

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 7 (124)

июль

2011

Редакционный совет:

КУЗНЕЦОВ Н. А.
МАКАРОВ И. М.
МАТВЕЕНКО А. М.
ПЕШЕХОНОВ В. Г.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
ФЕДОРОВ И. Б.

Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

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

Выпускающий редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М.
БОГАЧЕВ Ю. П.
БУКОВ В. Н.
ВИТТИХ В. А.
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.
ЛЕОНОВ Г. А.
ЛЁВИН Б. А.
ЛОХИН В. М.
НОРЕНКОВ И. П.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
ПРОХОРОВ Н. Л.
РАПОПОРТ Э. Я.
РАЧКОВ М. Ю.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФУРСОВ В. А.
ХИМЕНКО В. И.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Сергеев С. Ф.** Психологические основания проблемы искусственного интеллекта . . . 2
Кудинов Ю. И., Кудинов И. Ю. Устойчивость нечетких динамических производственных систем . . . 6
Городецкий В. И., Бухвалов О. Л. Управление нагрузкой ГРИД на основе много-агентной модели самоорганизации. Часть 2. Экспериментальные исследования и их обсуждение . . . 20

СЕТЕВЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Морозов В. В., Жданов А. В., Трефилов М. А.** Расчет вероятности ошибки технической системы с использованием аппарата сетей Петри . . . 26
Сочнев А. Н. Методы сокращения размеров сетевых моделей роботизированных технологических систем . . . 31
Вильвер П. Ю., Протасов А. В. Имитационное моделирование сложных динамических систем с использованием сетей Петри . . . 35

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

- Беленький Л. Б., Боровик С. Ю., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В.** Метод ускоренного получения информации о смещениях торцов лопаток в компрессорах и турбинах . . . 40
Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г. Исследование влияния натекания воздуха в газовый контур на мощность излучения лазерного технологического комплекса. Часть 1 . . . 46

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ОАО "ИНЭУМ им. И. С. БРУКА" В ОБЛАСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ И ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

- Прохоров Н. Л., Швеин А. А., Знайко Г. Г., Красовский В. Е.** Проблемы управления информационными процессами в проектировании и применении медицинской техники . . . 51
Егоров Г. А., Белоногов А. Д., Островский М. А., Рейзман Я. А. Реализация человеко-машинного интерфейса в интегрированной технологии проектирования автоматизированных систем контроля и управления . . . 56
Фельдман В. М. Направления развития вычислительных устройств серии Эльбрус . . . 62
Глухов В. И., Глухов А. В., Прилипко В. А. Построение систем радиационного контроля на базе УВК СМ1820М . . . 67
Contents . . . 71

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

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

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 159.9:62

С. Ф. Сергеев, д-р психол. наук, зав. лаб.
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных технологий,
механики и оптики (СПбГУ "ИТМО"),
доцент Санкт-Петербургского
государственного университета (СПбГУ),
ssfpост@mail.ru

Психологические основания проблемы искусственного интеллекта

Проведен теоретический анализ психологических оснований проблемы создания искусственного интеллекта. Показаны история возникновения и развития методологии искусственного интеллекта с точки зрения психологии. Рассматриваются перспективы постнеклассической психологии в качестве психологического базиса для создания систем искусственного интеллекта.

Ключевые слова: интеллект, искусственный интеллект, повторный вход, аутопозис, постнеклассическая психология, среда

Введение

Интеллект (естественный интеллект) в его первоначальном смысле (от лат. intellectus — познание, понимание, рассудок) как способность мышления, рационального познания, ум во всех его проявлениях — это понятие достаточно неопределенное, допускающее множественные толкования в широком диапазоне понятийных конструктов, создаваемых в различных дисциплинах человеческой деятельности, в том числе в психологии и особенно в инженерии. Можно сказать, что это самое популярное понятие в проектировочных дискурсах и объяснительных конструктах практических приложений, связанных с созданием артефактов современной технологической цивилизации.

Эластичность понятия "интеллект" чрезвычайно высока, и оно давно перешло границы общей психологии, в рамках которой зародилось. Можно говорить о психологическом феномене популярности термина "интеллект". Никто точно не знает, что это такое, но все его активно используют. Число ссылок на "интеллект" в поисковой машине Yandex только российского сектора сети Интернет составило свыше 11 млн, в системе Rambler — 18 млн, а в международном поиске системы Google нашлось более 228 млн ссылок.

Заметим, что не менее популярен и термин "искусственный интеллект" — 9 млн русскоязычных ссылок, что заметно превышает число всех других вариаций и вариантов этого термина.

Я не буду приводить подробные определения интеллекта, их слишком много, и уважаемый читатель знаком с большинством из них. Самое *простое*, данное в рамках тестологического направления исследований, его операциональное определение звучит так: "Интеллект — это то, что измеряют тесты интеллекта".

Неопределенность термина "интеллект" в психологии позволила М. А. Холодной задать вопрос: "существует ли интеллект как психическая реальность?" [1].

Предложенная ею онтологическая теория интеллекта, который определяется как форма организации ментального опыта, возвращает, как нам представляется, интеллекту статус психической реальности и означает, что исследование интеллектуальных возможностей человека разворачивается "внутри" индивидуального интеллекта. Действительной феноменологией интеллекта, с точки зрения М. А. Холодной, являются не его свойства, с высокой степенью разнообразия и вариативности обнаруживающие себя в ситуациях решения задач, а особенности структурной организации иерархии психических носителей, которые "изнутри" определяют эмпирически констатируемые проявления интеллектуальной деятельности.

По своему онтологическому статусу интеллект — это форма организации когнитивного, метакогнитивного и интенционального опыта человека. Степень сформированности этих трех форм ментального опыта определяет структурные характеристики ментального пространства интеллектуального отражения. Основное назначение интеллекта по М. А. Холодной — построение особого рода ментальных репрезентаций происходящего, связанных с воспроизводством объектного знания о мире [2].

Вышеизложенное понимание интеллекта соответствует естественной стихии человеческого познания, для которого не типичны "заданные" формы активности, предлагаемые психологами-профессионалами в условиях лабораторного исследования интеллектуальных возможностей человека.

Как это ни парадоксально, несмотря на расцвет инженерного направления "искусственный интеллект", в самой психологии увлечение интеллектом прошло достаточно давно и заменено исследованиями познавательных стилей [3] и различных частных интеллектуальных способностей [4].

Можно предположить, что наблюдаемая нами экспансия данного понятия в другие дисциплины и, прежде всего, в педагогику и инженерную деятельность связана с тем, что оно в известной мере заменяет термин "эффективность". Эффективная система в технике — это "умная", наделенная интеллектом система, в силу своего искусственного происхождения обладающая "искусственным интеллектом". Эталон эффективности в педагогике — человек интеллектуальный и в силу этого легко обучающийся. Второй причиной экспансии может являться маркетинговый ход, позволяющий развивать междисциплинарные исследования сложных технических систем. В пользу второго аргумента говорит то, что первые исследователи искусственного интеллекта не имели ничего общего с психологией, а являлись системными аналитиками и высококвалифицированными инженерами.

Психологические истоки проблемы

Психологические корни проблемы искусственного интеллекта связаны не со стремлением человека понять себя, определить "границы своего ума", хотя и это имеет место, а вызваны более прозаичным желанием возложить свои проблемы на искусственного помощника, демонстрирующего разумное поведение и, в силу этого, полезное в сложных видах деятельности. Это запрос психологии здравого смысла, психологии обыденного сознания.

Философский базис проблемы основан на представлениях Рене Декарта, который ввел метафору "механический человек", отражающую наши способности. Готфрид Вильгельм Лейбниц рассматривал возможность создания механического устройства, работающего в двоичной логике. Блез Паскаль создал первую механическую арифметическую счетную машину.

Однако технологически данные работы стали возможны лишь после второй мировой войны в связи с развитием кибернетики. Как всегда экономическим катализатором работ стал заказ со стороны военных, для которых было важно направить ракету "точно в цель", обманув противника. Работы осуществлялись под эгидой исследовательских университетов США. В них участвовали представители широкой междисциплинарной группы, включавшей специалистов из разных областей знаний: инженер Норберт Винер, биологи Росс Эшби и Вальтер Питтс, экспериментальные психологи Саймон, Нойман и Моргенштерн, логик и философ Алан Тьюринг, лингвист Ноам Хомский. Многие решения, рожденные в рамках программы "искусственный интеллект", в дальнейшем использовались в психологии.

Психология — это прекрасный ресурс идей для создателей любых видов техники, реализующей сложное поведение. Среди практических задач, поставленных и решаемых в рамках проблемы искусственного интеллекта, наряду с тривиальными

задачами ориентации в пространстве и управления техническими системами значатся и оцифровка человеческого мозга, и обеспечение бесконечной жизни человеческого "Я", включенного в виртуальные киберпространства, и безграничное развитие человеческой личности. Это шаг к новой форме жизни, не зависящей от среды обитания, возможности информационно-энергетической цивилизации. Конечно, следует отметить, что большая часть вышеперечисленного слабо связана с наукой и является некоторой идеологией проектирования, основанной на здравом смысле.

Безграничная вера в науку и технологию, заложенная в методологию искусственного интеллекта, привели ее к крайним формам философского дискурса — *сциентизму* и *технократизму*. Именно данная философия, внедряемая в инженерное, технократическое сознание, является в настоящее время тормозом для решения проблемы искусственного интеллекта.

Проблема измерения искусственного и естественного интеллекта

Наша попытка протестировать современную компьютерную систему с помощью шкалы интеллекта взрослых Векслера (*Wechsler Adult Intelligence Scale, WAIS*), традиционного теста на интеллект, покажет высокие значения показателей в ряде субтестов, и в целом эта система может получить очень высокую оценку. Например, субтест теста Векслера на повторение цифровых рядов дает машине максимальную оценку за воспроизведение цифрового ряда как в прямом, так и обратном порядке. Согласитесь, что эта задача, представляющая значительные трудности для человека, решается машиной элементарно. Из этого следует, что данные тесты не валидны по отношению к реальности искусственного интеллекта. Простой перенос методик из области экспериментальной психологии в инженерную деятельность некорректен. Существует большое разнообразие взглядов на проблему оценки искусственного интеллекта, но методик измерения практически нет. Можно сделать вывод, что методы измерения естественного интеллекта не применимы к измерению искусственного интеллекта в силу их качественного различия.

Технические и научные иллюзии и мифы о разумном поведении искусственных систем

Отметим основные иллюзии и мифы, связанные с искусственным интеллектом.

1. *Возможность оценки разумности машины.* Разумное поведение машины не есть ее сознательная деятельность, а скорее, это интерпретация, данная наблюдателем, использующим внутренние критерии разумности, полученные из социальных взаимодействий и ментального опыта.

2. *Возможность оцифровки человеческого мозга и создание копии искусственного сознания.* Идея уто-

пична, так как мозг — не кибернетическая система. В нем нет входов и выходов, позволяющих описать состояние всех его элементов. Сложность мозга вызывает в макром мире явление, известное из квантовой физики как принцип неопределенности Гейзенберга, запрещающее одновременно оценить импульс и координаты частицы в том или ином месте. Это явление можно назвать неопределенностью измерения состояния сложных систем. Система динамически изменяет свое состояние, и в каждый момент измерения она другая, что не позволяет оценить состояние ее элементов, оцифровать ее.

3. Идея о *возможности преобразования на научной основе физической и психической природы человека во внебиологическую форму*. Это крайний вариант сциентизма [5].

Психология и искусственный интеллект

Разработка проблемы искусственного интеллекта связана с результатами исследования естественного интеллекта, который не ограничивается когнитивными функциями и представляет сознательную деятельность в целом [6]. В условиях трансформации технологической цивилизации весьма плодотворным является взаимодействие наук с другими познавательными традициями. Особенно значимо такое взаимодействие для наук о человеке, представители которых с легкой завистью наблюдают за технологическими "успехами" естественных наук. Хотя приходится признать, что в сложном мире классическая научная рациональность, положенная в основание точных наук, малоэффективна. Стирается граница между научным и ненаучным типами мышления и познания. Поиски выхода из складывающегося тупика заставляют обратиться к гуманитарным областям знания, и особые надежды возлагаются на психологию.

Психологию как теоретическую дисциплину мало интересовали проблемы создания искусственного интеллекта. Она была занята проблемами естественного интеллекта и возвратилась к тематике искусственного интеллекта совсем недавно с появлением сложных технических сред и компьютерных технологий, оказывающих влияние на все стороны жизни человека.

Мы наблюдаем интенсивное развитие инженерной психологии и эргономики в форме юзабилити, проектирования интерфейсов и виртуальных миров, решающих задачи включения человека в сложные технические системы, организующих интерфейс между человеком и технической средой. Однако это приложения классической психологии практической деятельности, имеющей дело с алгоритмическими и индуктивными системами, частными инженерными решениями. Там, где речь идет о реализации в искусственных системах психологии человека разумного, его высших достижений и процессов творчества, дело обстоит гораздо хуже. В качестве примера можно привести лишь

шахматы, где компьютер смог выиграть у чемпиона мира.

Психология относится к наукам, дающим начало идеям для всех практических дисциплин, и, вместе с тем, это наука, транслирующая новые методологические схемы и понятия, рождающиеся в философских дискурсах. Эта методологическая роль психологии как *средства трансляции научной методологии* особенно сильно проявилась в последнее время в связи с кризисом исследований в области искусственного интеллекта, построенных на действующей методологии наивного материализма и его вариантов.

Постнеклассическая психология как источник новых идей в искусственном интеллекте

Классическая психология использует, в основном, наивно материалистические представления, рефлексирова и повторяя в своих построениях, в основном, схему субъект-объектных отношений. Это, в сущности, научное продолжение материалистической натурфилософии со всеми ее находками, достижениями, проблемами и заблуждениями. Существующие при этом объяснительные схемы связаны с понятиями *структуры* и *функции*, что приводит к структуралистическим построениям и взглядам, в которых именно сложность структуры определяет сложность поведения системы. Отсюда поиски оптимальной структуры, реализованной на тех или иных носителях (биологических, физических, механических), реализующей психическое поведение, которое при этом представлено в виде особого рода информационного процесса, происходящего в материальной системе. Несмотря на безусловную полезность данных взглядов в частных практических приложениях психологии, необходимо отметить, что в них используется представление о *сквозном информационном процессе*, что выводит за рамки рассмотрения механизмы, поддерживающие и организующие психическую реальность, придающие ей качественную определенность.

В последнее время в психологии развивается ряд идей, позволяющих сделать следующий шаг к изучению естественного интеллекта. Это идеи циклической самоорганизации психической деятельности, взаимоориентации вместо взаимодействия, замкнутости систем в зоне описаний, повторного входа и т. д. Несмотря на то, что данные идеи, в основном, связывают с достаточно критикуемыми философскими традициями радикального конструктивизма, все же необходимо отметить их самостоятельный общеметодологический характер в психологии.

Применение теории аутопоэтических систем [7] достаточно эвристично и продуктивно для объяснения механизмов работы человеческого сознания. Сознание при этом реализует функции замкнутой самоорганизующейся системы, находящейся в процессе непрерывной ориентации в содержании, по-

ступающем от перцептивных систем организма и структур опыта человека. Использование синергических представлений эффективно для междисциплинарного синтеза различных сторон проблемы искусственного интеллекта [8].

При описании сложных разнокачественных отношений, связанных с психической деятельностью человека и техническими системами с искусственным интеллектом, на наш взгляд, целесообразно использование понятия "среда" вместо понятия "система" [9].

Среда — это достаточно широкое понятие, позволяющее с разной степенью обобщения описать многие процессы, отражающие то или иное сложное явление, в том числе и психическую реальность. Отметим, что понятие среды достаточно естественно для специалистов многих наук и сфер практики. Это ведет к созданию общих описаний, полезных в задачах междисциплинарного синтеза.

В нейробиологическом аспекте в рамках эпистемологических моделей конструктивизма под средой понимается более сложная структура, связанная с классами взаимодействий, в которые может вступать организм. Среда рассматривается как с позиций наблюдателя, который созерцает одновременно организм и окружающую среду, так и с точки зрения наблюдаемого. Это разные виды сред. Одна из них принадлежит когнитивной области субъекта и определяет всю область его взаимодействий, формирует нишу актуальной деятельности. Вторая принадлежит наблюдателю, считающему, что он наблюдает среду, в которой действует наблюдаемый. Подчеркнем, что наблюдаемая среда не тождественна среде, в которой развивается жизнедеятельность объекта наблюдения. Она определена произвольным выбором наблюдателя и субъективна по своей природе. Описание среды всегда осуществляется в терминах наблюдателя и принадлежит исключительно его когнитивной области. Ниша и окружающая среда пересекаются лишь в той мере, в какой организации наблюдателя и организма поддаются сравнению. Возникающий релятивизм пронизывает все описания, связанные с живыми системами.

В работах финского ученого Тимо Ярвилехто (*T. Järvillehto*), в его теории системы "окружающая среда—организм" излагается идея относительно функционального единства организма и его окружающей среды. "В любом функциональном организме чувства и окружающая среда являются неотделимыми и формируют только одну унитарную систему", — пишет Ярвилехто, — "окружающая среда — не пассивное окружение организма, но активная часть системы, ведущая к результативному поведению. Субъект и объект неотделимы и представляют собой только точки зрения в организации системы "организм—окружающая среда" [10].

