекция температуры парафинообразования. Следует отметить, что простое релейное управление с использованием измеренной температуры на устье невозможно вследствие большой инерционности объекта управления и большого разброса в значениях зависимых входных управляющих воздействий для различных скважин.

УУ₂ восстанавливает координату технологического процесса в то время, когда нагревательный кабель отключен (идет рост отложений), и формирует выходные управляющие воздействия τ_0 (паузу между токовыми нагревами). В случае несоответствия $Q_{изм}$ (дебита измеренного) и $Q_{зад}$ (дебита заданного) происходит коррекция коэффициента массообмена (α_M).

Математическая модель роста парафиновых отложений

Для математической модели, которая описывает рост парафиновых отложений на стенке НКТ, приняты следующие допущения:

- НКТ находится в центре обсадной колонны;
- греющий кабель находится в центре НКТ;
- движение скважинной жидкости в НКТ ламинарное;
- в межтрубном пространстве нефть неподвижна;
- теплофизические и реологические свойства материалов зависят от температуры;

- температура грунта на расстоянии 3 м от скважины постоянна и соответствует геотерме;
- рассматривается отложение парафина только на стенках НКТ на участке от забоя до устья;
- ось скважины перпендикулярна поверхности земли, искривление ствола скважины не рассматривается;
- интенсивность отложения парафина зависит только от температуры и скорости нефтяного потока.

Формирование и дальнейшее наращивание парафиновых отложений происходит за

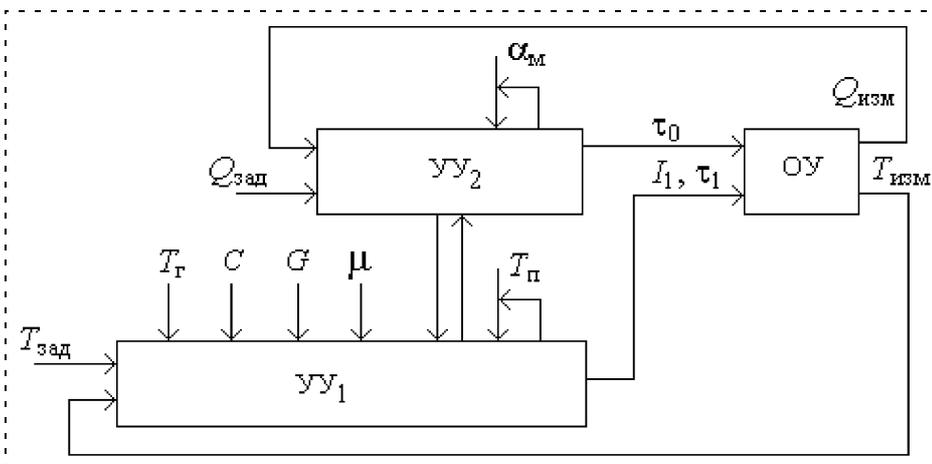


Рис. 2. Функциональная схема автоматического управления депарафинизацией нефтяных скважин: УУ₁, УУ₂ — устройства управления; ОУ — объект управления

счет роста кристаллов непосредственно на стенке НКТ. Вследствие локального снижения температуры потока скважинной жидкости в пристенном слое происходит снижение его растворяющей способности по отношению к парафинам и выделение твердой фазы на поверхности трубы. Для каждой концентрации растворенных парафинов в скважинной жидкости существует температура T_{Π} , ниже которой начинается выпадение твердой фазы из потока, т. е. парафиноотложения будут проявляться во всех режимах работы скважины, при которых температура на устье скважины меньше, чем температура начала кристаллизации парафина.

Температура начала выпадения парафина T_{Π} с учетом массового содержания парафина в нефти [8]: $T_{\Pi} = 14,77 \ln \alpha + 11,4$, где α — массовое содержание парафина в нефти. Глубина, соответствующая отметке, при которой температура нефти равна температуре выпадения парафина, является глубиной начала выпадения парафина h_0 . Прилипания кристаллов парафина, образовавшихся в объеме жидкости, к стенкам НКТ не происходит, так как эти кристаллы выносятся проходящим потоком скважинной жидкости в устье скважины. Механизм формирования парафиновых отложений на поверхности трубы является, по существу, молекулярным процессом, связанным с возникновением и последующим ростом кристаллов на контактирующей с нефтью поверхности.

Скорость отложения парафина имеет одинаковую зависимость от коэффициента массообмена около поверхности отложений и разности между температурой выпадения парафина и температурой поверхности отложений.

Интенсивность парафиноотложения определяется из уравнения

$$\frac{\partial^2 m_{\Pi}}{\partial z \partial t} = \alpha_M \exp(T_{\Pi} - T_{\text{отл}}),$$

где z — координата по глубине скважины; α_M — коэффициент массообмена между потоком скважинной жидкости и твердой поверхностью; m_{Π} — масса парафина; T_{Π} — температура выпадения парафина в твердую фазу; $T_{\text{отл}}$ — температура твердой поверхности парафиновых отложений.

Тогда для массы парафина, накопившейся в сечении трубы за время парафиноотложения t_{Π} , выполнено

$$\frac{\partial m_{\Pi}}{\partial z} = \int_{t=0}^{t_{\Pi}} \alpha_M \exp(T_{\Pi} - T_{\text{отл}}) dt.$$

Площадь парафиновых отложений

$$S_{\Pi} = \frac{1}{\rho_{\Pi}} \frac{\partial m_{\Pi}}{\partial z},$$

где ρ_{Π} — плотность парафиновых отложений.

Также

$$S_{\Pi} = \pi(r_{\text{НКТ1}}^2 - r_{\Pi}^2),$$

где r_{Π} — радиус по парафиновым отложениям; $r_{\text{НКТ1}}$ — внутренний радиус НКТ.

Следовательно,

$$r_{\Pi} = \sqrt{r_{\text{НКТ1}}^2 - \frac{\partial m_{\Pi} / \partial z}{\pi \rho_{\Pi}}}.$$

Толщина парафиновых отложений: $h_{\Pi} = r_{\text{НКТ}} - r_{\Pi}$. Эффективная площадь НКТ, через которую движется нефть, $S_{\text{эф}} = \pi r_{\Pi}^2$.

Масса парафина, отложившегося в скважине на стенках НКТ за время t_{Π} , равна

$$m_{\Pi} = \int_{z=0}^{l_{\text{скв}}} \int_{t=0}^{t_{\Pi}} \alpha_M \exp(T_{\Pi} - T_{\text{отл}}) dt dz.$$

Общая масса парафина, проходящего через НКТ в определенном сечении в единицу времени, $M_{\Pi, \text{общ}} = Q\alpha$. Коэффициент массообмена определяется через толщину пограничного слоя нефти у границы раздела фаз, в котором кристаллы парафина будут зацепляться за твердую поверхность, и насыщенностью этого слоя парафином.

Толщина пограничного слоя определяется, в свою очередь, скоростью движения скважинной жидкости у границы раздела фаз. Увеличение скорости скважинной жидкости в пристенном слое уменьшает толщину слоя, а соответственно, и коэффициент массообмена вследствие срыва кристаллов с поверхности и выноса их в устье скважины. Толщина пограничного слоя, участвующего в массообмене,

$$h_M = h_{\Pi 0} \exp\left(-\frac{\partial V_z}{\partial r}\bigg|_{y=y_{\Pi}}\right),$$

где $h_{\Pi 0}$ — толщина пограничного слоя при граничных условиях $\frac{\partial V_z}{\partial r}\bigg|_{y=y_{\Pi}} = 0$.

Массообмен определяется также геометрическими параметрами: чем больше толщина отложений парафина на стенке НКТ и меньше эффективный диаметр трубы, тем большая масса твердых кристаллов нефти участвует в массообмене с твердой поверхностью в пограничном слое.