В экологической концепции Дж. Гибсона в противоположность физическому миру вводится понятие "экологического мира", понимаемого как часть

мира, которая может реально восприниматься субъектом. Экологический мир иерархически организован, все его мелкие элементы "встроены" в более крупные иерархии. Мир предоставляет субъекту возможности. Субъект и "экологический мир" взаимодополнительны и неразрывно связаны друг с другом. Мир, в котором реально действует субъект, зависит от характеристик самого субъекта. Интересна мысль Гибсона о том, что "восприятие окружающего мира основано на выделении инвариантов из потока, извлечении, а не в получении и обработке информации об окружающем мире" [11]. Сама физическая реальность вне селекции и организации, осуществляемых сознанием, не столь организована, как субъективная реальность, и является средой, которая может индуцировать в сознании человека широкий класс структур, в разной мере несущих приспособительный характер для субъекта. Жизнь — создание причин для обеспечивающих ее следствий.

Идея повторного входа (*Re-Entry*) — продуктивная идея, идущая от работ Хайнца фон Фёрстера (*Heinz von Foerster*) и его ученика Умберто Матураны, была развита в трудах Джеральда Эдельмана (*G. M. Edelman*), а созданная на ее основе биологическая теория сознания получила достаточно широкую известность [12]. По мнению Эдельмана, в основе возникновения субъективных феноменов лежит один и тот же механизм повторного входа возбуждения в те же нейронные группы после дополнительной обработки информации в других группах или поступления сигналов из внешней среды. Имеются подтверждения работоспособности данной идеи в нейрофизиологии в исследованиях А. М. Иванниченко [13] и в социологии (Н. Луман) [14].

Интересная мысль для инженеров — использование одной и той же структуры в разделенном времени для решения разных задач.

Нерешенные проблемы искусственного разума как нерешенные проблемы психологии

1. Проблема связи и взаимоотношений между интеллектом и социальной коммуникацией.
2. Как сложные системы развивают сами себя, переходя на более высокий функциональный уровень организации.
3. Проблема интерактивности вместо действия, взаимодействия и деятельности. "Деятельностный подход нужно дополнить подходом коммуникативным; подходом, который бы учитывал "синергически-диалоговую", личностную, нелинейную и "кольцевую" природу междисциплинарного взаимодействия" [8].
4. Проблема "Я" — реализация искусственного субъекта, действующего в системе с искусственным интеллектом.
5. Проблема "Мы" — вопросы социальных взаимодействий систем с искусственным интеллектом и сетевыми коммуникациями [15].

Выводы

1. Психологические и философские взгляды исследователей искусственного интеллекта являются источником проблем и новых решений в данной области человеческой деятельности.

2. Для дальнейшего развития работ в сфере искусственного интеллекта необходим переход от категорий классической философии и психологии к постнеклассическим представлениям.

Список литературы

1. Холодная М. А. Психология интеллекта: парадоксы исследования. Томск: Изд-во Том. ун-та. Москва: Барс, 1997.
2. Холодная М. А. Когнитивные стили. О природе индивидуального ума. Учеб. пособ. М.: ПЕР СЭ, 2002.
3. Шкуратова И. П. Когнитивный стиль и общение. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. пед. ун-та, 1994.
4. Теплов Б. М. Избранные труды: В 2-х т. Т. II. М.: Педагогика, 1985.
5. Лекторский В. А. Научное и вненаучное мышление: скользящая граница. Разум и экзистенция: Анализ научных и вненаучных форм мышления. СПб.: РХГИ, 1999.

6. Дубровский Д. И. Сознание, мозг, искусственный интеллект. М.: ИД "Стратегия-Центр", 2007.
7. Матурана У. Биология познания // Язык и интеллект / Пер с англ. и нем. / Сост. и вступ. ст. В. В. Петрова. М.: Издательская группа Прогресс, 1995. С. 95—142.
8. Аршинов В. И. Синергетика и методология постнеклассической науки // Философия науки. Вып. 8: Синергетика человекомерной реальности, 2002.
9. Сергеев С. Ф. Обучающие и профессиональные иммерсивные среды. М.: Народное образование, 2009.
10. Järvilehto T. The theory of the organism-environment system: III. Role of efferent influences on receptors in the formation of knowledge // Integrative Physiological and Behavioral Science. 1999. V. 34. P. 90—100.
11. Гибсон Дж. Экологический подход к зрительному восприятию. М.: Прогресс, 1988.
12. Edelman G. M. The remembered present. A biological theory of consciousness. New York: Basics Books, 1989. 346 p.
13. Иваницкий А. М. Проблема сознания и физиология мозга // Проблема сознания в философии и науке / Под ред. проф. Д. И. Дубровского. М.: "Канон+" РООИ "Реабилитация", 2009.
14. Луман Н. Социальные системы. Очерк общей теории. СПб.: Наука, 2007.
15. Войсунский А. Е. Психология и интернет. М.: Акрополь, 2010.

УДК 681.52.011

Ю. И. Кудинов, д-р техн. наук, проф.,
Липецкий государственный
технический университет,
И. Ю. Кудинов, канд. техн. наук,
ведущий программист,
АО "Промсервис-регион",
kui_kiu@lipetsk.ru

Устойчивость нечетких динамических продукционных систем

Рассматриваются нечеткие продукционные динамические модели и системы, а также методы анализа устойчивости нечетких систем управления.

Ключевые слова: нечеткие продукционные модели и системы управления, методы анализа устойчивости

Введение

Нечеткие автоматные и реляционные динамические модели в силу ряда серьезных недостатков, отмеченных в работе [1], имеют ограниченное применение.

В последние 20 лет гораздо большую известность получили три типа нечетких продукционных динамических моделей, состоящие из продукционных правил, содержащих в правых частях нечеткие множества, константы и линейные разностные уравнения и оснащенных механизмом вывода.

Подавляющее число публикаций в той или иной степени было связано с третьим типом нечетких

моделей, именуемых нечеткими динамическими *TSK* (Tagachi, Sugeno, Kang)-моделями [2]. Появление нечеткой *TSK*-модели оказало огромное влияние на последующее развитие методов моделирования и управления технологическими процессами. Поэтому при исследовании устойчивости нечетких продукционных динамических систем основное внимание будет уделено нечетким динамическим системам, содержащим нечеткие *TSK*-модели объектов и/или регуляторов.

В данной статье рассматриваются нечеткие продукционные модели и методы анализа устойчивости нечетких динамических продукционных систем и, в особенности, нечетких *TSK*-систем управления.

1. Нечеткие динамические продукционные модели

Введем понятие входного U и выходного Y универсальных множеств, определяемых диапазоном изменения соответствующих входной u и выходной y переменных. Дискретные переменные $u(t)$ и $y(t)$, заданные в моменты времени $t = 0, 1, 2, \dots, N$, имеют универсальные множества $U = \{u: u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}, t = \overline{0, N}\}$ и $Y = \{y: y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}, t = \overline{0, N}\}$. Дискретные моменты времени $t = 0, 1, 2, \dots, N$ — это коэффициенты временного ряда $0, 1\Delta, 2\Delta, \dots, N\Delta$, в котором Δ — интервал квантования. Такие широко известные понятия для входной u и выходной y переменных, как нечеткое подмножество, нечеткое отношение, нечеткая и лингвистическая переменные, а также нечеткое отношение определены в работах [2, 3].

Рассмотрим нечеткие продукционные правила, в правых частях которых находятся нечеткие множества[4]:

$$R^\theta: \text{если } u(t) \text{ есть } U_1^\theta \text{ есть } y(t) \text{ есть } Y_1^\theta, \\ \text{то } y(t+1) \text{ есть } Y^\theta \quad (1.1)$$

и функциональные зависимости:

$$R^\theta: \text{если } u(t) \text{ есть } U_1^\theta \text{ есть } y(t) \text{ есть } Y_1^\theta, \\ \text{то } y(t+1) = f^\theta(y(t), u(t)), \quad (1.2)$$

где $\theta = 1, 2, \dots, q$ — номер правила, f^θ — функция переменных $y(t), u(t)$.

Продукционные правила (1.1) и (1.2) образуют нечеткие дискретные модели, которые приведем к более общему виду на базе некоторых понятий линейных разностных уравнений. Линейные разностные уравнения используются для описания динамических процессов в дискретные моменты времени $t = 0, 1, 2, \dots, N$, получаются из линейных дифференциальных уравнений и отличаются по виду разностей, заменяющих дифференциалы производных непрерывной функции [5]. В таблице приводятся примеры левой и правой разностей дискретной функции, которые заменяют дифференциалы непрерывной функции.

Пример 1.1. Дифференциальное уравнение первого порядка после замены dt на Δ

$$\frac{dy(t)}{dt} + \alpha y(t) = \beta u(t)$$

и дифференциала $dy(t)$ правой разностью $\delta y(t) = y(t+1) - y(t)$ представляет собой разностное уравнение

$$y(t+1) + ay(t) = bu(t),$$

Правая и левая разности

Непрерывная функция	Дискретная функция
Правая разность	
Первая производная $\frac{dx(t)}{dt} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{x(t+\Delta) - x(t)}{\Delta}$	Разность первого порядка $\delta x(t) = x(t+1) - x(t)$
Вторая производная $\frac{d^2x(t)}{dt^2} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\frac{dx(t+\Delta)}{dt} - \frac{dx(t)}{dt}}{\Delta}$	Разность второго порядка $\delta^2 x(t) = \delta x(t+1) - \delta x(t) = x(t+1) - 2x(t) + x(t-1)$
Левая разность	
Первая производная $\frac{dx(t)}{dt} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{x(t) - x(t-\Delta)}{\Delta}$	Разность первого порядка $\delta x(t) = x(t) - x(t-1)$
Вторая производная $\frac{d^2x(t)}{dt^2} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\frac{dx(t)}{dt} - \frac{dx(t-\Delta)}{dt}}{\Delta}$	Разность второго порядка $\delta^2 x(t) = \delta x(t) - \delta x(t-1) = x(t) - 2x(t-1) + x(t-2)$

где $a = 1 + \alpha\Delta$, $b = \beta\Delta$, а после замены $dy(t)$ левой разностью $\delta y(t) = y(t) - y(t-1)$ — разностное уравнение

$$y(t) + ay(t-1) = bu(t),$$

где $a = -1/(1 + \alpha\Delta)$, $b = \beta\Delta/(1 + \alpha\Delta)$.

Теперь запишем в общем виде нечеткие разностные уравнения порядка r, s , полученные при использовании левой

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_r y(t-r) = b_1 u(t) + \dots + b_s u(t-s+1) \quad (1.3)$$

и правой разностей

$$y(t+1) + a_1 y(t) + \dots + a_r y(t-r+1) = b_1 u(t) + b_2 u(t-1) + \dots + b_s u(t-s+1). \quad (1.4)$$

В общем виде линейное разностное уравнение (1.3) можно представить как

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{y}(t-1), \mathbf{u}(t)), \quad (1.5)$$

а линейные разностные уравнения (1.4) — как

$$\mathbf{y}(t+1) = \mathbf{F}(\mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t)), \quad (1.6)$$

где $\mathbf{y}(t-1) = (y(t-1), \dots, y(t-r))$, $\mathbf{y}(t) = (y(t), \dots, y(t-r+1))$ — векторы выходных переменных; $\mathbf{u}(t) = (u(t), \dots, u(t-s+1))$ — вектор входных переменных.

Теперь, используя продукционные правила (1.1), (1.2) и структуру (1.6), запишем в общем виде правила так называемых "качественной" и "функциональной" нечетких моделей.

"Качественная" нечеткая модель состоит из совокупности продукционных правил, имеющих в правых частях выходные нечеткие множества [6]

$$R^1: \text{если } u(t) \text{ есть } U_1^1 \text{ и } \dots \text{ и } u(t-s+1) \text{ есть } U_s^1 \\ \text{и } y(t) \text{ есть } Y_1^1 \text{ и } \dots \text{ и } y(t-r+1) \text{ есть } Y_r^1, \\ \text{то } y(t+1) \text{ есть } Y^1;$$

$$R^2: \text{если } u(t) \text{ есть } U_1^2 \text{ и } \dots \text{ и } u(t-s+1) \text{ есть } U_s^2 \\ \text{и } y(t) \text{ есть } Y_1^2 \text{ и } \dots \text{ и } y(t-r+1) \text{ есть } Y_r^2, \\ \text{то } y(t+1) \text{ есть } Y^2;$$

...

$$R^q: \text{если } u(t) \text{ есть } U_1^q \text{ и } \dots \text{ и } u(t-s+1) \text{ есть } U_s^q \\ \text{и } y(t) \text{ есть } Y_1^q \text{ и } \dots \text{ и } y(t-r+1) \text{ есть } Y_r^q, \\ \text{то } y(t+1) \text{ есть } Y^q$$

и представленных в компактной форме, в которой "и" заменено на ":",

$$R^\theta: \text{если } u(t) \text{ есть } U_1^\theta, \dots, u(t-s+1) \text{ есть } U_s^\theta, \\ y(t) \text{ есть } Y_1^\theta, \dots, y(t-r+1) \text{ есть } Y_r^\theta, \\ \text{то } y(t+1) \text{ есть } Y^\theta, \quad (1.7)$$

где $U_l^\theta \in T_u$, $Y_k^\theta \in T_y$, $l = \overline{1, s}$, $k = \overline{1, r}$, $\theta = \overline{1, q}$.

Класс "функциональных" нечетких моделей составляют нечеткие разностные нечеткие модели с продукционными правилами, содержащими в правой части константы [7]:

$$\begin{aligned} R^\theta: \text{если } y(t) \text{ есть } Y_1^\theta, \dots, y(t-r+1) \text{ есть } Y_r^\theta, \\ u(t) \text{ есть } U_1^\theta, \dots, u(t-s+1) \text{ есть } U_s^\theta, \\ \text{то } y^\theta(t+1) = c^\theta; \end{aligned} \quad (1.8)$$

и линейные разностные уравнения [8]:

$$\begin{aligned} R^\theta: \text{если } y(t) \text{ есть } Y_1^\theta, \dots, y(t-r+1) \text{ есть } Y_r^\theta, \\ u(t) \text{ есть } U_1^\theta, \dots, u(t-s+1) \text{ есть } U_s^\theta, \\ \text{то } y^\theta(t+1) = a_0^\theta + \sum_{l=1}^r a_l^\theta y(t-l+1) + \\ + \sum_{l=1}^s b_l^\theta u(t-l+1), \theta = \overline{1, q}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Довольно часто для описания динамических характеристик объектов используются нечеткие разностные модели со структурой (1.5):

$$\begin{aligned} R^\theta: \text{если } y(t-1) \text{ есть } Y_1^\theta, \dots, y(t-r) \text{ есть } Y_r^\theta, \\ u(t) \text{ есть } U_1^\theta, \dots, u(t-s+1) \text{ есть } U_s^\theta, \\ \text{то } y^\theta(t) = a_0^\theta + \sum_{l=1}^s a_l^\theta y(t-l) + \sum_{l=1}^s b_l^\theta u(t-l+1), \\ \theta = \overline{1, q}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Приведем выражения для определения выхода нечетких моделей, состоящих из нечетких правил (1.9):

$$y(t+1) = \sum_{\theta=1}^q w^\theta y^\theta(t+1) / \sum_{\theta=1}^q w^\theta \quad (1.11)$$

со значением истинности посылки в θ -й импликации

$$w^\theta = \prod_{k=1}^r Y_k^\theta(y(t-k+1)) \prod_{l=1}^s U_l^\theta(y(t-l+1))$$

и нечетких правил (1.10):

$$y(t) = \sum_{\theta=1}^q w^\theta y^\theta(t) / \sum_{\theta=1}^q w^\theta \quad (1.12)$$

со значением истинности посылки в θ -й импликации

$$w^\theta = \prod_{k=1}^r Y_k^\theta(y(t-k)) \prod_{l=1}^s U_l^\theta(u(t-l)).$$

Обозначим $\hat{y}(t)$ выход, рассчитанный по нечеткой динамической модели (1.10), именуемой TSK-моделью и имеющей две обобщенные формы:

модель прогноза на $l \geq 0$ тактов

$$\hat{y}(t+l) = F(\mathbf{y}(t-1), \mathbf{u}(t), \xi), \quad (1.13)$$

и модель с обратной связью

$$\hat{y}(t) = F(\hat{\mathbf{y}}(t-1), \mathbf{u}(t), \xi), \quad (1.14)$$

где $\mathbf{y}(t-1) = (y(t-1), \dots, u(t-r))$, $\hat{\mathbf{y}}(t-1) = (\hat{y}(t-1), \dots, \hat{y}(t-r))$ — векторы измеренных и рассчитанных по нечеткой модели значений выхода в моменты времени $t-1, t-2, \dots, t-r$; $\xi = (\mathbf{d}, r, s)$ — обобщенный вектор, который содержит вектор параметров $\mathbf{d} = (\mathbf{d}_{u,1}, \dots, \mathbf{d}_{u,s}, \mathbf{d}_{y,1}, \dots, \mathbf{d}_{y,r})$, состоящий из векторов параметров $\mathbf{d}_{u,i}$ и $\mathbf{d}_{y,j}$ соответствующих функций принадлежности $U(u(t-i+1), \mathbf{d}_{u,i})$, $i = \overline{1, s}$ и $Y(\hat{y}(t-j+1), \mathbf{d}_{y,j})$, $j = \overline{1, r}$, и структурные элементы: число правил n и порядок r, s разностного уравнения (1.10).

Модель (1.14) — это частный случай модели прогноза (1.13) при $l=0$. Сосредоточим основное внимание на нечеткой динамической модели (1.14), имеющей обратную связь и не требующей знания выхода $y(t-1), \dots, y(t-r)$ на $t \in [1, N]$. Запишем продукционные правила нечеткой модели со структурой (1.14):

$$\begin{aligned} R^\theta: \text{если } \hat{y}(t-1) \text{ есть } Y_1^\theta, \dots, \hat{y}(t-r) \text{ есть } Y_r^\theta, \\ u(t) \text{ есть } U_1^\theta, \dots, u(t-s+1) \text{ есть } U_s^\theta, \\ \text{то } y^\theta(t) = a_0^\theta + \sum_{l=1}^r a_l^\theta \hat{y}(t-l) + \sum_{l=1}^s b_l^\theta u(t-l+1), \\ \theta = \overline{1, q}. \end{aligned} \quad (1.15)$$

В целях компактности записи введем новые обозначения вектора коэффициентов $\mathbf{c}^\theta = (c_0^\theta, c_1^\theta, \dots, c_m^\theta) = (a_0^\theta, a_1^\theta, \dots, a_r^\theta, b_1^\theta, \dots, b_s^\theta)$, входного вектора $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_m(t)) = (\hat{y}(t-1), \dots, \hat{y}(t-r), u(t), \dots, u(t-s+1))$, соответствующих нечетких множеств $X_1^\theta, \dots, X_m^\theta$, $m = s+r$, и представим правила (1.15) в виде

$$\begin{aligned} R^\theta: \text{если } x_1(t) \text{ есть } X_1^\theta, \dots, x_m(t) \text{ есть } X_m^\theta, \\ \text{то } y^\theta(t) = c_0^\theta + \mathbf{x}^T \mathbf{c}^\theta. \end{aligned} \quad (1.16)$$

В состав обобщенного вектора $\xi = (\mathbf{c}, \mathbf{d}, q, r, s)$ правил (1.15) и (1.16) входят коэффициенты линейных разностных уравнений $\mathbf{c} = [c_j^\theta], j = 0, 1, \dots, m$, параметры $\mathbf{d} = [\mathbf{d}_j^\theta], j = 1, \dots, m$, функций принадлежности $X_1^\theta(x_1(t), \mathbf{d}_1^\theta), \dots, X_m^\theta(x_m(t), \mathbf{d}_m^\theta)$, $\theta = 1, 2, \dots, q$, и структурные элементы: число правил q и порядок

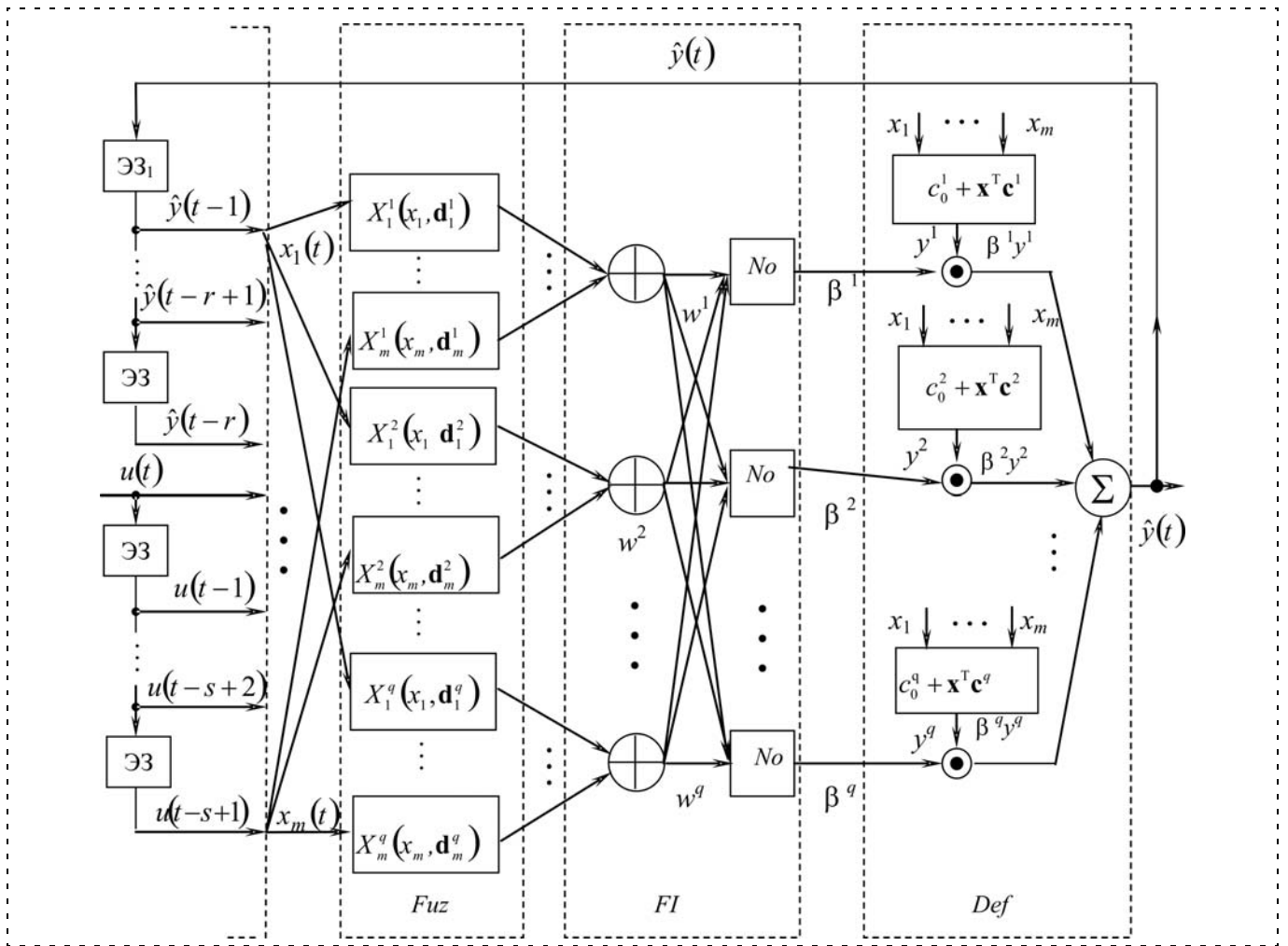


Рис. 1.1. Структура нечеткой разностной модели

разностных уравнений r, s . На рис. 1.1 показана структура нечеткой модели с обратной связью, элементами запаздывания (ЭЗ) и процедурами-блоками. В блоке фазификации *Fuz* значения переменных $x_1(t), \dots, x_m(t)$ преобразуются в матрицу [9]

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1^1(x_1, \mathbf{d}_1^1) X_2^1(x_2, \mathbf{d}_2^1) \dots X_m^1(x_m, \mathbf{d}_m^1) \\ X_1^2(x_1, \mathbf{d}_1^2) X_2^2(x_2, \mathbf{d}_2^2) \dots X_m^2(x_m, \mathbf{d}_m^2) \\ \dots \\ X_1^n(x_1, \mathbf{d}_1^n) X_2^n(x_2, \mathbf{d}_2^n) \dots X_m^n(x_m, \mathbf{d}_m^n) \end{bmatrix}$$

с элементами $X_j^\theta(x_j, \mathbf{d}_j^\theta) \in [0, 1]$ — результатами расчета соответствующих функций принадлежности при задании переменных x_j и параметров $\mathbf{d}_j^\theta$.

В блоке нечеткого вывода *FI* (*Fuzzy Inference*) вычисляется значение истинности θ -го правила

$$w^\theta = X_1^\theta(x_1, \mathbf{d}_1^\theta) \oplus X_2^\theta(x_2, \mathbf{d}_2^\theta) \oplus \dots \oplus X_m^\theta(x_m, \mathbf{d}_m^\theta),$$

а в блоках нормализации *No* — нечеткие функции $\beta^\theta = w^\theta / (w^1 + w^2 + \dots + w^q)$, $\theta = \overline{1, q}$, где $\oplus \in \{\cdot, \max, \min, \dots\}$ — операция алгебраического умножения ($\cdot$), определения максимума ($\max$) или минимума ($\min$) и др. [9, 10].

В блоке дефазификации *Def* определяется конкретное значение выхода $\hat{y}(t)$ по формуле

$$\hat{y}(t) = \sum_{\theta=1}^q \beta^\theta y^\theta(t), \quad (1.17)$$

где $y^\theta = c_0^\theta + \mathbf{x}^T \mathbf{c}^\theta$, $\theta = \overline{1, q}$ — разностное уравнение;

$\mathbf{c}^\theta = (c_1^\theta, c_2^\theta, \dots, c_m^\theta)^T$ — вектор коэффициентов.

Исходя из структурной схемы нечеткой модели следует выбрать или определить фракции принадлежности и механизм вывода, чтобы рассчитать выход $\hat{y}(t)$.

По аналогии с линейными системами большой практический и теоретический интерес имеет блочное представление нечетких систем, предложенное в работе [11]. Нечеткий блок (рис. 1.2) —

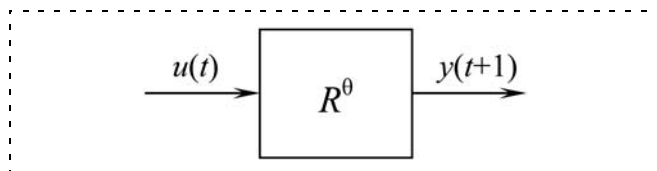


Рис. 1.2. Нечеткий блок

это динамический объект, описываемый нечеткой разностной моделью (1.9), выраженной продукционными правилами в псевдовекторной форме:

$$R^{\theta}: \text{если } \mathbf{y}(t) \text{ есть } \mathbf{Y}^{\theta}, \mathbf{u}(t) \text{ есть } \mathbf{U}^{\theta}, \text{ то } y^{\theta}(t+1) = a_0^{\theta} + \sum_{k=1}^r a_k^{\theta} y(t-k+1) + \sum_{l=1}^s b_l^{\theta} u(t-l+1), (1.18)$$

где $\mathbf{y}(t) = [y(t), y(t-1), \dots, y(t-r+1)]^T$, $\mathbf{u}(t) = [u(t), u(t-1), \dots, u(t-s+1)]^T$; $\mathbf{Y}^{\theta} = [Y_1^{\theta}, \dots, Y_r^{\theta}]$, $\mathbf{U}^{\theta} = [U_1^{\theta}, \dots, U_s^{\theta}]$; r, s — порядок разностного уравнения; $\mathbf{y}(t)$ есть $\mathbf{Y}^{\theta} = y(t)$ есть $Y_1^{\theta}, \dots, y(t-r+1)$ есть Y_r^{θ} , $\mathbf{u}(t)$ есть $\mathbf{U}^{\theta} = u(t)$ есть $U_1^{\theta}, \dots, u(t-s+1)$ есть U_s^{θ} — псевдовекторные высказывания.

Из таких блоков формируются различные соединения (параллельные и с обратной связью) и выводятся их математические модели. Начнем с параллельного соединения нечетких блоков, изображенных на рис. 1.3.

Предположим, что нечетким блокам R_1^{θ} и $R_2^{\theta'}$ соответствуют следующие продукционные правила:

$$R_1^{\theta}: \text{если } \mathbf{y}(t) \text{ есть } \mathbf{Y}_1^{\theta} \text{ и } \mathbf{u}(t) \text{ есть } \mathbf{U}_1^{\theta},$$

$$\text{то } y_1^{\theta}(t+1) =$$

$$= a_{10}^{\theta} + \sum_{k=1}^r a_{1k}^{\theta} y(t-k+1) + \sum_{l=1}^s b_{1l}^{\theta} u(t-l+1),$$

$$R_2^{\theta'}: \text{если } \mathbf{y}(t) \text{ есть } \mathbf{Y}_2^{\theta'} \text{ и } \mathbf{u}(t) \text{ есть } \mathbf{U}_2^{\theta'},$$

$$\text{то } y_2^{\theta'}(t+1) =$$

$$= a_{20}^{\theta'} + \sum_{k=1}^r a_{2k}^{\theta'} y(t-k+1) + \sum_{l=1}^s b_{2l}^{\theta'} u(t-l+1),$$

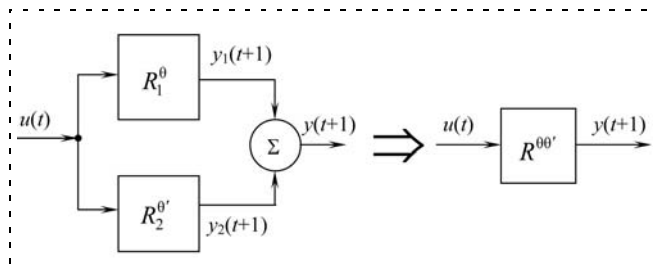


Рис. 1.3. Параллельное соединение блоков

где $\mathbf{Y}_1^{\theta} = [Y_{11}^{\theta}, Y_{12}^{\theta}, \dots, Y_{1r}^{\theta}]^T$; $\mathbf{U}_1^{\theta} = [U_{11}^{\theta}, U_{12}^{\theta}, \dots, U_{1s}^{\theta}]^T$; $\mathbf{Y}_2^{\theta'} = [Y_{21}^{\theta'}, Y_{22}^{\theta'}, \dots, Y_{2r}^{\theta'}]^T$; $\mathbf{U}_2^{\theta'} = [U_{21}^{\theta'}, U_{22}^{\theta'}, \dots, U_{2s}^{\theta'}]^T$; $\theta = \overline{1, q}$, $\theta' = \overline{1, q'}$.

Параллельное соединение блоков R_1^{θ} и $R_2^{\theta'}$ эквивалентно блоку $R_1^{\theta\theta'}$ с продукционными правилами

$$R^{\theta\theta'}: \text{если } \mathbf{y}(t) \text{ есть } (\mathbf{Y}_1^{\theta} \cap \mathbf{Y}_2^{\theta'}) \text{ и } \mathbf{u}(t) \text{ есть } (\mathbf{U}_1^{\theta} \cap \mathbf{U}_2^{\theta'}),$$

$$\text{то } y^{\theta\theta'}(t+1) = (a_{10}^{\theta} + a_{20}^{\theta'}) + \sum_{k=1}^r (a_{1k}^{\theta} + a_{2k}^{\theta'}) \times y(t-k+1) + \sum_{l=1}^s (b_{1l}^{\theta} + b_{2l}^{\theta'}) u(t-l+1), (1.19)$$

где $\mathbf{Y}_1^{\theta} \cap \mathbf{Y}_2^{\theta'} = \mathbf{Y}^{\theta\theta'} = [Y_{11}^{\theta} \cap Y_{21}^{\theta'}, \dots, Y_{1r}^{\theta} \cap Y_{2r}^{\theta'}]$; $\mathbf{U}_1^{\theta} \cap \mathbf{U}_2^{\theta'} = \mathbf{U}^{\theta\theta'} = [U_{11}^{\theta} \cap U_{21}^{\theta'}, \dots, U_{1s}^{\theta} \cap U_{2s}^{\theta'}]$, $\theta = \overline{1, q}$, $\theta' = \overline{1, q'}$; $\mathbf{y}(t)$ есть $\mathbf{Y}^{\theta\theta'} = y(t)$ есть $(Y_{11}^{\theta} \cap Y_{21}^{\theta'}), \dots, y(t-r+1)$ есть $(Y_{1r}^{\theta} \cap Y_{2r}^{\theta'})$ и $\mathbf{u}(t)$ есть $\mathbf{U}^{\theta\theta'} = u(t)$ есть $(U_{11}^{\theta} \cap U_{21}^{\theta'}), \dots, u(t-s+1)$ есть $(U_{1s}^{\theta} \cap U_{2s}^{\theta'})$, $\theta = \overline{1, q}$, $\theta' = \overline{1, q'}$ — псевдовекторные высказывания.

Пересечение нечетких множеств $Y_{1k}^{\theta} \cap Y_{2k}^{\theta'}$ соответствует, например, операции минимизации $\min_{y(t-k+1) \in Y_k} (Y_{1k}^{\theta}(y(t-k+1)), Y_{2k}^{\theta'}(y(t-k+1)))$ или операции алгебраического произведения $Y_{1k}^{\theta}(y(t-k+1)) Y_{2k}^{\theta'}(y(t-k+1)), \forall y(t-k+1) \in Y_k$, функций принадлежности $Y_{1k}^{\theta}(y(t-k+1))$ и $Y_{2k}^{\theta'}(y(t-k+1))$.

Соединение с обратной связью, приведенное на рис. 1.4 и содержащее блоки объекта

$$R_1^{\theta}: \text{если } \mathbf{y}(t) \text{ есть } \mathbf{Y}_1^{\theta}, \mathbf{u}(t) \text{ есть } \mathbf{U}_1^{\theta},$$

$$\text{то } y^{\theta}(t+1) = a_{10}^{\theta} + \sum_{k=1}^r a_{1k}^{\theta} y(t-k+1) + b^{\theta} u(t)$$

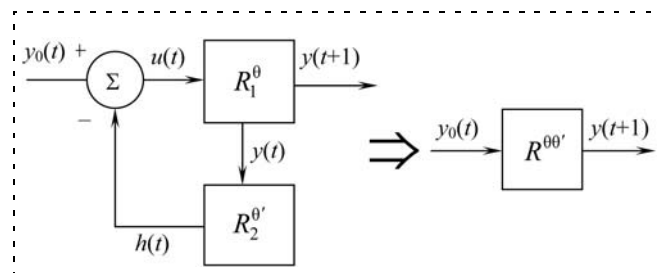


Рис. 1.4. Соединение блоков с обратной связью

и регулятора

$$R_2^{\theta'}: \text{если } y(t) \text{ есть } Y_2^{\theta'}, u(t) \text{ есть } U_2^{\theta'}, \\ \text{то } h^{\theta'}(t) = a_{20}^{\theta'} + \sum_{k=1}^r a_{2k}^{\theta'} y(t-k+1),$$

эквивалентно блоку

$$R^{\theta\theta'}: \text{если } y(t) \text{ есть } Y^{\theta\theta'}, u(t) \text{ есть } U^{\theta\theta'}, \\ \text{то } y^{\theta\theta'}(t+1) = a_{10}^{\theta} - b_1^{\theta} a_{20}^{\theta'} + b_1^{\theta} y^0(t) + \\ + \sum_{k=1}^r (a_{1k}^{\theta} - b_1^{\theta} a_{2k}^{\theta'}) y(t-k+1), \quad (1.20)$$

$$\theta = 1, 2, \dots, q, \theta' = 1, 2, \dots, q',$$

где $u(t) = [y_0(t) - h(t), y_0(t-1) - h(t-1), \dots, y_0(t-r+1) - h(t-r+1)]^T$.