Площадь пограничного слоя, участвующего в массообмене, $S_M = \pi(r_{\text{п}}^2 - (r_{\text{п}} - h_M)^2)$. Масса парафина $M_{\text{п1}}$, участвующая в массообмене в единицу времени, и масса парафина $M_{\text{п2}}$, отложившегося на стенках НКТ в единицу времени до глубины L , определяются соотношениями

$$M_{\text{п1}} = \frac{S_M}{S_{\text{эф}}} Q\alpha, \quad M_{\text{п2}} = \int_{z=0}^L \frac{\partial m_{\text{п}}}{\partial t} dz.$$

Тогда коэффициент массообмена на глубине L равен

$$\alpha_{\text{м}|z=L} = \frac{M_{\text{п1}} - M_{\text{п2}}}{\Delta z}.$$

Для расчета процесса отложения парафина применяется квазистационарный подход. Суть данного подхода: весь временной интервал процесса отло-

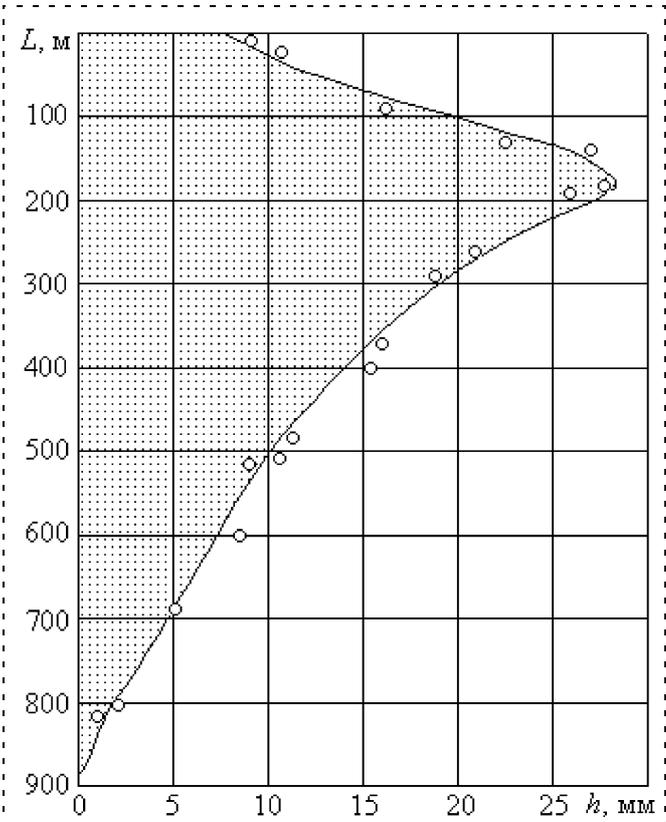


Рис. 3. Экспериментальные значения [4] и расчетная кривая распределения толщины парафиновых отложений h по глубине скважины L

жения парафина делится на ряд участков, внутри каждого из которых полагается, что искомое уравнение не зависит от времени. При переходе от одного временного участка к другому состояние изменяется скачком.

Температура на границе твердой поверхности вычисляется исходя из температурного поля в нефтяной скважине, которое вычисляется тепломассопереносом в длинной трубе на основе дифференциальных уравнений движения и энергии.

Уравнение движения в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + r \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} \right), \quad (1)$$

где $\mu = \mu_0 \exp(\beta(T_0 - T)) \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}}$ — вязкость; P — давление; V_z — скорость нефти вдоль НКТ; r — радиус; μ_0 — вязкости при температуре T_0 ; β — температурный коэффициент вязкости; I_2 — второй инвариант тензора скоростей деформаций; n — аномалия вязкости.

Расход Q_z (дебит):

$$Q_z = \rho \int_{r_1}^{r_2} V_z dr. \quad (2)$$

Уравнение энергии в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\rho C V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где C — теплоемкость; λ — теплопроводность; ρ — плотность.

На рис. 3 представлена расчетная кривая распределения толщины парафиновых отложений $h_{\text{п}}$ по глубине скважины $L_{\text{скв}}$ и для сравнения приведены экспериментальные значения [9].

Данные для расчета: скважина глубиной 2000 м; диаметр НКТ — 73 мм; дебит — 20 т/сут; $\alpha = 0,03$ — массовая доля содержания парафина в нефти. Расчет показал, что за 20 суток работы в таком режиме происходит закупорка скважины.

Математическая модель удаления парафиновых отложений

При построении математической модели удаления парафиновых отложений были приняты следующие допущения: движение ламинарное; температура породы на расстоянии 3 м от центра скважины постоянна. Расчет скорости движения нефти

и температурного поля в скважине проводился по уравнениям (1)–(3).

Граничные условия (λ_p — теплопроводность парафина; λ_n — теплопроводность нефти):

- $\lambda_p \frac{\partial T^{(p)}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$ — тепловой поток, идущий от кабеля, равен тепловому потоку, входящему в нефть (адиабатические условия в центре НКТ);

- $\lambda_n \frac{\partial T^{(n)}}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{НКТ}}} = \lambda_n \frac{\partial T^{(n)}}{\partial r}$ — на границе раздела

тепловой поток, идущий от межтрубного пространства НКТ, равен тепловому потоку, входящему в межтрубное пространство, заполненное нефтью;

- $V_z \Big|_{r=R_{\text{НКТ}}} = 0$ — на внутренней поверхности

НКТ выполняется условие прилипания.

На рис. 4 представлено изменение температуры нефти во время ее движения от забоя к устью скважины при дебите 40 т/сутки. Расчетная кривая температуры нефти в скважине (кривая 3) отличается не более чем на 3 °С от экспериментальной кривой 2, снятой на одном из месторождений.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо решить систему дифференциальных уравнений (1)–(3), замкнутых краевыми условиями.

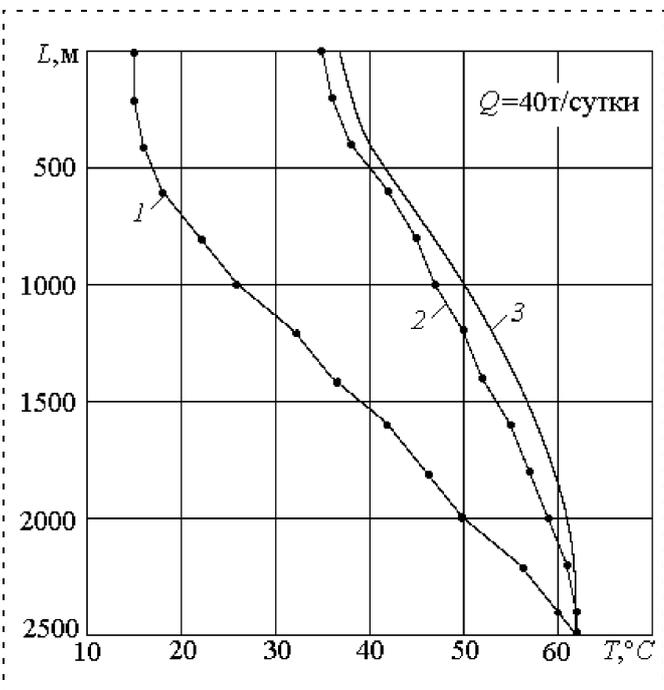


Рис. 4. Распределение температуры по глубине скважины при дебите 40 т/сутки: 1 — геотерма; 2 — экспериментальная кривая температуры нефти; 3 — расчетная кривая

Алгоритм расчета времени образования парафиновых отложений и тока нагревательного кабеля для их удаления

По полученной модели процесса осаждения (рис. 5, а) парафина в НКТ и его удаления (рис. 5, б) была разработана программа, состоящая из двух частей:

- расчет момента времени τ_0 включения токового нагрева;
- расчет тока I_1 и времени его воздействия τ_1 для удаления отложений.

Порядок расчета времени образования парафиновых отложений на стенке НКТ (рис. 5, а).

1. В программу вводятся геотерма, геометрические размеры скважины, дебит, реологические свойства скважинной жидкости и от датчика передается измеренный дебит $Q_{\text{изм}}$.

2. Начало цикла по времени t .

3. Начало цикла по глубине скважины L (от забоя к устью).

4. Расчет скорости движения скважинной жидкости V_z в НКТ как функции радиуса методом конечных разностей по уравнению движения (1) в цилиндрической системе координат.

5. Определение дебита Q_p скважинной жидкости по уравнению (2).

6. Сравнение дебита Q_p с измеренным $Q_{\text{и}}$ и корректировка коэффициента массообмена α_m .

7. Расчет температуры скважины как функции радиуса методом конечных разностей по явной схеме по уравнению (3) энергии в цилиндрической системе координат.

8. Вычисление количества парафина, способного осесть на стенке НКТ $M_{\text{п2}}$, и толщины слоя отложившегося парафина $h_{\text{п}}$.

9. Вычисление глубины скважины, на которой начинает выпадать парафин.

10. Расчет эффективного сечения канала $S_{\text{эф}}$ с учетом отложившегося парафина.

11. Конец цикла по глубине скважины L .

12. Проверка эффективного сечения канала $S_{\text{эф}}$. В том случае, если $S_{\text{эф}}$ меньше заданного $S_{\text{зад}}$, то $\tau_0 = t$, т. е. через это время необходимо включить нагревательный кабель.

13. Конец цикла по времени τ_0 .

Порядок расчета тока нагревательного кабеля I_1 и времени нагрева τ_1 для удаления парафиновых отложений (рис. 5, б).

1. Ввод от датчика температуры скважинной жидкости $T_{\text{уст}}$ на устье скважин.

2. Расчет скорости движения скважинной жидкости V_z в НКТ как функции радиуса методом конечных разностей по уравнению движения (1) в цилиндрической системе координат.