Пример 1.2. Найти продукционные правила соединения с обратной связью (рис. 1.4), содержащего правила модели объекта

$$R_1^1: \text{если } y(t) \text{ есть } Y_1^1, \\ \text{то } y^1(t+1) = 2,178y(t) - 0,588y(t-1) + 0,603u(t);$$

$$R_1^2: \text{если } y(t) \text{ есть } Y_1^2, \\ \text{то } y^2(t+1) = 2,256y(t) - 0,361y(t-1) + 1,120u(t) \\ \text{и регулятора}$$

$$R_2^1: \text{если } y(t) \text{ есть } Y_2^1, \text{ то } h^1(t) = k_1^1 y(t) + k_2^1 y(t-1);$$

$$R_2^2: \text{если } y(t) \text{ есть } Y_2^2, \text{ то } h^2(t) = k_1^2 y(t) + k_2^2 y(t-1).$$

На схеме (рис. 1.4) реализовано соотношение $u(t) = y_0(t) - h(t)$, в котором $y_0(t)$ является заданным выходом. Теперь из выражения (1.20) можно получить нечеткие правила $R^{\theta\theta'}$, $\theta, \theta' = 1, 2$;

$$R^{11}: \text{если } y(t) \text{ есть } (Y_1^1 \cap Y_2^1), \\ \text{то } y^{11}(t+1) = (2,178 - 0,603k_1^1)y(t) - \\ - (0,588 + 0,603k_2^1)y(t-1) + 0,603y_0(t);$$

$$R^{12}: \text{если } y(t) \text{ есть } (Y_1^1 \cap Y_2^2), \\ \text{то } y^{12}(t+1) = (2,178 - 0,603k_1^2)y(t) - \\ - (0,588 - 0,603k_2^2)y(t-1) + 0,603y_0(t);$$

$$R^{21}: \text{если } y(t) \text{ есть } (Y_1^2 \cap Y_2^1), \\ \text{то } y^{21}(t+1) = (2,256 - 1,120k_1^1)y(t) - \\ - (0,361 + 1,120k_2^1)y(t-1) + 1,120y_0(t);$$

$$R^{22}: \text{если } y(t) \text{ есть } (Y_1^2 \cap Y_2^2),$$

$$\text{то } y^{22}(t+1) = (2,256 - 1,120k_1^2)y(t) - \\ - (0,361 + 1,120k_2^2)y(t-1) + 1,120y_0(t)$$

и выражение для определения выходной величины

$$y(t+1) = \sum_{\theta=1}^2 \sum_{\theta'=1}^2 w^{\theta\theta'} y^{\theta\theta'}(t+1) / \left(\sum_{\theta=1}^2 \sum_{\theta'=1}^2 w^{\theta\theta'} \right),$$

где $w^{\theta\theta'}$ — величина истинности $\theta\theta'$ -го правила.

2. Устойчивость нечетких динамических продукционных систем

В настоящем разделе рассматривается использование метода Ляпунова для исследования устойчивости нечетких продукционных систем (1.7)—(1.9).

Анализ устойчивости нечетких динамических продукционных систем (1.7) и (1.8) методом Ляпунова, выполненный в работах [11, 12], не получил дальнейшего развития и применения в силу исключительной сложности и неоднозначности выбора аналитического выражения функции Ляпунова. Поэтому основное внимание будет уделено исследованию устойчивости широко известных нечетких дискретных TSK-систем [8].

Начнем с достаточно подробного рассмотрения работы [13], которая заложила фундаментальные основы анализа устойчивости синтеза нечетких дискретных TSK-систем управления методом Ляпунова. Аналитические оценки устойчивости нечеткой системы (1.9) выводятся для уравнения свободного движения при $u = 0$. Для этого ее следует привести к виду при $x(t) = y(t)$

$$R^{\theta}: \text{если } x(t) \text{ есть } X_1^{\theta}, \dots, x(t-r+1) \text{ есть } Y_r^{\theta}, \\ \text{то } x^{\theta}(t+1) = a_1^{\theta} x(t) + \dots + a_r^{\theta} x(t-r+1) \quad (2.1)$$

и записать ее нечеткую модель в пространстве состояний:

$$x(t+1) = \sum_{\theta=1}^q w^{\theta} x^{\theta}(t+1) / \sum_{\theta=1}^q w^{\theta}, \quad (2.2)$$

$$\text{где } w^{\theta} = \prod_{k=1}^r X_k^{\theta}(x(t-k+1)).$$

Введем новые обозначения переменных состояния $x_1(t), x_2(t), \dots, x_r(t)$:

$$x_1(t) = x(t);$$

$$x_2(t) = x(t-1);$$

...

$$x_r(t) = x(t-r+1)$$

и запишем линейную часть нечеткой θ -й подсистемы (2.1) в развернутой форме:

$$\begin{aligned} x^\theta(t+1) &= \\ &= a_1^\theta x_1(t) + a_2^\theta x_2(t) + \dots + a_{r-1}^\theta x_{r-1}(t) + a_r^\theta x_r(t); \\ x_2(t+1) &= x_1(t); \\ x_3(t+1) &= x_2(t); \\ &\dots \\ x_r(t+1) &= x_{r-1}(t) \end{aligned}$$

и в матричной форме

$$\mathbf{A}_\theta \mathbf{x}(t),$$

где

$$\mathbf{A}_\theta = \begin{bmatrix} a_1^\theta & a_1^\theta & \dots & a_{r-1}^\theta & a_r^\theta \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ \vdots \\ x_r(t) \end{bmatrix}.$$

Тогда нечеткую систему (2.1) можно переписать в новых обозначениях в виде

$$R^\theta: \text{если } x_1(t) \text{ есть } x_1^\theta, \dots, x_r(t) \text{ есть } X_r^\theta,$$

$$\text{то } x^\theta(t+1) = a_1^\theta x_1(t) + a_2^\theta x_2(t) + \dots + a_r^\theta x_r(t)$$

и представить аналитической зависимостью для расчета выхода:

$$x(t+1) = \sum_{\theta=1}^q w^\theta \mathbf{A}_\theta \mathbf{x}(t) / \sum_{\theta=1}^q w^\theta, \quad (2.3)$$

$$\text{где } w^\theta = \prod_{k=1}^r X_k^\theta(x_k(t)), \quad X_k^\theta(x_k(t)) = X_k^\theta(x(t-k+1)),$$

$$\theta = \overline{1, q}.$$

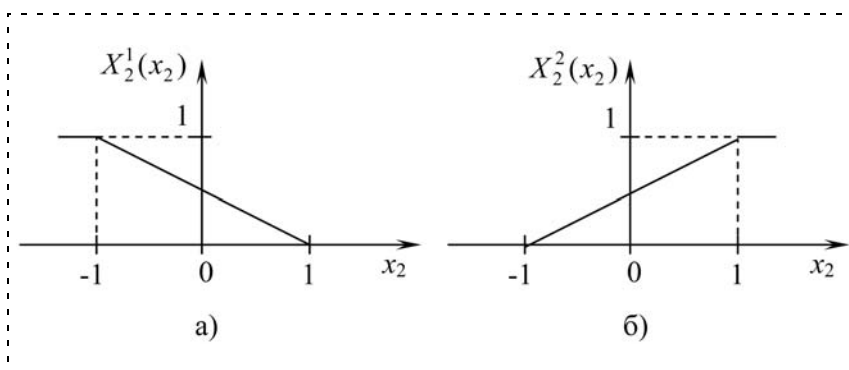


Рис. 2.1. Функции принадлежности

Предположим, что существует обобщенная квадратичная функция Ляпунова

$$V(\mathbf{x}(t)) = \mathbf{x}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{x}(t),$$

непрерывная относительно $\mathbf{x}(k)$ с положительно определенной матрицей $\mathbf{P}$ и удовлетворяющая условиям:

- а) $V(0) = 0$;
- б) $V(\mathbf{x}(t)) > 0$ для $\mathbf{x}(t) \neq 0$;
- в) $V(\mathbf{x}(t)) \rightarrow \infty$, если $\|\mathbf{x}(t)\| \rightarrow \infty$;
- г) $\Delta V(\mathbf{x}(t)) < 0$ для $\mathbf{x}(t) \neq 0$.

Тогда для равновесного состояния $\mathbf{x}(t) = 0$ на $t \in [0, N]$ в [13] доказывается следующая теорема.

Теорема 2.1. Равновесие нечеткой системы (2.3) является глобально асимптотически устойчивым, если для всех подсистем существует положительно определенная матрица $\mathbf{P}$ такая, что справедливы следующие линейные матричные неравенства (*LMI — Linear Matrix Inequalities*):

$$\mathbf{A}_\theta^T \mathbf{P} \mathbf{A}_\theta - \mathbf{P} < 0, \theta \in [1, q] \quad (2.4)$$

или существует положительно определенная матрица $\mathbf{Q}$, при которой выполняются следующие *LMI*:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{Q} & \mathbf{Q} \mathbf{A}_\theta^T \\ \mathbf{A}_\theta \mathbf{Q} & -\mathbf{Q} \end{bmatrix} < 0, \theta \in [1, q]. \quad (2.5)$$

Эквивалентность неравенств (2.4) и (2.5) была установлена в работе [14] при $\mathbf{Q} = \mathbf{P}^{-1}$.

Здесь и далее неравенства $[\mathbf{X}] > 0$ и $[\mathbf{X}] < 0$ означают, соответственно, положительную и отрицательную определенность матрицы $\mathbf{X}$.

Пример 2.1. Рассмотрим следующую нечеткую систему:

$$R^1: \text{если } x(t-1) \text{ есть } X_2^1,$$

$$\text{то } x^1(t+1) = x(t) - 0,5x(t-1);$$

$$R^2: \text{если } x(t-1) \text{ есть } X_2^2,$$

$$\text{то } x^2(t+1) = -x(t) - 0,5x(t-1),$$

которую после замены $x(t)$ на $x_1(t)$ и $x(t-1)$ на $x_2(t)$ приведем к виду

$$R^1: \text{если } x_2(t) \text{ есть } X_2^1,$$

$$\text{то } x^1(t+1) = x_1(t) - 0,5x_2(t);$$

$$R^2: \text{если } x_2(t) \text{ есть } X_2^2,$$

$$\text{то } x^2(t+1) = -x_1(t) - 0,5x_2(t).$$

Функции принадлежности $X_2^1(x_2)$

и $X_2^2(x_2)$ изображены на рис. 2.1.

Для линейных подсистем определим матрицы

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & -0,5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} -1 & -0,5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Начиная с исходного состояния $x(0) = 0,9$ и $x(1) = -0,7$, изменение выхода нечеткой динамической системы

$$\begin{aligned} x(t+1) &= \\ &= \sum_{\theta=1}^2 X_2^{\theta}(x_2) A_{\theta} x(t) / \sum_{\theta=1}^2 X^{\theta}(x) \quad (2.6) \end{aligned}$$

показывает (рис. 2.2), что она неустойчивая.

Процедура синтеза нечеткого регулятора состоит из трех шагов.

Шаг 1. Вначале формируем полную нечеткую систему путем связывания нечеткой модели объекта и нечеткого регулятора, используя продукционные правила (1.20). Пусть заданы продукционные правила нечеткой модели

$$\begin{aligned} R_1^1: & \text{если } x(t) \text{ есть } X_1^1, u(t) \text{ есть } U_1^1, \\ & \text{то } x^1(t+1) = a_1^1 x(t) + b_1^1 u(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_1^2: & \text{если } x(t) \text{ есть } X_1^2, u(t) \text{ есть } U_1^2, \\ & \text{то } x^2(t+1) = a_1^2 x(t) + b_1^2 u(t) \end{aligned}$$

и нечеткого регулятора

$$R_2^1: \text{если } x(t) \text{ есть } X_2^1, u(t) \text{ есть } U_2^1, \text{ то } u^1(t) = k^1 x(t);$$

$$R_2^2: \text{если } x(t) \text{ есть } X_2^2, u(t) \text{ есть } U_2^2, \text{ то } u^2(t) = k^2 x(t).$$

Здесь частные регуляторы R_2^1 и R_2^2 определены для подсистем R_1^1 и R_1^2 и образуют полную систему с обратной связью

$$\begin{aligned} R^{11}: & \text{если } x(t) \text{ есть } (X_1^1 \cap X_2^1), u(t) \text{ есть } (U_1^1 \cap U_2^1), \\ & \text{то } x^{11}(t+1) = (a_1^1 - b_1^1 k^1) x(t); \end{aligned}$$

$$2R^{12}: \text{если } x(t) \text{ есть } (X_1^1 \cap X_2^2),$$

$$u(t) \text{ есть } (U_1^1 \cap U_2^2),$$

$$\begin{aligned} \text{то } x^{12}(t+1) &= \\ &= (a_1^1 + a_1^2 - b_1^1 k^2 - b_1^2 k^1) x(t) / 2; \end{aligned}$$

$$R^{22}: \text{если } x(t) \text{ есть } (X_1^2 \cap X_2^2),$$

$$u(t) \text{ есть } (U_1^2 \cap U_2^2),$$

$$\text{то } x^{22}(t+1) = (a_1^2 - b_1^2 k^2) x(t).$$

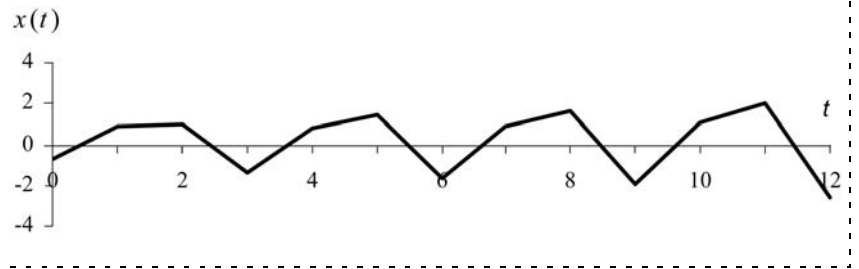


Рис. 2.2. Выход нечеткой динамической системы

Шаг 2. Далее определяем параметры k^1, k^2 нечеткого регулятора таким образом, чтобы гарантировать устойчивость подсистем в нечеткой системе.

Шаг 3. Наконец, проверяем устойчивость полной нечеткой системы с помощью процедуры нахождения общей матрицы P , как было показано выше. Если система не устойчива, возвращаемся к шагу 2. На шаге 2 можем легко найти параметры k^i в линейных подсистемах, используя теорию линейных систем.

Пример 2.2. Рассмотрим процедуру синтеза нечеткого регулятора, используя вновь нечеткую систему R_1^{θ} из примера 2.1:

$$R_1^1: \text{если } x_1(t) \text{ есть } X_1^1,$$

$$\text{то } x^1(t+1) = 2,178x_1(t) - 0,588x_2(t) + 0,603u(t);$$

$$R_1^2: \text{если } x_1(t) \text{ есть } X_1^2,$$

$$\text{то } x^2(t+1) = 2,256x_1(t) - 0,361x_2(t) + 1,120u(t)$$

с функциями принадлежности $X_1^1(x_1)$ и $X_1^2(x_1)$, изображенными на рис. 2.3.

Требуется обеспечить устойчивость нечеткой системы с линейным регулятором, имеющим коэффициент пропорциональности k и состоящим из продукционного правила

$$R_2^1: \text{если } x_1(t) \text{ есть "Любое", то } u(t) = kx_1(t),$$

где "Любое" — это нечеткое множество с функцией принадлежности, равной 1 для всех значений $x_1(t)$.