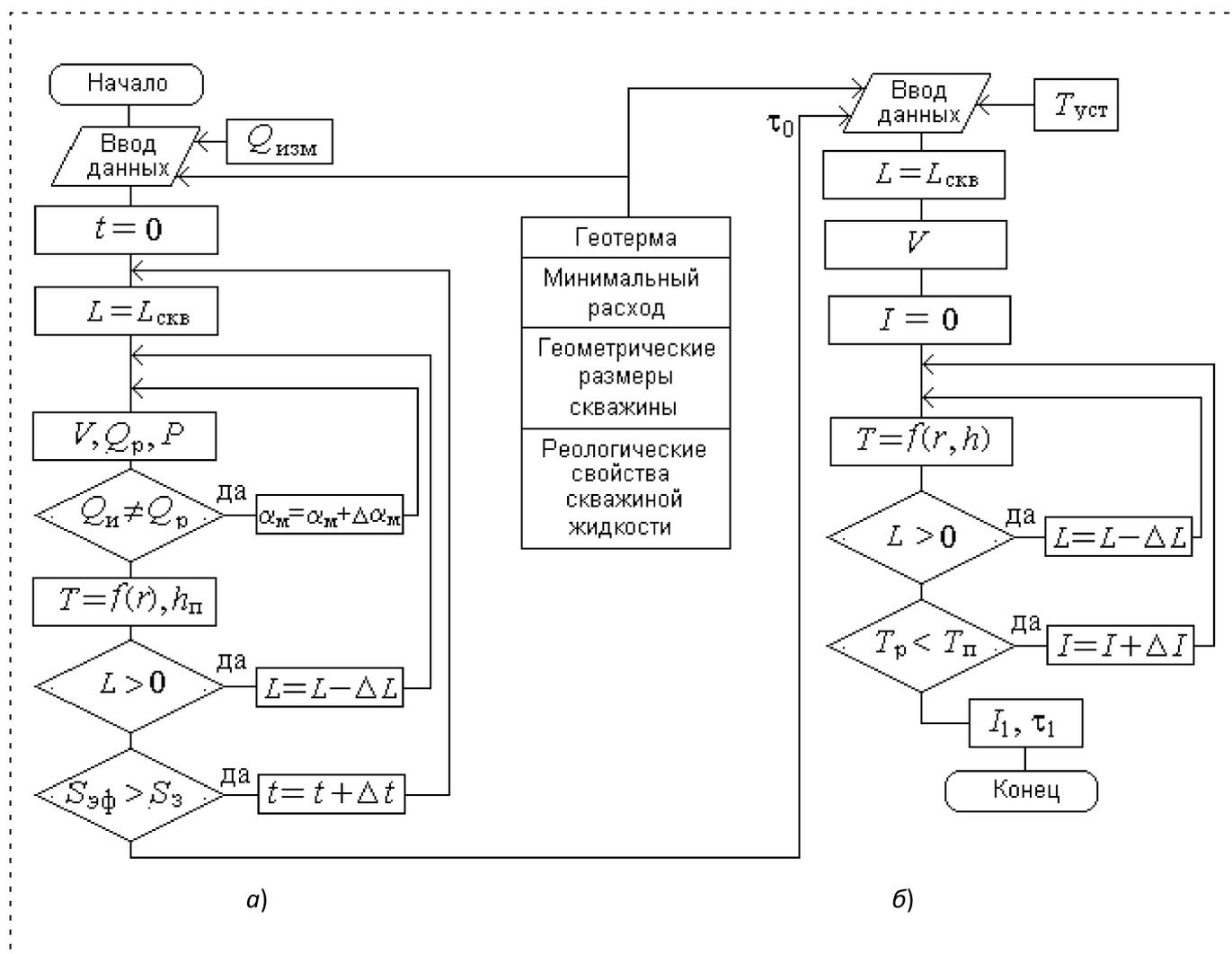


Рис. 5. Блок-схема программы расчета: а – времени образования парафиновых отложений и б – тока нагревательного кабеля и времени нагрева

3. Начало цикла по току нагрева I .

4. Расчет температуры в скважине по радиусу и глубине методом конечных разностей по явной схеме по уравнению (3) энергии в цилиндрической системе координат.

5. Увеличение рассчитанного тока до тех пор, пока температура скважинной жидкости в любой точке НКТ не станет больше температуры выпадения парафина.

6. Конец расчета тока нагрева $I_1 = I$ и времени его протекания τ_1 .

Список литературы

1. Бадамшин Р. А., Тансеев А. Р., Тагирова К. Ф. Уточненная математическая модель для оперативного управления технологическим процессом добычи нефти // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 9. С. 41–44.

2. Тагирова К. Ф. Решение актуальных задач автоматизации добычи нефти на основе иерархической системы моделей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 9. С. 37–40.
 3. Нагимов Н. М., Ишкаев Г. И., Шарифуллин А. В., Козин В. Г. Новый ряд углеводородных композитов для удаления АСПО // Нефтепромысловое дело. 2001. № 9.
 4. Персиянцев М. Н. Добыча нефти в осложненных условиях. М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000. 653 с.
 5. Ковригин Л. А., Акмалов И. М., Макиенко Г. П., Пешин С. М. Нагревательные кабели и электрообогрев скважин // Бурение и нефть. 2004. № 3.
 6. Ковригин Л. А., Акмалов И. М., Макиенко Г. П. Нагревательные кабели и управление температурным полем в нефтяной скважине // Инженер. 2003. № 11.
 7. Анхимюк В. Л., Опейко О. Ф., Михеев Н. Н. Теория автоматического управления. Мн.: Дизайн ПРО, 2000. 352 с.
 8. Малышев А. Г., Черемсин Н. А., Шевченко Г. В. Выбор оптимальных способов борьбы с парафиногидратообразованием // Техника и технология добычи нефти. 1997. № 9.
 9. Ковригин Л. А. Управление температурным полем нефтяной скважины // Информационные управляющие системы: Межвуз. сб. науч. тр. / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2001. С. 128–134.

УДК 624.042.7

Ю. А. Бурьян, д-р техн. наук, проф.,
В. Н. Сорокин, д-р техн. наук, доц.,
 Омский государственный
 технический университет

Управление частотой излучения гидравлического скважинного вибратора

Рассмотрена система управления частотой излучения гидравлических скважинных вибраторов, работа которых основана на подаче с устья скважины рабочей жидкости, при этом давление и расход жидкости обеспечивают необходимую скорость вращения рабочего органа вибратора, установленного на глубине залегания нефтеносного пласта.

В настоящее время для низкочастотного акустического воздействия на призабойную зону пласта (ПЗП) широко применяются различного вида погружные скважинные вибраторы (роторного шибберно-торцевого вида и т. д.), которые устанавливаются на глубине залегания пласта [4]. Эти вибраторы достаточно надежны, обладают достаточно большой мощностью и имеют частотный диапазон 10...100 Гц, при этом рабочий орган вибратора, создающий пульсирующий перепад давления, приводится во вращение за счет создания необходимого расхода и давления жидкости насосом на устье скважины. Перспектива использования вибраторов подобного типа для виброрейсмического воздействия (ВСВ) на нефтеносный пласт ограничена тем, что стабильность частоты у этих вибраторов невысока, в то время как для ВСВ допустимая погрешность частоты излучения на доминантной частоте пласта составляет не более 0,1 Гц при диапазоне доминантных частот 5...20 Гц [5].

В связи с этим актуальной является проблема создания системы управления частотой погружных вибраторов, которая должна обеспечивать их работу на доминантной частоте пласта с погрешностью не более 0,1 Гц.

Вибратор по принципу действия представляет собой объемную гидравлическую машину, скорость вращения которой (а следовательно, и частота излучения энергии) при

неизменном давлении определяется подачей насоса. В этом случае регулирующим воздействием является изменение расхода насоса в соответствии с отклонением частоты излучения от заданной.

Функциональная схема системы управления частотой излучения погружного вибратора в предположении, что на устье скважины установлен насос с регулятором давления, показана на рис. 1.

Особенностью приведенной на рис. 1 системы управления является то, что управляющий сигнал по расходу $Q(t)$ и перепад давления от вибратора до датчика обратной связи распространяются по длинной гидравлической линии.

Принципиальная структурная схема системы управления представлена на рис. 2.

Будем полагать, что

$$W_1(p) = K_1; W_2(p) = \frac{K_2}{p(T_2p + 1)}, \quad (1)$$

где K_2 определяется параметрами электродвигателя, редуктора и площадью отверстия дросселя в регуляторе расхода, при этом $W_2(p)$ предполагается линейной при идеальной работе регулятора давления насоса.

Если в качестве вибратора используется вибратор роторного типа, силовая часть которого (гидромотор) вращает устройство, периодически перекрывает

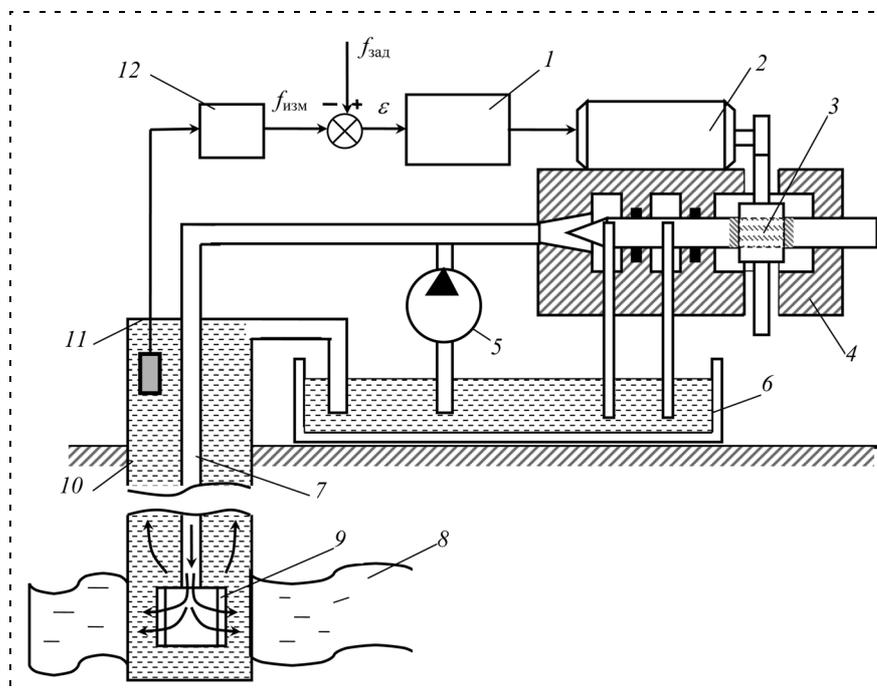


Рис. 1. Функциональная схема управления частотой излучения:
 $f_{зад}$ — заданная частота; $f_{изм}$ — измеренная частота; $\varepsilon = f_{зад} - f$; 1 — усилитель; 2 — электродвигатель; 3 — пара винт-гайка; 4 — регулятор расхода; 5 — насос; 6 — бак; 7 — колонна насосно-компрессорных труб (НКТ); 8 — нефтеносный пласт; 9 — погружной вибратор; 10 — обсадная труба; 11 — датчик давления; 12 — измеритель частоты

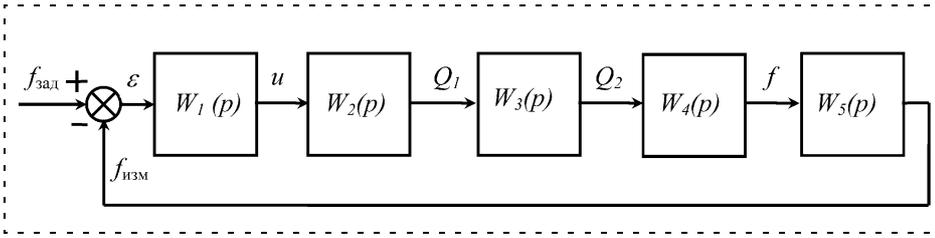


Рис. 2. Принципиальная структурная схема системы управления:

$W_1(p)$ — передаточная функция усилителя; $W_2(p)$ — передаточная функция регулятора расхода; $W_3(p)$ — передаточная функция гидравлической линии от устья до вибратора; $W_4(p)$ — передаточная функция генератора импульсов давления (вибратора); $W_5(p)$ — передаточная функция гидравлической линии от вибратора до устья; u — напряжение с усилителя; Q_1 — расход насоса; Q_2 — расход у вибратора; f — частота перепада давления, создаваемого вибратором; f_3 — заданная частота; p — комплексная переменная Лапласа

Для определения передаточных функций $W_3(p)$ и $W_5(p)$ необходимо записать уравнения неустановившегося ламинарного движения сжимаемой жидкости в упругой цилиндрической трубе круглого сечения [2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{2\tau_0}{\rho r_0} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Delta P}{\partial x}; \\ \frac{\partial V}{\partial t} &= -\frac{1}{B_{тр}} \frac{\partial \Delta P}{\partial t}, \end{aligned} \right\} (5)$$

вающее давление в призабойной зоне, то уравнение расходов можно представить в виде [2]

$$Q_1(t) = q_M \frac{d\alpha}{dt} + K_{\Pi} \Delta P + \frac{V_0}{2B_{ж}} \frac{d\Delta P}{dt}, (2)$$

где q_M — рабочий объем гидромотора, приведенный к одному радиану поворота вала; K_{Π} — проводимость щелей, по которым происходит перетечка жидкости; V_0 — объем полостей гидромотора; $B_{ж}$ — модуль объемной упругости жидкости; ΔP — разность давлений; α — угол поворота ротора.

Уравнение моментов на оси вращения роторно-вибратора в линейном приближении без учета момента сопротивления невязкого типа можно записать в виде

$$\frac{J}{q_M} \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{K_{тр}}{q_M} \frac{d\alpha}{dt} = \Delta P, (3)$$

где J — момент инерции вращающихся частей; $K_{тр}$ — вязкое трение.

После преобразования по Лапласу уравнений (1), (2) и обычных алгебраических преобразований для передаточной функции $W_4(p)$ получим

$$W_4(p) = \frac{K_4}{T_4^2 p^2 + 2\xi T_4 p + 1}, (4)$$

где $K_4 = \frac{q_M n}{q_M^2 + K_{тр} K_{\Pi}}$; n — число щелей в устройстве

перекрытия давления; $T_4^2 = \frac{J V_0}{2 B_{ж} (q_M^2 + K_{тр} K_{\Pi})}$;

$$2\xi T_4 = \frac{V_0 K_{тр} + K_{\Pi} J \cdot 2 B_{ж}}{2 B_{ж} (q_M^2 + K_{тр} K_{\Pi})}.$$

где $\frac{1}{B_{тр}} = \frac{1}{B} + \frac{1}{E_1}$; $B_{тр}$ — приведенный модуль упругости трубы; $E_1 = \frac{E\delta}{2r_0}$; E — модуль упругости

стенки трубы; B — модуль объемной упругости среды; r_0 — радиус трубы; δ — толщина стенки трубы; τ_0 — квазистационарное касательное напряжение на стенке трубы; ρ — плотность жидкости; ΔP , V — соответственно, давление и плотность среды.

Проводя преобразование Лапласа уравнений (5) и вводя операторный коэффициент распространения возмущений [2]

$$\vartheta(p)^2 = \frac{p}{B_{тр}} \left[\rho p + \frac{2W_{\tau V}(p)}{r_0} \right], (6)$$

где $W_{\tau V}(p) = \frac{\tau_0(p)}{V(p)}$; $\tau_0(p)$, $V(p)$ — изображение по Лапласу, соответственно, нестационарного касательного напряжения на стенке трубы и средней по сечению потока скорости среды, получим

$$\frac{d^2 \Delta P(p)}{dx^2} - \vartheta^2 \Delta P(p) = 0. (7)$$

Решение дифференциального уравнения (7) при граничных условиях $\Delta P(p, x) = \Delta P_1(p, 0)$

$$\frac{d\Delta P(p, x)}{dx} = -\frac{\vartheta^2(p) B_{тр}}{p} V_1(p, 0).$$

Принимая длину линии, равной l , для $x = l$ получим [2]

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_2(p, l) &= \Delta P_1(p, 0) \operatorname{ch}[\vartheta(p)l] - \frac{\vartheta(p) B_{тр} V_1(p, 0)}{p} \operatorname{sh}[\vartheta(p)l]; \\ V_2(p, l) &= V_1(p, 0) \operatorname{ch}[\vartheta(p)l] - \frac{p \Delta P_1(p, 0)}{\vartheta(p) B_{тр}} \operatorname{sh}[\vartheta(p)l]. \end{aligned} \right\} (8)$$

Для управления скоростью вращения ротора вибратора необходимо изменять расход в начале линии длиной $l = H$, где H — глубина скважины, а измерение частоты происходит на устье скважины, при этом генератор перепада давления находится на уровне забойной зоны, которую для данного случая необходимо принять за начало линии.

Таким образом, необходимо рассматривать две линии с распределенными параметрами:

1 — передача по насосно-компрессорным трубам изменений по расходу от устья скважины до забойной части;

2 — передача перепада давления от забойной части до устья по обсадной трубе.

Гидравлическая схема (см. рис. 1) данной системы такова, что от концов линий не происходит отражений волн возмущений (для первой линии по $Q(t)$, по второй — $\Delta P(t)$), так как линии пропускают тот расход среды, который переносится прямой волной. Таким образом, можно считать, что нагрузки, подключенные к концам линий, являются согласованными. В этом случае из (8) можно получить выражения

$$\frac{Q_2(p, l)}{Q_1(p, 0)} = e^{-\vartheta_1(p)l} \quad \text{— для линии по передаче расхода;} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta P_1(p, 0)}{\Delta P_2(p, l)} = e^{-\vartheta_2(p)l} \quad \text{— для линии по передаче перепада давления.} \quad (10)$$

В предположении квазистационарного характера гидравлического сопротивления линии согласно [2] можно записать

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_1(p) &= \frac{P}{C_l}; \\ \vartheta_2(p) &= \frac{P}{C_l} + \delta, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где $C_l = \sqrt{\frac{B_{тр}}{\rho}}$ — скорость распространения волны возмущения; $\delta \approx \frac{4\nu}{r_0^2} \sqrt{\frac{\rho}{B_{тр}}}$ — коэффициент затухания; ν — кинематическая вязкость.