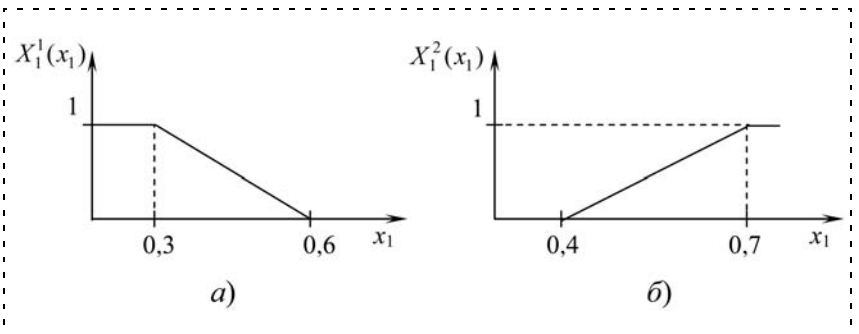


Рис. 2.3. Функции принадлежности

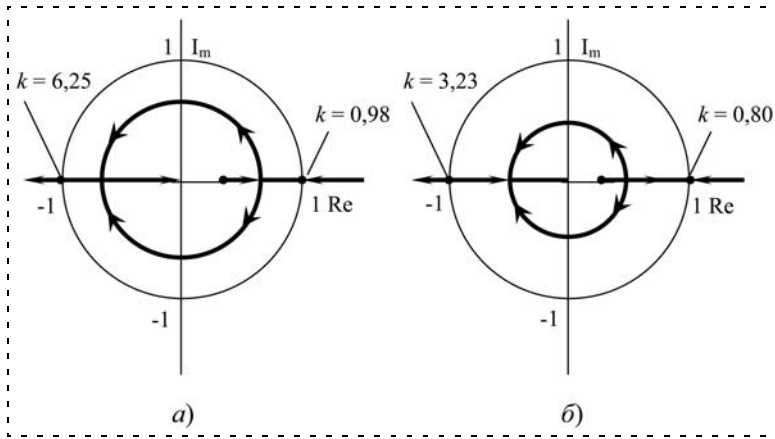


Рис. 2.4. Корневые годографы для подсистем R^1 (а) и R^2 (б)

Шаг 1. Формируем соединение с обратной связью

R^1 : если $x_1(t)$ есть X_1^1 ,

то $x^1(t+1) = (2,178 - 0,603k)x_1(t) - 0,588x_2(t)$;

R^2 : если $x_1(t)$ есть X_1^2 ,

то $x^2(t+1) = (2,256 - 1,120k)x_1(t) - 0,361x_2(t)$.

Полагаем, что заданный вход $y^0(t) = 0$.

Шаг 2. Методом корневого годографа определяем коэффициент k .

На рис. 2.4 показаны схемы корневого годографа на мнимой Im и действительной Re осях для подсистем R^1 и R^2 , где $0 \leq k \leq 8$. Известно, что границей устойчивости на z -плоскости является единичная окружность $|z| = 1$. Согласно рис. 2.4 подсистемы R^1 и R^2 являются устойчивыми, если k удовлетворяет условиям $0,98 < k < 6,25$ и $0,8 < k < 3,23$, а устойчивость нечеткой системы обеспечивается при k , изменяющемся в пределах $0,98 < k < 3,23$.

Шаг 3. Проверяем устойчивость нечеткой системы управления, используя процедуру нахождения общей матрицы P . Для линейных подсистем R^1 и R^2 найдем

$$A_1 = \begin{bmatrix} 2,178 - 0,603k & -0,588 \\ 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 2,256 - 1,120k & -0,361 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Установим $k = 1,12$, удовлетворяющий условию $0,98 < k < 3,23$. Если при заданном $k = 1,12$ выберем положительно определенную матрицу P вида

$$P = \begin{bmatrix} 2,0 & -1,3 \\ -1,3 & 1,0 \end{bmatrix},$$

удовлетворяющую условиям (2.4) для всех $\theta = 1, 2$, то получим глобально асимптотически устойчивую нечеткую систему.

Близкий подход к анализу устойчивости был развит в работе [15] для нечеткой системы в многомерном пространстве состояний

R^θ : если $x_1(t)$ есть $X_1^\theta, \dots, x_r(t)$

есть $X_r^\theta, u(t)$ есть U^θ , то

$$x_1(t+1) = a_{11}^\theta x_1(t) + a_{12}^\theta x_2(t) + \dots + a_{1r}^\theta x_r(t) + b_1^\theta u(t), \quad (2.7)$$

$$x_r(t+1) = a_{r1}^\theta x_1(t) + a_{r2}^\theta x_2(t) + \dots + a_{rr}^\theta x_r(t) + b_r^\theta u(t), \quad \theta \in [1, q],$$

которую можно записать в следующем общем виде

$$x(t+1) = F(x(t), u(t)). \quad (2.8)$$

Для достижения устойчивости предлагается методом градиентов уточнять параметры a_{jl}^θ и коэффициент усиления регулятора.

Правая часть каждого правила представлена уравнением состояния, имеющим решение

$$x(t+1) = \sum_{\theta=1}^q \beta^\theta (A_\theta x(t) + b_\theta u(t)), \quad (2.9)$$

где A_θ — матрица системы и b_θ — вектор параметров входа, равные

$$A_\theta = \begin{bmatrix} a_{11}^\theta & a_{12}^\theta & \dots & a_{1r}^\theta \\ a_{21}^\theta & a_{22}^\theta & \dots & a_{2r}^\theta \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{r1}^\theta & a_{r2}^\theta & \dots & a_{rr}^\theta \end{bmatrix}, \quad b_\theta = \begin{bmatrix} b_1^\theta \\ b_2^\theta \\ \dots \\ b_r^\theta \end{bmatrix},$$

и β^θ — нечеткая функция, равная

$$\beta^\theta = w^\theta / \left(\sum_{\theta=1}^q (X_1^\theta(x_1(t)) \oplus (X_2^\theta(x_2(t)) \oplus \dots \oplus (X_r^\theta(x_r(t)))) \right),$$

где $\oplus$ — оператор минимизации ($\wedge$) или алгебраического произведения ($\cdot$)

Прежде чем привести условия устойчивости, разделим матрицу A_θ и вектор b_θ на независимые A_0 и b_0 и зависимые δA_θ и δb_θ от θ -го правила. Тогда с учетом матрицы $A_\theta = A_0 + \delta A_\theta$ и вектора $b_\theta = b_0 + \delta b_\theta$ перепишем уравнение (2.9) как

$$x(t+1) = \sum_{\theta=1}^q \beta^\theta ((A_0 + \delta A_\theta)x(t) + (b_0 + \delta b_\theta)u(t)) = \left(A_0 + \sum_{\theta=1}^q \beta^\theta \delta A_\theta \right) x(t) + \left(b_0 + \sum_{\theta=1}^q \beta^\theta \delta b_\theta \right) u(t). \quad (2.10)$$

Пусть $\mathbf{P}$ будет решением приведенного ниже уравнения Ляпунова для положительно определенной и симметричной матрицы $\mathbf{Q}$:

$$\mathbf{A}_0^T \mathbf{P} \mathbf{A}_0 - \mathbf{P} = -\mathbf{Q} \quad (2.11)$$

и пусть

$$\mathbf{D}_\theta = (\mathbf{A}_0 + \delta \mathbf{A}_\theta)^T \mathbf{P} (\mathbf{A}_0 + \delta \mathbf{A}_\theta) - \mathbf{P}. \quad (2.12)$$

Находя выражение для $\mathbf{P}$ из (2.11) и подставляя его в (2.12), получим

$$\mathbf{D}_\theta = \delta \mathbf{A}_\theta^T \mathbf{P} \delta \mathbf{A}_\theta + \delta \mathbf{A}_\theta^T \mathbf{P} \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_0^T \mathbf{P} \delta \mathbf{A}_\theta - \mathbf{Q}. \quad (2.13)$$

Пусть $\mathbf{x} \in \text{Supp}(X^\theta)$ означает, что состояние $\mathbf{x}$ находится на носителях нечетких множеств θ -го правила $\text{Supp}(X^\theta)$, т. е. $x_i \in \text{Supp}(X_i^\theta)$, $i = \overline{1, n}$.

В работе [13] была доказана следующая теорема.

Теорема 2.2. Система (2.8) с $\mathbf{u} = 0$ устойчива, если для некоторой устойчивой матрицы $\mathbf{A}_0$ существует положительно определенная матрица $\mathbf{Q}$ такая, что для любого правила $\theta \in [1, q]$, $\mathbf{x}^T \mathbf{D}_\theta \mathbf{x} \leq 0$, $\forall \mathbf{x} \in \{\mathbf{x} \in \text{Supp}(X^\theta)\}$, где равенство имеет место, когда $\mathbf{x} = 0$.

В работе [13] показано, что все значения $\mathbf{x}^T \mathbf{D}_\theta \mathbf{x}$ могут быть меньше нуля для некоторых $\mathbf{Q}$ и не все меньше нуля для других $\mathbf{Q}$. Доказано, что существует по крайней мере один $\mathbf{Q}$, который удовлетворяет условию устойчивости системы.

Теперь коснемся сути последующих двух доказанных теорем [13].

К сожалению трудно создать обобщенный алгоритм. Поэтому попытаемся насколько возможно уменьшить максимум собственного значения $\mathbf{D}_\theta$ так, чтобы увеличилась величина $\mathbf{x}^T \mathbf{D}_\theta \mathbf{x} < 0$. Так, если после уточнения $\mathbf{Q}$ максимум собственного значения матрицы $\mathbf{D}_\theta$ становится меньше, то вероятность получения устойчивой системы увеличивается. Используя градиентный метод, можно постоянно уменьшать максимум собственного значения $\lambda_M(\mathbf{D}_\theta)$ матрицы $\mathbf{D}_\theta$. Пусть целевой функцией J_θ будет

$$J_\theta = \lambda_M(\mathbf{D}_\theta), \quad (2.14)$$

тогда J_θ является функцией $\mathbf{Q}$, где $\lambda_M(\mathbf{D}_\theta)$ — максимум собственного значения матрицы $\mathbf{D}_\theta$. Положительно определенная матрица $\mathbf{Q}$ может быть представлена в виде $\mathbf{Q} = \mathbf{L}^T \mathbf{L}$, где $\mathbf{L}$ — матрица полного ранга. Минимум критерия J_θ достигается итеративным уточнением его по $\mathbf{L}$ градиентным методом.

Теорема 2.3. Пусть J определено соотношением (2.14). Тогда

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{L}} = 2\mathbf{L}(\mathbf{W} - \mathbf{g}_M \mathbf{g}_M^T), \quad (2.15)$$

где $\mathbf{W}$ удовлетворяет условию

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_0 \mathbf{W} \mathbf{A}_0^T - \mathbf{W} = \\ = -(\mathbf{A}_0 + \delta \mathbf{A}) \mathbf{g}_M \mathbf{g}_M^T (\mathbf{A}_0 + \delta \mathbf{A})^T + \mathbf{A}_0 \mathbf{g}_M \mathbf{g}_M^T \mathbf{A}_0^T \end{aligned}$$

и $\mathbf{g}_M$ — собственный вектор, соответствующий $\lambda_M(\mathbf{D})$.

Другой алгоритм для нахождения стабилизирующего управления системой (2.10) получен на основании теорем 2.2 и 2.3. Рассмотрим линейное управление с обратной связью (2.10) при подстановке выражения линейного управления с обратной связью $\mathbf{u} = \mathbf{K}\mathbf{x}$, $\mathbf{K} = [k_1, k_2, \dots, k_n]$:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t+1) = \\ = \left(\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K} + \sum_{\theta=1}^m \alpha_\theta (\delta \mathbf{A}_\theta + \delta \mathbf{b}_\theta \mathbf{K}) \right) \mathbf{x}(t). \end{aligned} \quad (2.16)$$

После замены $\mathbf{A}_0$ и $\delta \mathbf{A}_\theta$ в теореме 2.3 с $\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K}$ и $\delta \mathbf{A}_\theta + \delta \mathbf{b}_\theta$, соответственно, можно определить устойчивость системы с обратной связью. Модель в уравнении (2.16) с управлением $\mathbf{u} = \mathbf{K}\mathbf{x}$ устойчива, если для заданного правила θ справедливо неравенство $\mathbf{x}^T \mathbf{D}_\theta^c \mathbf{x} \leq 0$ для всех $\mathbf{x} \in \{\mathbf{x} | \mathbf{x} \in \text{Supp}(\mathbf{L}_\theta)\}$, где

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_\theta^c = (\delta \mathbf{A}_\theta + \delta \mathbf{b}_\theta \mathbf{K})^T \mathbf{P} (\delta \mathbf{A}_\theta + \delta \mathbf{b}_\theta \mathbf{K}) + (\delta \mathbf{A}_\theta + \delta \mathbf{b}_\theta \mathbf{K})^T \mathbf{P} \times \\ \times (\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K}) + (\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K})^T (\delta \mathbf{A}_\theta + \delta \mathbf{b}_\theta \mathbf{K}) = -\mathbf{Q} \end{aligned} \quad (2.17)$$

и $\mathbf{P}$ — решение следующего уравнения Ляпунова:

$$(\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K})^T \mathbf{P} (\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K}) - \mathbf{P} = -\mathbf{Q}. \quad (2.18)$$

Для нахождения устойчивого управления найдем коэффициент управления $\mathbf{K}$, удовлетворяющий ограничению $\mathbf{x}^T \mathbf{D}_\theta \mathbf{x} \leq 0$. Поскольку $\mathbf{D}_\theta^c$ представляет $\mathbf{D}_\theta$ в уравнении (2.17), то можно добиться того, что $\mathbf{x}^T \mathbf{D}_\theta^c \mathbf{x} \leq 0$, если уменьшить максимум собственного значения $\mathbf{D}_\theta^c$. Теперь представим другую теорему о градиенте.

Теорема 2.4. Пусть J^c определяется как $J^c = \lambda_M(\mathbf{D}^c)$, тогда

$$\begin{aligned} \partial J^c / \partial \mathbf{K} = 2(\mathbf{b}_0^T \mathbf{P} (\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K}) \mathbf{g}_M \mathbf{g}_M^T + \\ + \mathbf{b}_0^T \mathbf{P} (\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K}) (\mathbf{W} - \mathbf{g}_M \mathbf{g}_M^T)), \end{aligned}$$

где $\mathbf{g}_M$ — собственный вектор, соответствующий максимальному собственному значению $\mathbf{D}^c$ и $\mathbf{W}$ — решение следующего уравнения Ляпунова:

$$\begin{aligned} (\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K}) \mathbf{W} (\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K})^T - \mathbf{W} = \\ = -(\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K}) \mathbf{g}_M \mathbf{g}_M^T (\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K})^T + \\ + (\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K}) \mathbf{g}_M \mathbf{g}_M^T (\mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{K})^T. \end{aligned}$$

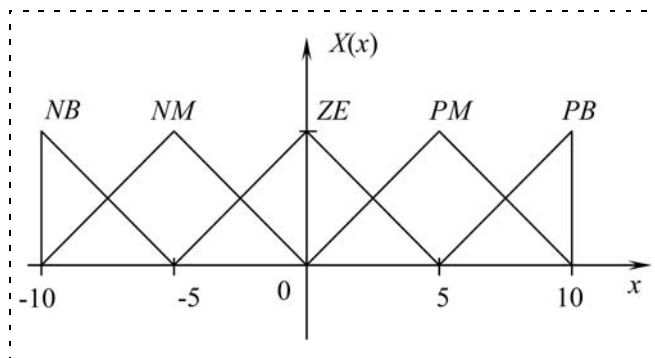


Рис. 2.5. Функции принадлежности

Пример 2.3 (для теоремы 2.2). Определим на рис. 2.5 функции принадлежности нечетких множеств NB , NM , ZO , PM , PB и систему матриц

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0,95 & -0,1 \\ 0,13 & -0,9 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} 1,1 & -0,1 \\ 0,11 & -0,6 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0,6 & -0,12 \\ 0,15 & -1,2 \end{bmatrix}.$$

Теперь рассмотрим нечеткую динамическую систему, описываемую следующими правилами:

R^1 : если x_1 есть ZE и x_2 есть ZE , то $x(t+1) = A_1 x(t)$;

R^2 : если x_1 есть NM , то $x(t+1) = A_1 x(t)$;

R^3 : если x_1 есть PM , то $x(t+1) = A_1 x(t)$;

R^4 : если x_1 есть ZE , x_2 есть NB , то $x(t+1) = A_2 x(t)$;

R^5 : если x_1 есть ZE , x_2 есть PB , то $x(t+1) = A_2 x(t)$;

R^6 : если x_1 есть NB , x_2 есть ZE , то $x(t+1) = A_3 x(t)$;

R^1 : если x_1 есть PB , x_2 есть ZE , то $x(t+1) = A_3 x(t)$.

Поскольку A_2 и A_3 — неустойчивые, не существует положительно-определенной матрицы P , которая дает отрицательно определенную матрицу $A_0^T P A_0 - P$, $\theta = 2, 3$. Следовательно, эта система не может быть устойчивой. Согласно методике из [13] модель не считается устойчивой. Используем для нее теорему 2.2. Исходная системная матрица A_1 является устойчивой. Пусть $A_0 = A_1$, тогда

$$\delta A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \delta A_2 = \begin{bmatrix} 1,15 & 0,00 \\ -0,02 & 0,30 \end{bmatrix};$$

$$\delta A_3 = \begin{bmatrix} -0,35 & -0,02 \\ 0,02 & -0,30 \end{bmatrix}.$$

Для $Q = I$ решением уравнения (2.11) будет

$$P = \begin{bmatrix} 9,15 & -0,78 \\ -0,77 & 5,01 \end{bmatrix}$$

и матрицами D_0 в теореме 2.2 являются

$$D_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}; D_2 = \begin{bmatrix} 1,79 & -0,04 \\ -0,04 & -3,21 \end{bmatrix};$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} -5,885 & -0,21 \\ -0,21 & 2,11 \end{bmatrix}.$$

После диагонализации с соответствующим собственным вектором имеем следующие границы $\Delta V(t)$ для каждого правила:

$$R^{1, 2, 3}: [-200; 0]; R^{4, 5}: [-322, 91; -32, 90];$$

$$R^{6, 7}: [-603, 82; -81, 20].$$

Пример 2.4 (для теоремы 2.3). Проанализируем систему, описываемую уравнением $\ddot{x} + a\dot{x} + kx = 0$, где a и k меняются согласно предварительно заданным правилам: R^1 ($a^1 = 2, k^1 = 6$) и R^2 ($a^2 = 1, k^2 = 3$). С периодом дискретизации $T = 0,01$ системными матрицами заключения являются

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0,9997 & 0,0099 \\ -0,0594 & 0,9799 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} 0,9998 & 0,0099 \\ -0,0298 & 0,9899 \end{bmatrix}.$$

Пусть $A_0 = 0,5(A_1 + A_2)$ и $L = I$. Собственными значениями D_1 будут $\lambda_1(D_1) = -0,6917$ и $\lambda_2(D_1) = -1,9965$, а собственными значениями D_2 будут $\lambda_1(D_2) = -1,3036$ и $\lambda_2(D_2) = 0,0119$. Используя теорему 2.2, получим градиент J при $L = I$. Частная производная равна

$$\partial J / \partial L = 2L(W - g_M g_M^T) = \begin{bmatrix} -0,2090 & -0,9925 \\ -0,9925 & 0,2328 \end{bmatrix}.$$

Для уменьшения положительного собственного значения D_2 величина L уточняется путем замены выражением $L - \partial J / \partial L$. На шестом шаге алгоритма получаем все отрицательные собственные значения D_1 и D_2 . В этой точке имеем

$$L = \begin{bmatrix} -0,9518 & 1,0753 \\ 0,9207 & -0,0035 \end{bmatrix}.$$

Собственными значениями матрицы D_1 являются $\lambda_1(D_1) = -3,8690$ и $\lambda_2(D_1) = -0,0798$, а собственными значениями матрицы D_2 являются $\lambda_1(D_2) = -1,2499$ и $\lambda_2(D_2) = -0,5955$. Поэтому система устойчива.