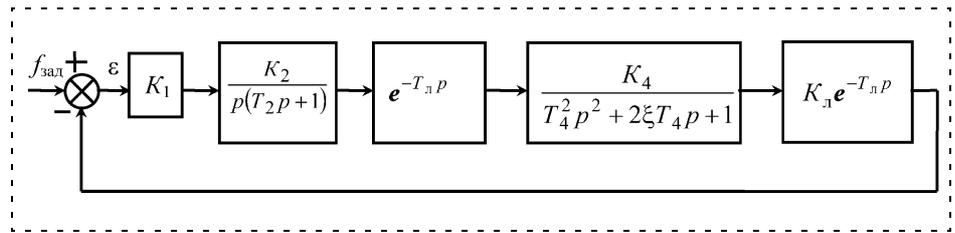


Рис. 3. Структурная схема системы управления

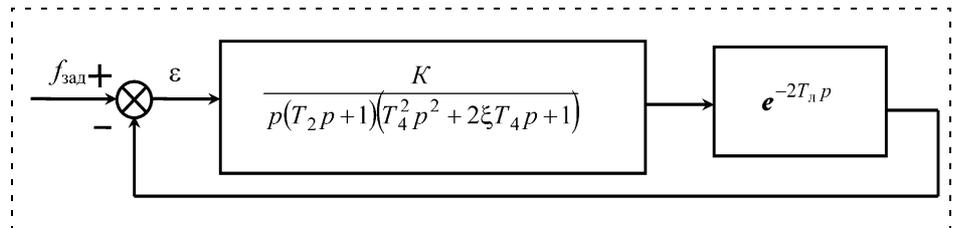


Рис. 4. Преобразованная структурная схема системы управления $K = K_1 K_2 K_l'' K_4$

Таким образом, передаточные функции $W_3(p)$ и $W_5(p)$ будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} W_3(p) &= e^{-T_l p}; \\ W_5(p) &= K_l'' e^{-T_l p}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $K_l'' = e^{-\delta l}$, $T_l = \frac{l}{C_l}$.

С учетом вышеизложенного структурная схема системы управления будет иметь вид, представленный на рис. 3.

Постоянное запаздывание в передаче возмущения в гидравлической линии может приводить, как известно, к потере устойчивости системы.

Для оценки устойчивости системы представим структурную схему в виде, представленном на рис. 4.

Два звена чистой задержки можно объединить в одно [3], что позволяет оценить устойчивость системы управления по логарифмическим частотным характеристикам разомкнутой системы с учетом того, что фазовая характеристика "предельной" системы (при $T_l = 0$) изменяется на " $-\omega T_l$ " при включении звена чистой задержки. Для устойчивой системы фаза на частоте среза должна быть больше $-\pi$.

На рис. 5 приведены амплитудные и фазочастотные характеристики для следующих значений параметров: $T_l = 2$ с (что соответствует глубине скважины 3 км), $T_2 = 0,1$ с, $K = 0,1 \dots 1$.

Анализ амплитудных и фазочастотных характеристик показывает, что предельная система устойчива до значений $K = 100$, в то время как (это следует из рис. 5) система с звеньями запаздывания теряет устойчивость при $K \approx 0,4$. Таким образом,

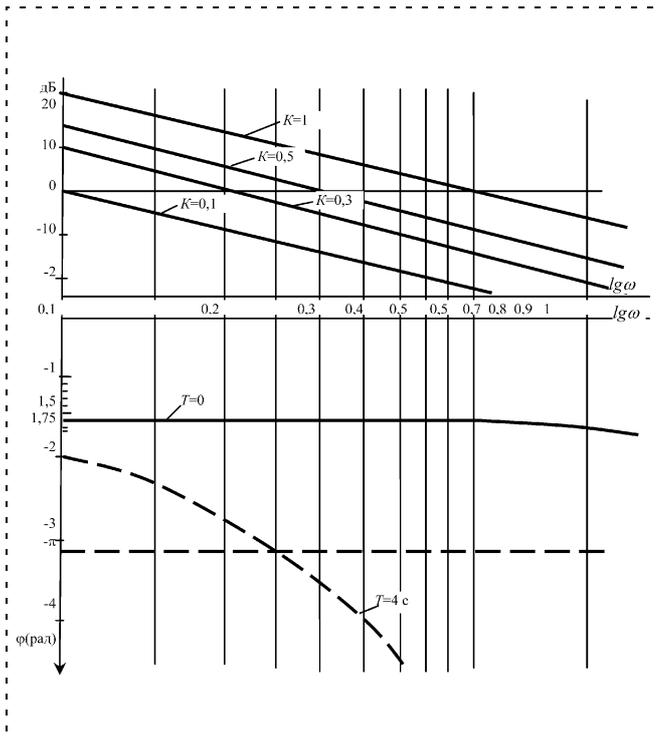


Рис. 5. Логарифмические амплитудные и фазочастотные характеристики

при значениях $K = 0,1 \dots 0,3$ система управления будет устойчива.

Переходный процесс системы построен с применением прикладной программы *MatLab* с расширением *Simulink* (схема набора приведена на рис. 6, в которой звено чистого запаздывания реализовано блоком задержки сигнала I).

При $K = 0,2$ переходный процесс представлен на рис. 7. Очевидно, что в зависимости от глубины скважины будет изменяться T_d , а следовательно, и предельное значение коэффициента усиления K , при котором система сохраняет устойчивость.

Необходимо отметить, что основные выводы о принципах функционирования системы управления и об устойчивости остаются в силе и в случае, если у погружного скважинного генератора скорость вращения определяется давлением, а насос на устье скважины имеет систему управления давлением.

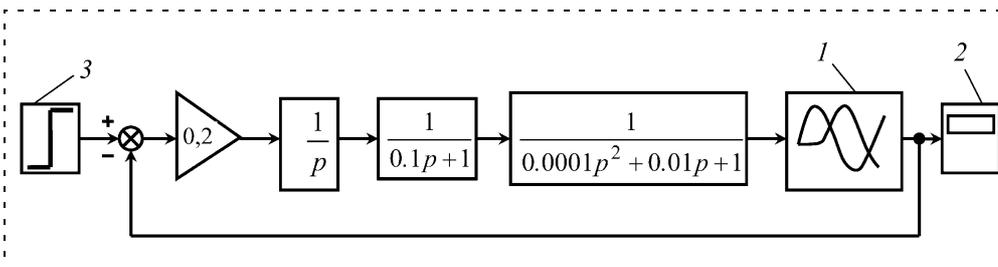


Рис. 6. Схема набора системы управления в *Simulink*:

1 — блок задержки сигнала; 2 — осциллограф; 3 — генератор единичного сигнала

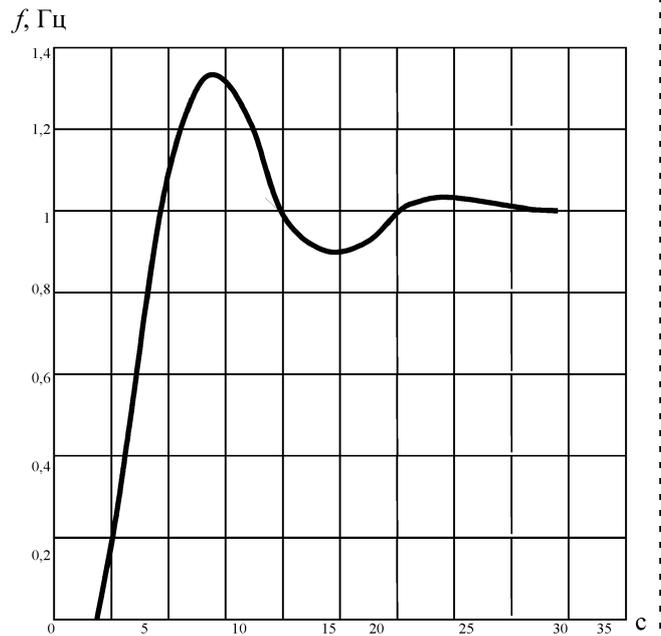


Рис. 7. График переходного процесса

Ошибка системы будет в основном определяться погрешностью измерения частоты датчиком на устье скважины и значением сухого трения на оси вращения генератора импульсов.

Таким образом, проведенное исследование системы управления скоростью вращения рабочего органа погружного вибратора показывает принципиальную возможность создания устойчивой системы стабилизации частоты излучения упругих волн скважинным роторным вибратором.

Список литературы

1. Граков С. В. Исследование гидравлического канала связи телеметрической системы контроля забойных параметров в процессе бурения // Нефтегазовое дело. 2005. № 5.
2. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение, 1987.
3. Теория автоматического управления. В 2 кн. / Под ред. А. А. Воронова. М.: 1977.
4. Справочное руководство по проектированию и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти / Под ред. Ш. К. Гиматудинова. М.: Недра, 1983.
5. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / Отв. ред. Г. М. Цибульчик. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал "Гео" изд-ва СО РАН, 2004.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

УДК 612.014.421.8: 681.3.58: 629.73.08

М. Д. Скубилин, канд. техн. наук, доц.,
Таганрогский технологический институт,

А. В. Письменов, канд. техн. наук, доц.,
ЗАО "Стинс-Таганрог",

О. Б. Спиридонов, канд. техн. наук,
ООО "АВИА-ОК"

Мониторинг летательного аппарата с учетом состояния его пилота

Система мониторинга летательного аппарата предназначена для оценки, регистрации и анализа полетной ситуации в масштабе реального времени на борту летательного аппарата и в наземных пунктах управления воздушным движением. Она обеспечивает контроль состояния агрегатов летательного аппарата по ряду технических параметров и состояния его пилота по ряду параметров работы его сердца, а также генерирование alert-сигнала в случае выхода любого из контролируемых параметров за поле его допуска.

Введение

Высокодинамичные эргатические автоматизированные системы управления нуждаются (наряду с полным контролем состояния ее технической части) и в оценке состояния ее координатора — человека-оператора. Летательные аппараты (ЛА) являются такими системами. Современные ЛА оборудованы системами контроля технического состояния — системами сбора и обработки полетной информации (ССиОПИ). Эти системы позволяют непрерывно, в течение всего полетного времени, регистрировать элементы траектории полета, действия пилота, состояние агрегатов ЛА и сигналы о нештатных состояниях отдельных агрегатов, а в последующем, в камеральных условиях, обрабатывать и анализировать исходную информацию.

Для записи исходной технической информации на борту ЛА используется целый ряд способов и технических средств. Все типы систем сбора исходной информации объединяет общее свойство: наличие датчиков состояния объектов контроля, преобразующих измеряемую величину в электрические сигналы; коммутаторов, последовательно или в порядке убывания приоритетности соединяющих датчики со средствами преобразования, накопления и хранения информации. Кроме того, все серийно

выпускаемые пилотируемые ЛА обеспечены звуковым регистратором, записывающим речевую информацию экипажа. [1].

Недостатки существующих систем сбора и обработки полетной информации

Ныне существующие и эксплуатируемые в авиации ССиОПИ обладают, по крайней мере, двумя недостатками. Во-первых, полетная информация фиксируется только на борту ЛА и недоступна в пунктах управления воздушным движением (ПУВД) в реальном масштабе времени, что исключает возможность оценки процесса полета диспетчером и принятия экстренных мер в случаях нештатных ситуаций на борту ЛА. И, во-вторых, известные системы не предусматривают объективный контроль состояния организма пилота в реальном времени, что порою приводит к катастрофическим результатам. Кроме того, накопители полетной информации иногда оказываются недоступными для обработки и анализа в послеполетное время.

Во избежание потери времени на исправление нештатных ситуаций по причинам человеческого фактора, для своевременного принятия мер недопущения аварийных ситуаций или минимизации их последствий представляется целесообразным существующие ССиОПИ дополнить средствами контроля состояния организма пилота как на борту ЛА, так и в ПУВД, причем предупредительную информацию о выходе контролируемого(ых) параметра(ов) генерировать в реальном времени.

Существующая ССиОПИ [1], частично учитывающая вышеперечисленные недостатки, содержит (рис. 1) на борту ЛА подсистему сбора и передачи информации (ПСИПИ), включающую датчики состояния отдельных агрегатов ЛА (не показаны), датчики переговорной информации (не показаны), блок сбора и преобразования информации (БСиПИ), блок сбора и регистрации переговорной информации (БСиРПИ), основной блок записи технической информации (ОБЗТИ) и запасной блок записи технической информации (ЗБЗТИ), блок обработки и подготовки информации (БОиПИ) и блок передачи информации (ВПИ), и в ПУВД — подсистему приема и обработки информации (ППиОИ), соединенную по каналу радиосвязи с выходом ПСиПИ и включающую приемник информации (ПИ), блок обработки и анализа информации (БОиАИ) и блок записи исходной информации (БЗИИ).

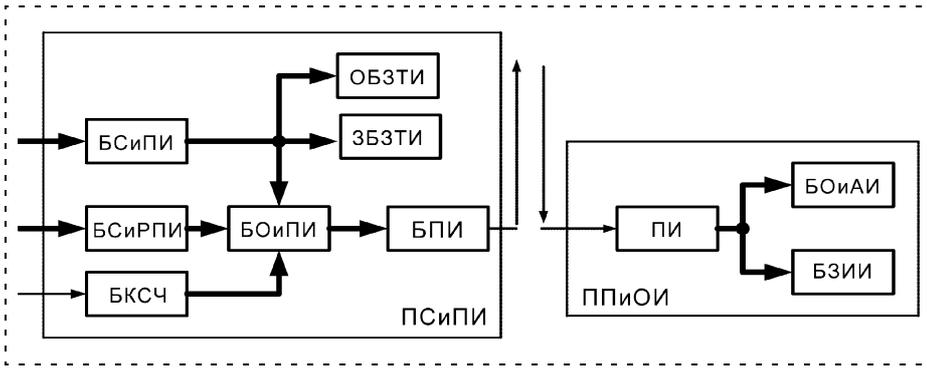


Рис. 1. Система сбора и обработки полетной информации

Эта система позволяет контролировать состояние отдельных агрегатов ЛА и регистрировать состояние датчиков и переговоры пилота ЛА в ОБЗТИ, ЗБЗТИ и БСиРПИ.

Однако рассмотренная система не учитывает состояние пилота, включенного в контур управления ЛА. Поведение же ЛА во многом определяется этим состоянием, подверженным к тому же внезапным непредсказуемым изменениям.

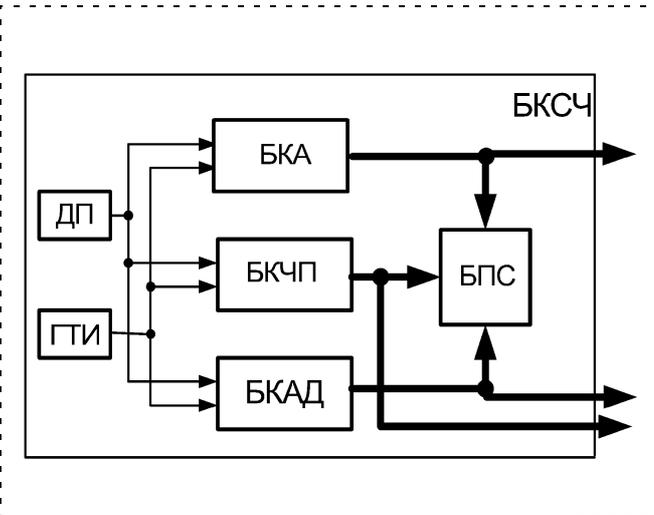


Рис. 2. Блок контроля состояния организма человека

Известно, что высокой репрезентативностью в отношении физического и/или эмоционального состояния человека обладают параметры, характеризующие его сердечную деятельность: частота пульса сердца, наличие аритмии и тахикардии, артериальное давление [2, 3].

Архитектоника предложения. В связи с вышеизложенным в ПСиПИ известной системы [2] надлежит ввести (рис. 1) блок контроля состояния организма человека (БКСЧ), который включает (рис. 2) датчик пульса (ДП), генератор тактовых импульсов (ГТИ), блоки контроля аритмии (БКА), контроля частоты пульса (БКЧП) и контроля артериального давления (БКАД), передающие информацию на БОиПИ, а также блок предупредительной сигнализации (БПС).

Системотехнические предложения. БКА (рис. 3) содержит источник постоянного потенциала (ИПП), задатчик постоянного потенциала (ЗПП), пороговый элемент (ПЭ), формирователи импульсов (Ф), регистр сдвига (РС), элементы задержки (З), логические элементы И (&), ИЛИ (1), сравнения (ЭС), счетчики импульсов (СИ), арифметический узел (АУ), регистр памяти (Р) и индикатор (И) результата контроля.

В БКА задатчиком ЗПП устанавливается значение порога срабатывания ПЭ, по переднему фронту каждого импульса высокого потенциала с выхода ДПС и ПЭ состояние РС изменяется, единичный потенциал генерируется на выходе следующего разряда, а выход предыдущего разряда обнуляется. За полный цикл работы РС в СИ фиксируются число импульсов $N_{СИ1}$ и $N_{СИ2}$, пропорциональное двум последовательным периодам следования пульсов сокращения сердца. В АУ вычисляется значение $N_{АБ} = N_{СИ1}/N_{СИ2}$ при $N_{СИ1} < N_{СИ2}$, или $N_{СИ2}/N_{СИ1}$ при $N_{СИ1} > N_{СИ2}$, а так как $N_{СИ1} = T_1 f$, и $N_{СИ2} = T_2 f$, где f — частота, T_1 и T_2 — периоды следования пульсов сокращения сердца, то $N_{АБ} = N_{СИ1}/N_{СИ2} = T_1/T_2$ или $N_{АБ} = N_{СИ2}/N_{СИ1} = T_2/T_1$ однозначно отражает аритмию сердца, оцениваемую за период из последовательности четырех сокращений сердца.