Пример 2.5 (для теоремы 2.4). Теперь найдем стабилизирующее управление нечеткой системой, имеющей следующие матрицы:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1,4 & 0,5 \\ 0,6 & 0,3 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} 0,3 & 0,7 \\ -0,4 & -1,4 \end{bmatrix};$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} 0,3 \\ -0,5 \end{bmatrix}; b_2 = \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,3 \end{bmatrix}.$$

Пусть $\mathbf{A}_0 = 0,5(\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2)$ и $\mathbf{b}_0 = 0,5(\mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2)$, и коэффициент управления с обратной связью $\mathbf{K}$ изменяется в пределах $\mathbf{K} \in [5, -5]$. Тогда собственные значения будут равны $\lambda_1(\mathbf{D}_1^c) = -1,2509$; $\lambda_2(\mathbf{D}_1^c) = 5,24$; $\lambda_1(\mathbf{D}_2^c) = -0,9918$; $\lambda_2(\mathbf{D}_2^c) = 16,3431$.

Частные производные положительных собственных значений матриц $\mathbf{D}_1^c$ и $\mathbf{D}_2^c$ равны

$$\partial\lambda(\mathbf{D}_1^c)/\partial\mathbf{K} = [1,828 \quad -0,1081],$$

$$\partial\lambda(\mathbf{D}_2^c)/\partial\mathbf{K} = [1,0981 \quad -4,9962].$$

Уточняя $\mathbf{K}$ путем его замены выражением $\mathbf{K} - (\partial\mathbf{D}_1^c/\partial\mathbf{K}) - \partial\mathbf{D}_2^c/\partial\mathbf{K}$, можем уменьшить собственные значения матриц $\mathbf{D}_0^c$. На шаге 4 получаем стабилизирующее управление. Коэффициентом управления является $\mathbf{K} = [1,9048 \quad 1,7832]$, собственные значения замкнутой связи равны $\lambda_1(\mathbf{D}_1^c) = -0,3592$; $\lambda_2(\mathbf{D}_1^c) = -1,6680$ и $\lambda_1(\mathbf{D}_2^c) = -1,5826$; $\lambda_2(\mathbf{D}_2^c) = -0,0199$ для $\mathbf{D}_2^c$.

Необходимо отметить следующий основной недостаток такого подхода, отмеченный в работе [16]: для большого числа существенно нелинейных систем могут отсутствовать обобщенные функции Ляпунова.

Указанный недостаток в значительной степени можно устранить, используя для анализа устойчивости кусочную квадратическую функцию Ляпунова, полученную путем разбиения пространства состояния на q областей [16, 17].

Определим q областей в пространстве переменной посылки

$$S_\theta = \{\mathbf{x} | \beta^\theta(\mathbf{x}) > \beta^i(\mathbf{x}), \theta, i \in [1, q], i \neq \theta\}.$$

Тогда глобальная модель нечеткой TSK-системы может быть выражена в каждой локальной области S_θ :

$$\mathbf{x}(t+1) = (\mathbf{A}_\theta + \delta\mathbf{A}_{\theta,\beta})\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(t) \in S_\theta,$$

где $\delta\mathbf{A}_{\theta,\beta} = \sum_{i=1, i \neq \theta}^q \beta^i \delta\mathbf{A}_\theta^i$, $\delta\mathbf{A}_\theta^i = \mathbf{A}_i - \mathbf{A}_\theta$ — приращение матриц. Здесь число областей равно числу правил или числу локальных линейных моделей.

Для анализа устойчивости введем следующие верхние границы для приращений матриц:

$$[\delta\mathbf{A}_{\theta,\beta}]^T [\delta\mathbf{A}_{\theta,\beta}] \leq \mathbf{E}_{\theta,A}^T \mathbf{E}_{\theta,A}. \quad (2.19)$$

Существует несколько способов получения верхних границ $\mathbf{E}_{\theta,A}$, с которыми детально можно ознакомиться в работе [18]. Дополнительно определим

множество Ω , которое представляет все возможные варианты перехода между областями

$$\Omega = \{\theta, j\} | \mathbf{x}(t) \in S_\theta, \mathbf{x}(t+1) \in S_j, \forall \theta, j \in [1, q], \theta \neq j\}.$$

Теперь сформулируем условия устойчивости TSK-системы на основе кусочной квадратической функции Ляпунова

$$V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{Q}_\theta \mathbf{x}, \mathbf{x} \in S_\theta, \theta \in [1, q].$$

Теорема 2.5. TSK-система является глобальной экспоненциально устойчивой:

1) если существует множество положительно-определенных матриц $\mathbf{P}_\theta$, $\theta \in [1, q]$, таких, что справедливы LMI:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_\theta^T \mathbf{Q}_\theta \mathbf{A}_\theta - \mathbf{P}_\theta + \mathbf{E}_{\theta,A}^T \mathbf{E}_{\theta,A} & \mathbf{A}_\theta^T \mathbf{Q}_\theta \\ \mathbf{Q}_\theta \mathbf{A}_\theta & -(\mathbf{I} - \mathbf{Q}_\theta) \end{bmatrix} < 0; \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_\theta^T \mathbf{Q}_j \mathbf{A}_\theta - \mathbf{Q}_\theta + \mathbf{E}_{l,A}^T \mathbf{E}_{l,A} & \mathbf{A}_\theta^T \mathbf{Q}_j \\ \mathbf{Q}_j \mathbf{A}_\theta & -(\mathbf{I} - \mathbf{Q}_j) \end{bmatrix} < 0, \quad \theta, j \in [1, q]; \quad (2.21)$$

2) если существует множество положительно-определенных матриц $\mathbf{P}_\theta$, $\theta \in [1, q]$, таких, что справедливы LMI:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P}_\theta & \mathbf{P}_\theta \mathbf{A}_\theta^T & \mathbf{P}_\theta \mathbf{E}_{\theta,A}^T \\ \mathbf{A}_\theta \mathbf{P}_\theta & -(\mathbf{P}_\theta - \mathbf{I}) & 0 \\ \mathbf{E}_{\theta,A} \mathbf{P}_\theta & 0 & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < 0; \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P}_\theta & \mathbf{P}_\theta \mathbf{A}_\theta^T & \mathbf{P}_\theta \mathbf{E}_{\theta,A}^T \\ \mathbf{A}_\theta \mathbf{P}_\theta & -(\mathbf{P}_j - \mathbf{I}) & 0 \\ \mathbf{A}_{\theta,A} \mathbf{P}_\theta & 0 & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < 0, \quad l, j \in [1, q]. \quad (2.23)$$

Условия (2.20) и (2.21), эквивалентные (2.22) и (2.23), являются LMI для переменных $\mathbf{Q}_\theta$, $\theta \in [1, q]$

или равны $\mathbf{P}_\theta = \mathbf{Q}_\theta^{-1}$, $\theta \in [1, q]$. Решение этих неравенств обеспечивает кусочная функция Ляпунова

$V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{Q}_\theta \mathbf{x}$ или $V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{P}_\theta^{-1} \mathbf{x}$. LMI в (2.22) и (2.23) гарантируют уменьшение этой функции вдоль всех траекторий системы внутри каждой области, а LMI в (2.20) и (2.21) — уменьшение функции при переходе системы из одной области в другую.

Теперь запишем предложенные в [19] условия устойчивости TSK-системы управления при использовании кусочных квадратических функций Ляпунова. Для каждого полученного после разбиения θ -го пространства переключающий регулятор определяется в виде

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_\theta \mathbf{x}(t), \quad (2.24)$$

а замкнутая нечеткая система управления может быть записана в виде

$$\mathbf{x}(t+1) = (\mathbf{A}_\theta + \delta\mathbf{A}_{\theta,\beta} + (\mathbf{B}_\theta + \delta\mathbf{B}_{\theta,\beta}\mathbf{K}_\theta))\mathbf{x}(t), \quad (2.25)$$

где верхние границы получены для $\delta\mathbf{A}_\theta$ из (2.19), а для $\delta\mathbf{B}_\theta$ путем замены в (2.19) матрицы $\delta\mathbf{A}_{\theta,\beta}$ на $\delta\mathbf{B}_{\theta,\beta}$ и матрицы $\mathbf{E}_{\theta,A}$ на $\mathbf{E}_{\theta,B}$.

Используя кусочную квадратическую функцию Ляпунова вида

$$V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{P}_\theta^{-1} \mathbf{x}, \quad (2.26)$$

приведем следующую теорему об устойчивости нечеткой системы управления.

Теорема 2.6 [19]. Замкнутая нечеткая система управления (2.25) является глобально экспоненциально устойчивой, если существует множество положительно-определенных матриц $\mathbf{P}_\theta$, $\theta \in [1, q]$, и множество матриц $\mathbf{Q}_\theta$, при которых выполняются следующие LMI:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P}_\theta & \mathbf{P}_\theta \mathbf{A}_\theta^T + \mathbf{Q}_\theta^T \mathbf{B}_\theta^T & \mathbf{P}_\theta \mathbf{E}_{\theta,A}^T & \mathbf{Q}_\theta^T \mathbf{E}_{\theta,B}^T \\ \mathbf{A}_\theta \mathbf{P}_\theta + \mathbf{B}_\theta \mathbf{Q}_\theta & -(\mathbf{P}_\theta - \mathbf{I}) & 0 & 0 \\ \mathbf{E}_{\theta,A} \mathbf{P}_\theta & 0 & -0,5\mathbf{I} & 0 \\ \mathbf{E}_{\theta,B} \mathbf{Q}_\theta & 0 & 0 & -0,5\mathbf{I} \end{bmatrix} < 0, \quad \theta \in [1, q], \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P}_\theta & \mathbf{P}_\theta \mathbf{A}_\theta^T + \mathbf{Q}_\theta^T \mathbf{B}_\theta^T & \mathbf{P}_\theta \mathbf{E}_{\theta,A}^T & \mathbf{Q}_\theta^T \mathbf{E}_{\theta,B}^T \\ \mathbf{A}_\theta \mathbf{P}_\theta + \mathbf{B}_\theta \mathbf{Q}_\theta & -(\mathbf{P}_j - \mathbf{I}) & 0 & 0 \\ \mathbf{E}_{\theta,A} \mathbf{P}_\theta & 0 & -0,5\mathbf{I} & 0 \\ \mathbf{E}_{\theta,B} \mathbf{Q}_\theta & 0 & 0 & -0,5\mathbf{I} \end{bmatrix} < 0, \quad j \in [1, q]. \quad (2.28)$$

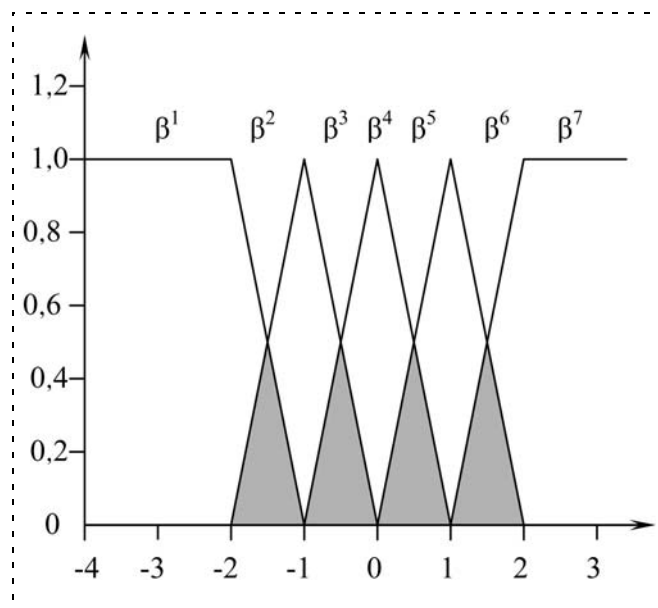


Рис. 2.6. Функции принадлежности

Коэффициент регулятора для каждой локальной области задается выражением

$$\mathbf{K}_\theta = \mathbf{Q}_\theta \mathbf{P}_\theta^{-1}, \quad \theta \in [1, q].$$

Пример 2.6. Рассмотрим дискретную нечеткую TSK-систему

R^θ : если x_1 есть X_1^θ , то $\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}_\theta \mathbf{x}(t)$, $\theta = \overline{1, 7}$,

где X_1^θ — нечеткие множества из терм-множества $T_x = (NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB)$ и соответствующие функции принадлежности, показанные на рис. 2.6.

Система матриц задается следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0,5 \\ -0,3 & 0,8 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0,485 \\ -0,275 & 0,8 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{A}_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0,475 \\ -0,25 & 0,8 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0,45 \\ -0,2 & 0,8 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{A}_5 &= \begin{bmatrix} 1 & 0,425 \\ -0,175 & 0,8 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0,4125 \\ -0,125 & 0,8 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{A}_7 &= \begin{bmatrix} 1 & 0,4 \\ -0,1 & 0,8 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Легко проверить, что не существует отрицательно определенной матрицы $\mathbf{P}$, обеспечивающей устойчивость нечеткой системы. Другими словами, для нечеткой системы отсутствует глобальная квадратическая функция Ляпунова. Моделирование нечеткой системы с кусочной функцией Ляпунова показывает (рис. 2.7), что система устойчива. Используя теорему 2.5, находим матрицы $\mathbf{P}_\theta$, $\theta = \overline{1, 7}$,

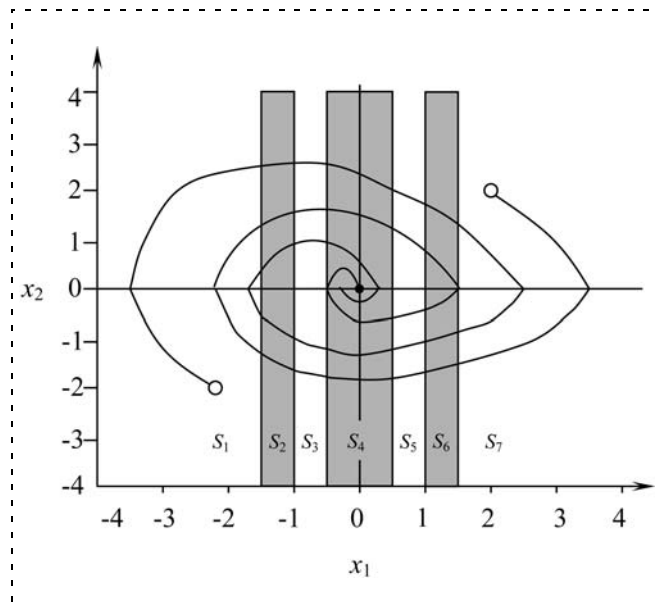


Рис. 2.7. Фазовые траектории

удовлетворяющие ограничениям (2.27) и (2.28) (исключая матрицы $E_{0,4}$):

$$\begin{aligned} P_1 &= \begin{bmatrix} 0,0189 & 0,0063 \\ 0,0063 & 0,033 \end{bmatrix}; P_2 = \begin{bmatrix} 0,0185 & 0,0066 \\ 0,0066 & 0,0333 \end{bmatrix}; \\ P_3 &= \begin{bmatrix} 0,0183 & 0,0070 \\ 0,0070 & 0,0343 \end{bmatrix}; P_4 = \begin{bmatrix} 0,0179 & 0,0078 \\ 0,0078 & 0,0356 \end{bmatrix}; \\ P_5 &= \begin{bmatrix} 0,0176 & 0,0086 \\ 0,0086 & 0,0376 \end{bmatrix}; P_6 = \begin{bmatrix} 0,0170 & 0,009 \\ 0,0090 & 0,0403 \end{bmatrix}; \\ P_7 &= \begin{bmatrix} 0,0168 & 0,0094 \\ 0,0094 & 0,0427 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

и подтверждающие экспоненциальную глобальную устойчивость дискретной нечеткой *TSK*-системы.