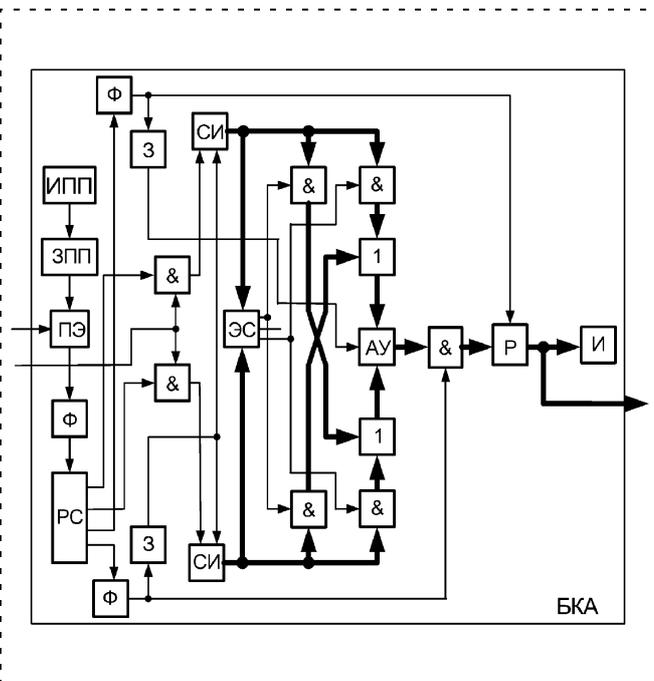


Рис. 3. Блок контроля аритмии сердца человека

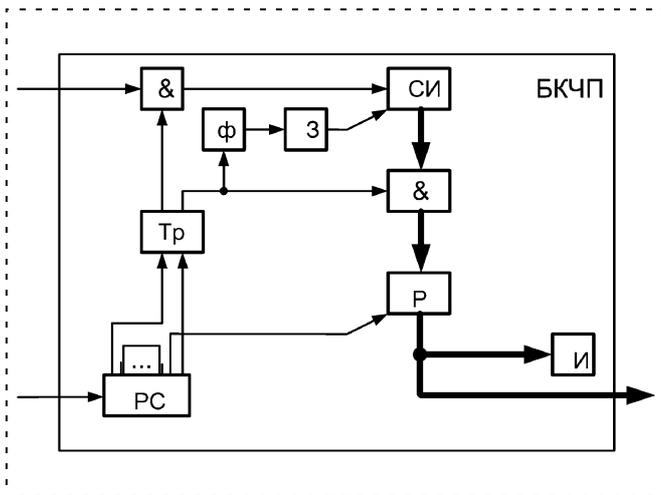


Рис. 4. Блок контроля частоты пульса сердца человека

Тогда значение N_{AB} ($0 < N_{AB} < 1$), генерируемое на выходах АУ, фиксируемое в Р и отображаемое И, — не что иное, как искомый коэффициент аритмии $\alpha = N_{AB}$ работы сердца [4, 5].

В БКЧП (рис. 4), содержащем логические элементы И (&), кольцевой регистр сдвига (РС), триггер (Тр), формирователь импульсов (Ф), элемент задержки (З), счетчик импульсов (СИ), регистр памяти результата контроля (измерения) (Р) и индикатор результата контроля (измерения) (И), каждым импульсом с выхода генератора ГТИ единичный потенциал последовательно пробегает все разряды регистра РС, и за полный цикл работы РС однозначно определяется значение частоты сокращений сердца, а содержимое его Р, отражаемое И,

несет объективную информацию о частоте сердечных сокращений и тахикардии.

БКАД (рис. 5) объединяет обратный преобразователь, включающий упор (магнитопровод) (У) и соленоид (С), содержащий катушку, сердечник (постоянный магнит), мембрану и шток, а также следующие элементы: логические элементы И (&), триггеры (Тр), формирователи импульсов (Ф), элементы задержки (З), счетчик импульсов (СИ), цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), регистры памяти результата контроля (измерения) (Р) и индикаторы результата контроля (измерения) (И). БКАД по каждому импульсу сокращения сердца от датчика пульса ДП сердца генерирует единственный импульс высокого потенциала, которым изменяется состояние выходов счетчика импульсов СИ дискретно во времени, с периодом $T = 1/f$, на одну дискрету (единицу), в результате чего и состояние выхода ЦАП также изменяется, а следовательно, и значение тока I_y в катушке соленоида С изменяется. За полный цикл работы счетчика СИ пилообразно от нуля до максимума (или наоборот) изменяется и положение катушки, мембраны и штока, но тогда пилообразно изменяется и сила в осевом направлении соленоида, в сторону упора, следовательно расположенная между штоком и упором ногтевая фаланга О пальца человека подвергается механическому воздействию по пилообразному во времени закону. При изменении тока в катушке соленоида С его шток воздействует на палец человека с силой F и создает давление на артерию $P(t) = F(t)/S$ (здесь S — площадь механического контакта с пальцем человека). Далее по первому

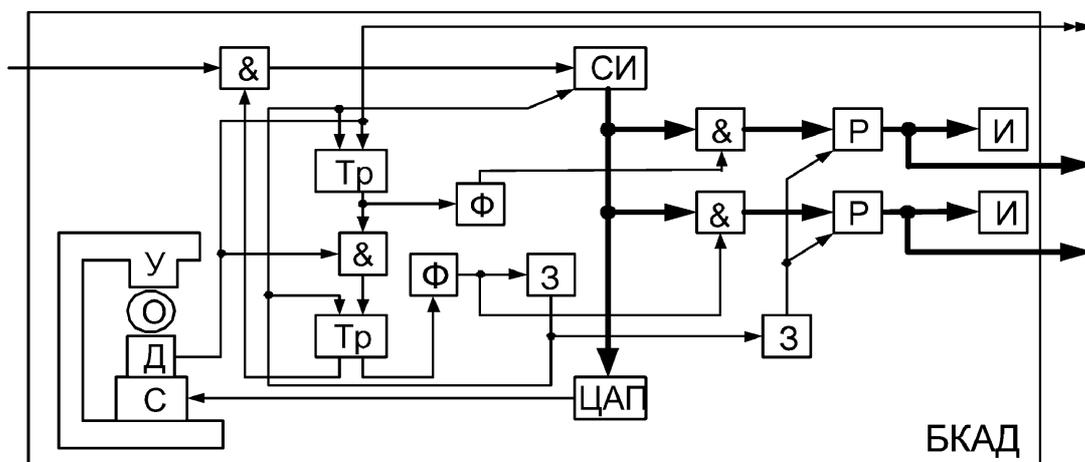


Рис. 5. Блок контроля артериального давления человека

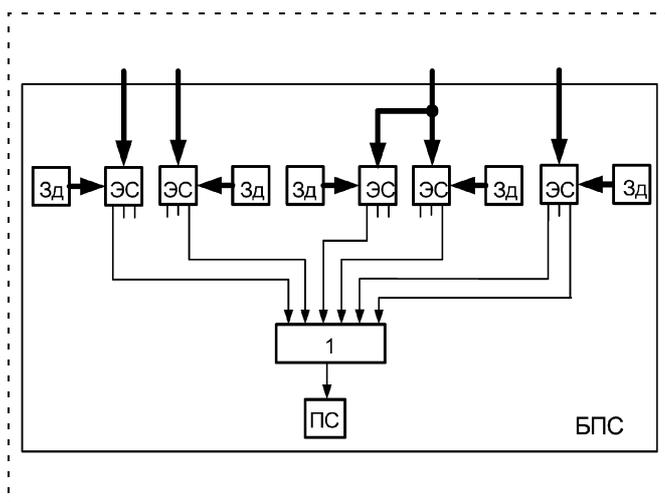


Рис. 6. Блок предупредительной сигнализации

импульсу с выхода датчика ДП содержимое счетчика СИ фиксируется в Р и отображается индикаторами И [6].

В БПС (рис. 6), содержащем задатчики (Зд), элементы сравнения (ЭС), элемент ИЛИ (1) и предупредительный сигнализатор (ПС), допустимые значения контролируемых параметров сравниваются с их фактическими значениями, а при выходе хотя бы одного из них из допуска ПС срабатывает, генерируя звуковой и/или оптический сигнал и тем самым информируя об этом наблюдателя.