Заключение

В работе отражено текущее состояние исследований устойчивости нечетких динамических систем. Если эти исследования для нечетких автоматных и реляционных динамических систем завершились к концу прошлого века, то для *TSK*-систем они успешно продолжают до настоящего времени. Появились работы [20, 21], в которых анализируется глобальная устойчивость нечетких *TSK*-систем (1.16), (1.17) на базе нечеткой функции Ляпунова. Можно также привести далеко неполный и постоянно увеличивающийся перечень публикаций, связанных с применением метода Ляпунова для синтеза H^∞ -нечетких регуляторов [19], нечетких систем управления объектами с запаздыванием [22], каскадных систем [23], систем прогнозирующего управления и других.

Дальнейшее развитие и совершенствование методов анализа устойчивости приведут к созданию устойчивых и обладающих достаточно высоким качеством нечетких систем управления.

Список литературы

1. Кудинов Ю. И., Кудинов И. Ю. Устойчивость нечетких автоматных и реляционных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление, 2010. № 6. С. 27–32.
2. Sugeno M., Kang G. T. Fuzzy modeling and control of multilayer incinerator // Fuzzy Sets and Systems. 1986. V. 18. P. 329–346.

3. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
4. Кудинов Ю. И., Кудинов И. Ю., Суслова С. А. Нечеткие модели динамических процессов. М.: Научная книга, 2007. 184 с.
5. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.
6. Sugeno M., Yasukawa T. A fuzzy — logic — based approach to qualitative modeling // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 1993. V. 1. N 1. P. 7–31.
7. Mamdani E. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers // Int. J. Man-Machine Studies. 1976. V. 8. P. 669–678.
8. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics. 1985. V. SMC-15. P. 116–132.
9. Chang S. S. L., Zadeh L. A. On fuzzy mapping and control // IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics. 1972. V. SMC-2. P. 30–34.
10. Кудинов Ю. И. Нечеткие модели вывода в экспертных системах // Известия РАН. Теория и системы управления. 1997. № 5. С. 75–83.
11. Mouzouris G. C., Mendel J. M. Dynamic non-singleton fuzzy systems for nonlinear modeling // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 1997. V. 5. N 2. P. 199–208.
12. Sugeno M. On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 1999. V. 7. N 2. P. 201–224.
13. Tanaka K., Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems // Fuzzy Sets and Systems. 1992. V. 45. P. 135–156.
14. Boyd S., Ghaoui L. E., Feron E., Balakrishnan V. Linear matrix inequalities in systems and control theory. Philadelphia, PA: SIAM, 1994.
15. Kim W. C., Ann S. C., Kwon W. H. Stability analysis and stabilization of fuzzy state space models // Fuzzy Sets and Systems. 1995. V. 71. P. 131–142.
16. Feng G. Stability analysis of discrete time fuzzy dynamic systems based on piecewise Lyapunov functions // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2004. V. 12. N 1. P. 22–28.
17. Feng G. A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2006. V. 14. N 5. P. 676–697.
18. Cao S. G., Rees N. W., Feng G. Analysis and design for a class of complex control systems. Part II: Fuzzy controller design // Automatica. 1997. V. 33. P. 1029–1039.
19. Chen C. L., Feng G., Sun D., Zhu Y. H-infinity output feedback control of discrete-time fuzzy systems with application to chaos control // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2005. V. 13. N 4. P. 531–543.
20. Wang Y., Sun Z. Q., Sun Z. C. Stability analysis and control of discrete-time fuzzy systems: A fuzzy Lyapunov function approach // Proc. 5th Asian Control Conf. Melbourne, Australia. 2004. P. 1855–1860.
21. Zhou S. S., Feng G., Lam J., Xu S. Y. Robust H-infinity control for discrete fuzzy systems via basis-dependent Lyapunov functions // Inform. Sci. 2005. V. 174. N 3–4. P. 197–217.
22. Chen C. L., Feng G., Guan X. P. Delay-dependent stability analysis and controller synthesis for discrete time fuzzy systems with time delays // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2005. V. 13. N 5. P. 630–643.
23. Lendek Z., Babuska R., Shutter B. D. Stability cascaded fuzzy systems and observers // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2009. V. 17. N 3. P. 641–653.

В. И. Городецкий,
д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,
О. Л. Бухвалов, аспирант,
Санкт-Петербургский институт
информатики и автоматизации РАН,
gor@iiias.spb.su
oleg_b@iiias.spb.su

Управление нагрузкой ГРИД на основе многоагентной модели самоорганизации*

Часть 2. Экспериментальные исследования и их обсуждение

Предлагается модель и описывается разработанный программный прототип распределенного управления ресурсами ГРИД с динамической топологией на основе многоагентной модели самоорганизации, в которой реализуется управление, использующее только локальные взаимодействия агентов. В частности, описывается механизм самоорганизации, предлагается архитектура, в основе которой используется распределенная P2P FIPA-совместимая агентская платформа, средства эмуляции распределенной P2P-коммуникационной среды и другие инструментальные средства, разработанные в лаборатории интеллектуальных систем СПИИРАН. Разработанный программный прототип включает в себя также и симуляцию процессов исполнения этих заявок. Обсуждаются экспериментальные результаты, показывающие, что предложенная модель динамического управления ресурсами ГРИД позволяет в реальном времени добиться эффективного перераспределения задач между узлами ГРИД, обеспечивающего удовлетворительные результаты по такой характеристике качества сервиса, как среднее время ожидания задач в очереди на решение.

Ключевые слова: самоорганизация, мультиагентные системы, ГРИД, управление ресурсами. P2P-агентская платформа

Цель и условия эксперимента

Экспериментальные исследования разработанного программного прототипа динамического управления нагрузкой узлов ГРИД имели целью оценить способность используемого механизма самоорганизации, реализуемого с помощью многоагентной P2P-архитектуры, сохранять свою работоспособность в условиях, когда

- узлы ГРИД могут появляться в сети и уходить из нее;
- узлы ГРИД имеют различную производительность;
- агенты, установленные в узлах ГРИД, "знают" только о факте существования своих соседей по сети, но не имеют информации ни об их производительности, ни о текущих длинах очередей задач в них;

* Часть 1 статьи опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" № 3, 2011.

- агенты, установленные в узлах ГРИД, не имеют информации о вероятностных свойствах потока заявок, поступающих в узлы сети;
- агенты, установленные в узлах ГРИД, не имеют информации о трудоемкости задач, находящихся в их очереди.

Под способностью сохранять свою работоспособность понимается способность механизма самоорганизации в среднем выравнять нагрузку на узлы сети и обеспечивать сравнимое среднее время ожидания задач в очередях разных узлов сети. Это свойство может быть косвенно оценено по значениям математических ожиданий и дисперсий времени пребывания задач в очереди для различных компьютеров и на основе их сравнения со значениями этих оценок, осредненных по всему множеству узлов сети.

Заметим, что само значение среднего времени ожидания не является какой-либо характеристикой качества работы системы управления, поскольку оно, как известно из теории массового обслуживания, будет зависеть, прежде всего, от соотношения интенсивности потока заявок и их трудоемкостей, а также интенсивности потока обслуживания. Гораздо более важными являются ранее указанные характеристики выравнивания нагрузки на узлы и их динамика, особенно в тех случаях, когда вероятностные свойства потоков заявок и их трудоемкости существенно отличаются на различных узлах или сегментах ГРИД. По этой причине здесь не приводятся конкретные характеристики распределенного потока заявок, трудоемкости задач и характеристики производительности компьютеров сети.

Для экспериментов использовали модель ГРИД, полная топология которой показана на рис. 1. Она включает в себя 30 узлов. Для каждого узла задается свой поток задач.

Всего было проведено пять экспериментов, которые различались между собой установками. Во всех экспериментах (кроме одного) случайно моделировали выход узлов из сети на некоторые интервалы времени, при этом практически каждый узел хотя бы в течение одного интервала времени отсутствовал в сети. В каждом эксперименте производительность компьютеров генерировали случайно. Колебания этой величины находились в пределах от 0,5 до 1,5 по отношению к эталонному компьютеру.

Сценарий эксперимента содержит события трех типов: подача заявки на обработку, включение узла и выключение узла. Каждое событие имеет время наступления, измеряемое в миллисекундах от начала эксперимента. В момент, когда узел выключен, заявки на него не поступают. Перед выключением узла он пытается отправить все задачи из своей очереди соседям, случайным образом выбирая адресата для каждой задачи на основе равномерного распределения.

Время реальной системы и модельное время связываются через отношение длительностей циклов

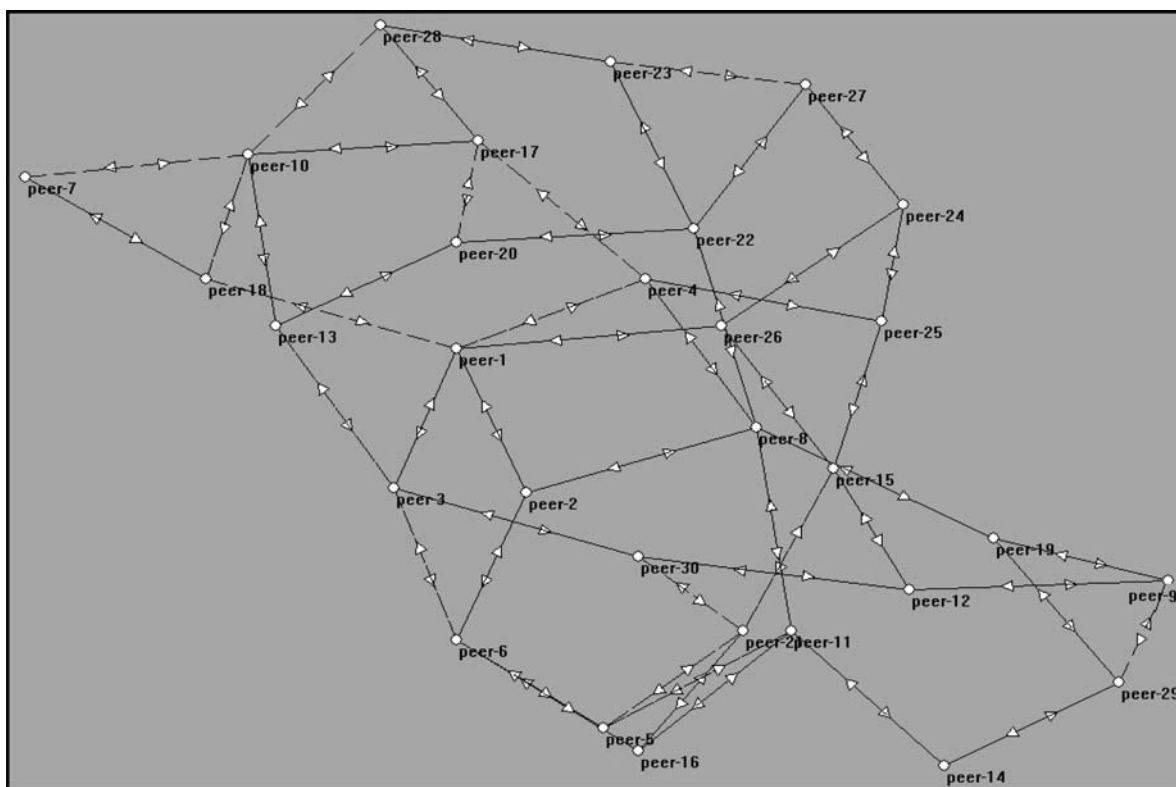


Рис. 1. Состав узлов и топология виртуальной ГРИД сети, использованная в экспериментальных исследованиях

проактивного поведения в реальной системе и в модели. Реальное системное время компьютера и модельное время отличаются на величину, равную времени начала эксперимента по системным часам. В реальной системе цикл проактивного поведения принимали равным 5 мин, а в модельном времени — 5 с, так что коэффициент масштаба равен 1 : 60.

Таким образом, один день работы реальной системы соответствует 24 мин модельного времени.

В каждом эксперименте задаются следующие параметры:

- число узлов N ;
- топология узлов;
- длительность эксперимента D (мс);
- число интервалов I , на которые разбивается все время эксперимента. На каждом из этих интервалов, для каждого узла по пуассоновскому распределению генерируется число задач, которое должно поступить на данный узел в этом интервале времени;
- длительность цикла проактивного поведения агента в реальной системе C_r ;
- длительность цикла проактивного поведения агента в прототипе C_m ;
- коэффициенты пуассоновского распределения для каждого узла λ_i (среднее значение λ_i , по всем узлам обозначено символом $M[\lambda_i]$);
- производительность каждого узла p_i , выраженная коэффициентом пропорциональности по отношению к производительности эталонного узла

(среднее значение этого отношения по всем узлам обозначено символом $M[p_i]$);

- вероятность доступности узла при старте эксперимента P_{on} ;
- число смен состояний доступности для каждого узла S_i ;
- средняя длительность обработки задачи на эталонном узле $M[t_e]$;
- коэффициенты α , β линейной функции, определяющей стратегию самоорганизации.

Параметры для генерации потока задач выбираются исходя из того, чтобы общая трудоемкость входного потока заявок не превышала общую вычислительную мощность ГРИД.

Обсуждение результатов эксперимента

Дадим краткое описание и обсуждение некоторых результатов экспериментов.

Эксперимент 1 ($\alpha = 0,5$, $\beta = 0,5$)

На рис. 2 (см. третью сторону обложки) представлена диаграмма входного потока заявок. Данные представлены с интервалом 5 с (что соответствует длительности цикла проактивного поведения). По оси Y отмечены имена узлов, по оси X — номера интервалов эксперимента, по оси Z — число заявок, поступивших на данный узел в течение соответствующего интервала времени работы системы.

Можно заметить, что узлы 11 и 13 имеют значительно большую нагрузку, чем другие узлы. На

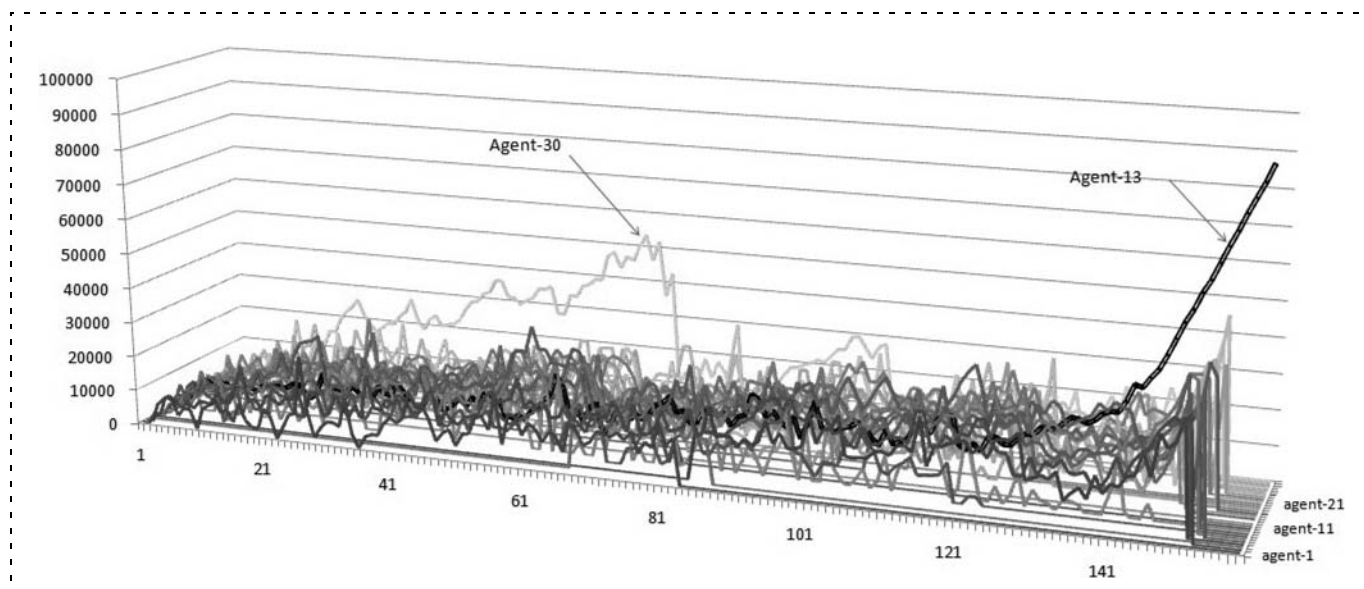


Рис. 3. Диаграмма среднего времени ожидания задач в очередях узлов. Эксперимент 1

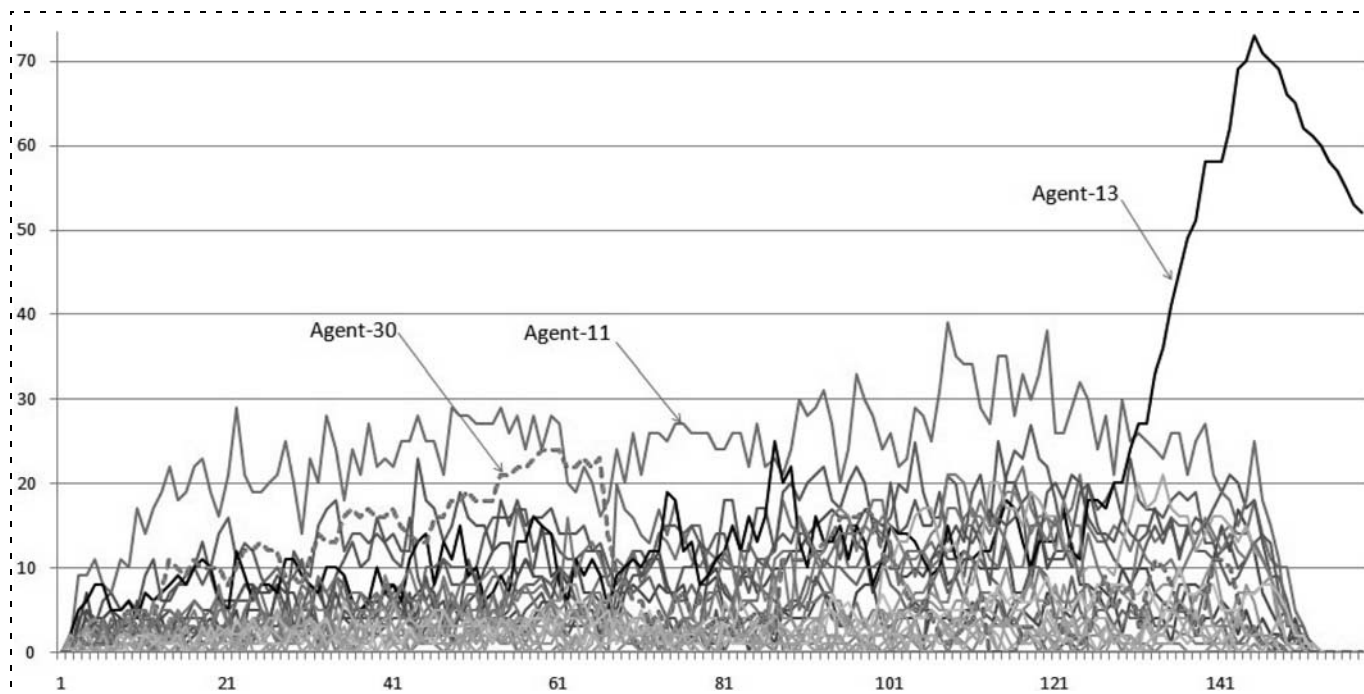


Рис. 4. Диаграмма размеров очередей узлов. Эксперимент 1

рис. 3 представлена диаграмма средних времен ожидания задач, находящихся в очередях узлов в конкретный момент времени эксперимента.