Выводы

Введение БКСЧ обеспечивает получение информации на борту ЛА о нарушении штатного состояния пилота за штурвалом, что требует оперативного его отстранения от управления ЛА, с заменой дублером, а на ПУВД совокупность входной информации достаточна для однозначной оценки обстановки на борту ЛА, что допускает принятие адекватных мер по обеспечению безопасности полета или минимизации последствий нештатной ситуации на борту ЛА и в воздухе. (На рисунках связи "выход—вход", выделенные жирным, — это связи для параллельных двоичных сигналов [7].)

Численные значения параметров, характеризующих состояние ЛА и пилота, а также alarm-сигнал с выходов БОиПО через БПИ и канал связи в реальном времени поступают на ПУВД и доступны руководителю полета для принятия соответствующих решений. Но тогда, даже при значительном повреждении ОБЗТИ и ЗБЗТИ или их безвозвратной ут-

рате, полетная информация в неповрежденном виде имеется в ПУВД, а следовательно, ОБЗТИ и ЗБЗТИ на борту ЛА избыточны, необходимость в их присутствии на борту ЛА отпадает при достаточной надежности работы канала связи.

Следовательно, предлагаемая система мониторинга ЛА с учетом состояния его пилота обеспечивает получение предупредительной сигнализации как на борту ЛА, так и в ПУВД о выходе хотя бы одного контролируемого параметра за поле его допуска. Информация в регистрах Р, отображаемая индикаторами И, выражена численно, не зависит от субъективных факторов наблюдателя, генерируется в масштабе реального времени, репрезентативна и достоверна.

Достоинством предлагаемой системы мониторинга ЛА (сбора и обработки информации) является и то, что артерия фаланги пережимается только периодически, чем обеспечивается возможность длительной регистрации кривых изменения аритмии сердца, его частоты и артериального (систолического и диастолического) давления, а также возможность объективно, в реальном масштабе времени получать предупреждение о нарушении состояния как ЛА, так и управляющего им пилота, поскольку сигнал о выходе любого из контролируемых параметров за допустимые пределы может быть использован в целях предупреждения аварийных ситуаций со значительными людскими и материальными потерями.

Список литературы

1. Лившиц Г. И. Оранжевый и "черный ящик" // Наука и жизнь. 1993. № 1. С. 16—20.
2. Маршалл Р. Д., Шеферд Дж. Т. Функция сердца у здоровых и больных: Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 276 с.
3. Удельнов М. Г. Физиология сердца. М.: "Медицина", 1975. 458 с.
4. Скубилин М. Д. Устройство для анализа ритма сердца // Патент SU 1814873, А61В 5/0402. Бюлл. № 18, 15.03.1993.
5. Скубилин М. Д. Устройство для экспресс-контроля аритмии сердца человека // Патент RU 2138195, А61В 5/0404. Бюлл. № 27, 27.09.1999.
6. Скубилин М. Д., Скубилина Н. С. Устройство для измерения артериального давления // Патент RU 2159073, А61В 5/022. Бюлл. № 32, 20.11.2000.
7. Скубилин М. Д. Система сбора и регистрации полетной информации. // Патент RU 2313827, G06F 17/40, G06F 7/00. Бюлл. № 36, 27.12.2007.
8. Скубилин М. Д., Спиридонов О. Б., Письменов А. В., Головин С. Г. Система сбора и обработки полетной информации // Патент RU 70019, G06F 15/00, G05В 23/02, А61В 5/022, А61В 5/0404. Бюлл. № 1, 10.01.2008.

УДК 629.7.05

О. Н. Корсун, д-р техн. наук, проф.,
Военно-воздушная инженерная академия им. проф. Н. Е. Жуковского, Москва

Принципы параметрической идентификации математических моделей самолетов по данным летных испытаний

Рассмотрено применение решающих правил, позволяющих выявить систематические или случайные ошибки оценок точности. Предложены критерии проверки однородности результатов моделирования и летных испытаний.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

УДК 629.13

В. Н. Мазур, канд. техн. наук,
К. Т. Цатурян, д-р техн. наук, проф.,
Московский институт
электромеханики и автоматики

Методы оценки адекватности математической модели возмущенного движения самолета

Проводится математический анализ проблемы нерегулярности оценок, присущей задаче параметрической идентификации математических моделей объектов по данным натурных экспериментов. Показано, что для обеспечения достоверности результатов идентификации недостаточно использовать только наблюдения входных и выходных сигналов объекта, но необходимо привлекать дополнительную информацию из основных научных и инженерных дисциплин, относящихся к исследуемой предметной области, и применять другие специальные приемы. Для задачи оценивания параметров моделей самолетов по данным летного эксперимента формулируются основные принципы выполнения идентификации.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

УДК 629.78

Я. Г. Сапунков, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Саратовский государственный университет,
А. В. Молоденков, канд. техн. наук,
Институт проблем точной механики и управления
РАН, г. Саратов

Численное решение задачи оптимальной переориентации вращающегося космического аппарата

Рассматривается задача оптимальной пространственной переориентации космического аппарата как твердого тела произвольной динамической конфигурации, стабилизированного вращением (граничные условия по угловому положению и угловой скорости космического аппарата произвольны). В качестве критерия оптимальности используется функционал, объединяющий время разворота космического аппарата и соответствующие энергозатраты. На основании принципа максимума Л. С. Понтрягина ставится краевая задача оптимального управления и описывается оригинальная процедура ее численного решения.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

УДК 519.714

Ю. Г. Борисенко, канд. техн. наук, **Л. А. Володина**, **О. Б. Кербер**, канд. техн. наук,
Московский институт электромеханики и автоматики

Основные принципы формирования закона управления по каналам руля высоты и тяги в режиме "Уход на 2-й круг"

Изложены основные принципы формирования закона автоматического управления полетом самолета в продольной плоскости в режиме "Уход на 2-й круг", реализованного в бортовых системах современных гражданских авиалайнеров.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

УДК 629.197.2

А. И. Заведеев, канд. техн. наук, доц.,
Московский авиационный институт (ГТУ)

Исследование характеристик системы дистанционного зондирования Земли с помощью космического аппарата

Рассмотрена задача исследования процесса программного наведения с борта космического аппарата оптико-электронной аппаратуры наблюдения (АН) в заданную точку или район земной поверхности. Проанализирована зависимость результирующих погрешностей построения визирной системы координат от элементарных ошибок. Выполнена оценка вероятности захвата точечного объекта полем зрения (ПЗ) АН для отдельных видов ПЗ и различных законов распределения случайных ошибок.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

CONTENTS

Grankin B. K., Kozlov V. V., Lysenko I. V. <i>Complex Object Decomposition Principles for a Design Research</i>	2
Vedernikov Ju. V. <i>Some Approaches to Making Decisions of Choice of Complex Systems on the Base of Fuzziness Attitude of Preference</i>	6
Efanov V. N., Shevyahov E. N. <i>Coordination-Decentralized Control of Complex Technical Objects</i>	12
Makarov I. M., Lokhin V. M., Manjko S. V., Kadochnikov M. V., Sitnikov M. S. <i>Use of Genetic Algorithms for Automatic Formation of base of Knowledges of Intellectual Control System by Autonomus Mobil Robot</i>	18
Ermolov I. L. <i>Autonomy of Unmanned Systems, Its Comparison Measures and Procedures for Its'Increase</i>	23
Sharshenaliev J. Sh., Darovskih V. D. <i>The Emergent of the Multi Connected Flexible Manufacturing System (FMS)</i> .29	
Batalov S. A. <i>Synthesis of Control System by Oilextraction and Oilsaturation Control of Straum on the Early Stage of its Development</i>	36
Gibert D. P., Kovrigin L. A. <i>Control of the Oil Wells Debit with Paraffin Adjournment</i>	41
Burjan Yu. A., Sorokin V. N. <i>Control by Radiation Frequency of Hydraulic Bore-Hole Vibrator</i>	47
Skubilin M. D., Pisjmenov A. V., Spiridonov O. B. <i>Aircraft Monitoring in View of Pilot Conditions</i>	51
Korsun O. N. <i>Principles for Aircraft Parameter Identification Using Flight Tests Data</i>	55
Masur V. N., Tsaturjan K. T. <i>Methods of Check of Adequacy of Mathematical Model of the Indignant Movement of the Plane</i>	55
Sapunkov Ya. G., Molodenkov A. V. <i>The Investigation of Characteristics of Distant Sounding System of the Earth with the Help of Cosmic Device</i>	55
Borisenko Yu. G., Volodina L. A., Kerber O. B. <i>Main Principles of the Unified Law of Automatic Control in the Channel of an Elevator and the Channel of Trust on a Mode "Go-around"</i>	55
Zavedeyev A. I. <i>Invstigation of Characteristics of Distance Probe Earth System by means of Space Satellite</i>	56

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1

Телефон редакции журнала: **(495) 269-5397**, тел./факс: **(495) 269-5510**

Дизайнер *Т.Н. Погорелова*. Художник *В.Н. Погорелов*.
Технический редактор *О.А. Ефремова*. Корректор *Т.В. Арбузова*.

Сдано в набор 04.04.2008. Подписано в печать 20.05.2008. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,86. Заказ 499. 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"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15