Как видно из диаграммы, средние времена ожидания задач в узлах ГРИД имеют меньший разброс, чем разбросы интенсивностей потоков входящих заявок. Пики, которые наблюдаются на графиках для узлов 13 и 20, объясняются временным выключением соседних с ними узлов. Узел 30 является промежуточным звеном между узлами 11 и 13, на которые поступает наиболее интенсивный поток заявок, и в отсутствии других путей между этими узлами время ожидания в очереди на 30-м узле возрастает примерно до 80-го интервала, когда его со-

седние узлы вошли в сеть. В районе же 140-го интервала из сети выходят все соседи узла 13, что приводит к резкому увеличению среднего времени ожидания на нем. На рис. 4 представлена диаграмма размеров очередей в узлах сети.

Эксперимент № 4 ($\alpha = 0,5$, $\beta = 0,5$)

В данном эксперименте рассматриваются параметры, схожие с предыдущим экспериментом, за исключением того, что все узлы ГРИД включены с самого начала и не выключаются. Структура входного потока заявок аналогична (но не идентична) тем, что были приняты в эксперименте (см. рис. 2 на третьей стороне обложки). Диаграмма среднего

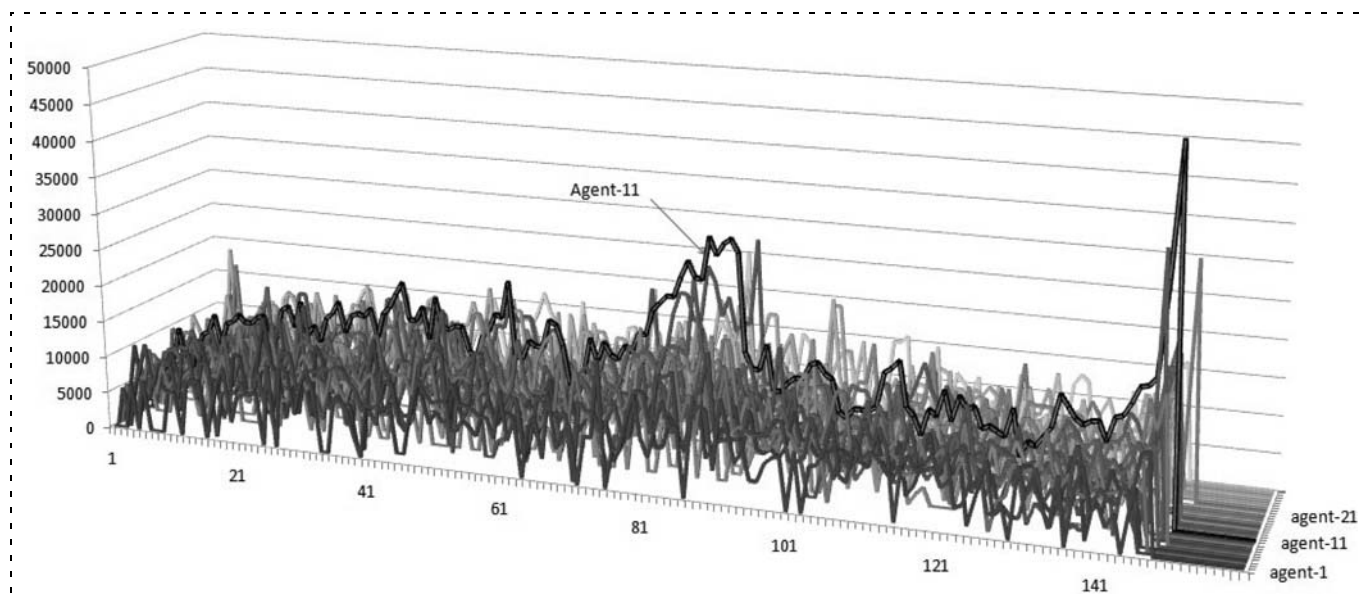


Рис. 5. Диаграмма среднего времени ожидания задач в очередях узлов. Эксперимент 4

времени ожидания задач в очередях узлов в этом эксперименте показана на рис. 5, а диаграмма размеров очередей узлов — на рис. 6 (см. третью сторону обложки). Пики на всех диаграммах в районе 80...100 интервалов соответствуют всплеску входного потока заявок.

В табл. 1 представлены характеристики ряда времен ожидания задач до начала обработки в экспериментах — среднее значение, дисперсия и максимальное значение. Эксперимент 4 подразумевал постоянную работу всех узлов.

Из табл. 1 видно, что второй эксперимент, несмотря на то, что имеет максимальное среднее время ожидания, также имеет минимальную дисперсию среди первых трех экспериментов и минимальное значение максимума времени ожидания.

Влияние параметра β требует отдельного исследования, которое предполагает использование множества различных топологий ГРИД. В рассмотренной топологии изменение параметра слабо влияет на характеристики работы алгоритма, так как число связей между соседями не достаточно велико.

Параметры α , β , средняя трудоемкость задач, топология ГРИД тесно связаны между собой, и выявление адекватных закономерностей между всеми ними требует значительно большего числа экспериментов.

В рассмотренной конфигурации заметно, что качество работы алгоритма пропорционально интенсивности обмена задачами среди узлов ГРИД.

Таблица 1

Статистические характеристики времен ожидания потока заявок

Характеристики	Номер эксперимента			
	1	2	3	4
α	0,5	0,8	0,2	0,5
β	0,5	0,5	0,5	0,5
Среднее время ожидания	19243	22937	17988	9682
Дисперсия ряда времен ожидания	$2,44 \cdot 10^8$	$1,08 \cdot 10^8$	$7,76 \cdot 10^8$	$5,98 \cdot 10^7$
Максимальное время ожидания	114252	60535	145365	81868

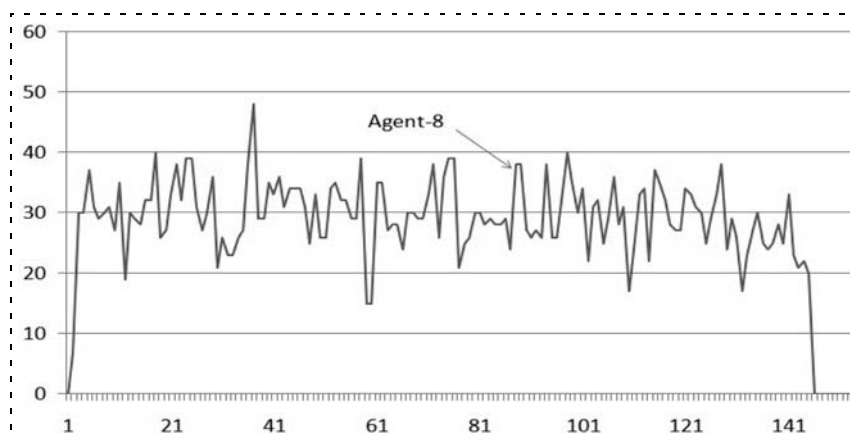


Рис. 7. Диаграмма входного потока заявок. Эксперимент 5

Эксперимент № 5 ($\alpha = 0,8$, $\beta = 0,5$)

В данном эксперименте рассматривается ситуация, когда весь поток заявок поступает на один узел. В качестве такого узла выбран узел 8, имеющий пять соседей. Диаграмма входного потока заявок в данном эксперименте представлена на рис. 7, а диаграмма для среднего времени ожидания представлена на рис. 8 (см. третью сторону обложки). В этом эксперименте все узлы ГРИД функциони-

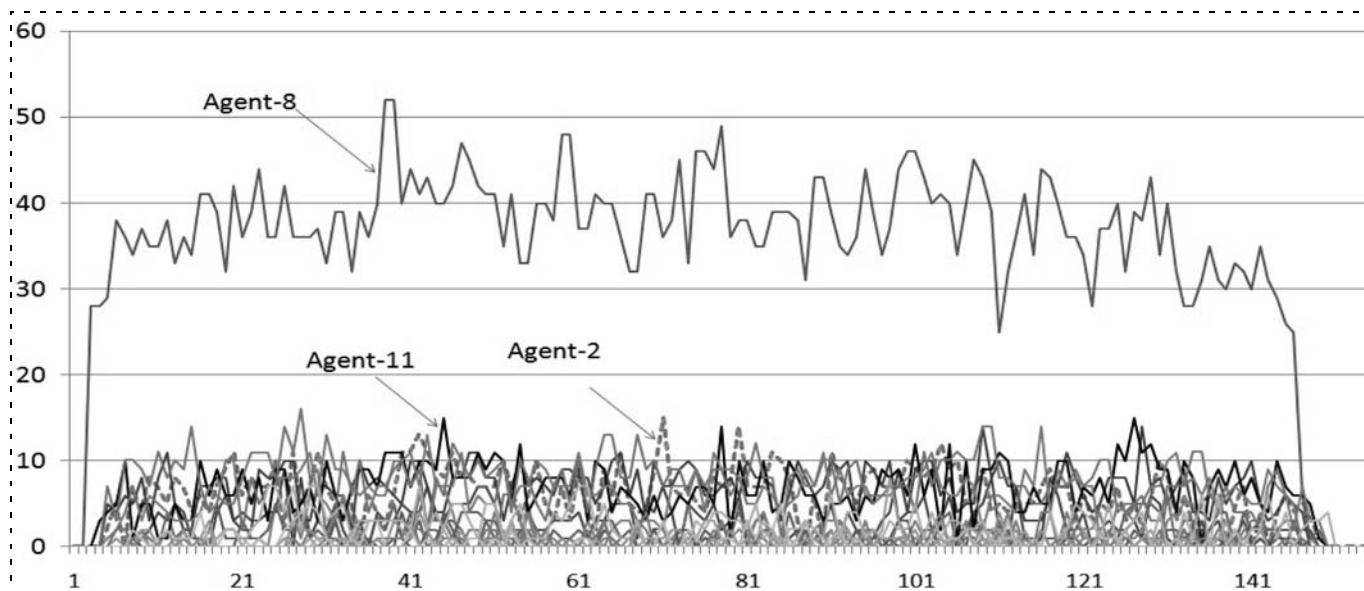


Рис. 9. Диаграмма активности исходящих сообщений. Эксперимент 5

руют все время. Из рис. 8 (см. третью сторону обложки) видно, что даже в случае, когда вся внешняя нагрузка сосредоточена в одном узле, используемый алгоритм самоорганизации позволяет добиться балансировки среднего времени ожидания задач в очередях. То же самое касается и размеров очередей узлов. Результаты, представленные в табл. 2, подтверждают этот вывод. На рис. 9 представлена диаграмма, которая характеризует загрузку каналов связи дополнительными исходящими сообщениями, реализующими механизм самоорганизации.

Таблица 2

Характеристики ряда времен ожидания обработки задач.
Эксперимент 5

Характеристики	Значение
Среднее время ожидания	17479,78
Дисперсия ряда времен ожидания	$5,08 \cdot 10^7$
Максимальное время ожидания	51676

Заключение

Рассмотренный алгоритм позволяет добиться удовлетворительных результатов как в части балансировки нагрузки на различные узлы сети компьютеров ГРИД, так и в части выравнивания времен ожидания задач в очереди. Напомним, что последняя характеристика является характеристикой сервиса, предоставляемого пользователям ГРИД. Это подтверждает работоспособность самой идеи использования многоагентных моделей и архитектур самоорганизации в данном классе приложений.

Естественно, что сам алгоритм требует дальнейшего исследования, в частности, при иных характеристиках входного потока заявок, таких как средняя трудоемкость потока задач, несимметричность нагрузки по отношению к компьютерам сети и др.

Важным аспектом дополнительного исследования являются характеристики связности топологии сети, а также масштабируемость модели по отношению к размеру сети ГРИД, хотя именно масштабируемость является важным свойством большинства механизмов самоорганизации. Последнее свойство достигается также благодаря использованию многоагентной модели и архитектуры систем с самоорганизацией. В частности, последнее свойство достигается за счет того, что в рассмотренном классе не используется механизм распределенного поиска агентов или сервисов, поскольку каждый агент общается только со своими соседями, а потому перегрузка коммуникационной компоненты системы дополнительным трафиком, что обычно характерно для P2P-многоагентных систем, в данном случае не имеет места.

Описанная модель рассматривается в качестве базовой модели процесса самоорганизации не только для управления ресурсами ГРИД. Она может быть также распространена, например, на задачу балансировки нагрузки в электрических сетях, где балансировка также достигается за счет перераспределения нагрузки между производителями электроэнергии.

Другое интересное направление дальнейших исследований связано с модификацией самого алгоритма самоорганизации. Действительно, представляется возможным улучшение качества механизма балансировки за счет обогащения информации, которой обмениваются соседние агенты, за счет включения в нее сведений о производительности соседних компьютеров, а также о длине очередей задач в них. Это может существенно улучшить динамику переходных процессов балансировки нагрузки при асимметрии входного потока и при динамике состава узлов ГРИД, которые могут появляться в сети и уходить из нее. Эти задачи являются перспективными для дальнейшего исследования.

Данная работа частично поддержана проектом № 214 "Алгоритмы обучения для самоконфигурирования динамических P2P сетей", выполняемого СПИИРАН по программе Президиума РАН № 14 "Интеллектуальные информационные технологии, математическое моделирование, системный анализ и автоматизация".

Список литературы

1. Bernon C., Chevrier V., Hilaire V., Marrow P. Applications of Self-Organising Multi-Agent Systems: An Initial Framework for Companion // Informatica. 30 (2006). P. 73–82.
2. Di Marzo Serugendo, G., Gleizes, M.-P. and Karageorgos A. Self-organization in multi-agent systems // The Knowledge Engineering Review. 2005b. 20 (2). P. 165–189.
3. Di Marzo Serugendo G., Gleizes M.-P. and Karageorgos A. Self-organisation and emergence in multi-agent systems: An overview // Informatica. 2006. 30 (1). P. 45–54.
4. Mamei M., Menezes R., Tolksdorf R. and Zambonelli F. Case Studies for Self-Organization in Computer Science // Journal of System Architecture. August–September 2006. V. 52. Iss. 8–9. P. 443–460.
5. Omicini A. and Gardelli L. Self-Organisation and MAS: An Introduction. URL: <http://unibo.lgardelli.com/teaching/2007-selforg-mas.pdf>
6. Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы (принята к публикации) // Известия РАН "Теория и системы управления". 2010.
7. Karuna H., Valckenaers P., Saint-Germain B., Verstraete P., Zamfirescu C. Bala and Van Brussel H. Emergent Forecasting Using a Stigmergy Approach in Manufacturing Coordination and Control. In S. Brueckner et al. (Eds.) // ESOA. 2004. 3464. Springer-Verlag 2005. P. 210–226.
8. Karuna H., Valckenaers P., Verstraete P., Saint-Germain B. and Van Brussel H. A Study of System Nervousness in Multi-agent Manufacturing (Control System). In A. A. Brueckner et al. (Eds.) // ESOA 2005. LNAI 3910. Springer-Verlag 2006. P. 232–243.
9. Camurri M., Mamei M. and Zambonelli F. Urban Traffic Control with Co-Fields. In D. Weyns, H.V.D. Parunak, and F. Michel (Eds.) // E4MAS 2006, LNAI 4389. Springer-Verlag. 2007. P. 239–253.
10. Di Caro G., Ducatelle F. and Gambardella L. AntHocNet: An adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile ad hoc network // Europ. Trans. Telecom. (Special Issue on Self-Organization in Mobile Networking 16). 2005. P. 443–455.
11. Jelasity M. Babaoglu O. T-Man: Gossip-Based Overlay Topology Management. In S.A. Brueckner et al. (Eds.) // ESOA 2005, LNAI 3910. Springer-Verlag. 2006. P. 1–15.
12. Clarke I., Sandberg O., Wiley B., Andhong T. W. Freenet: A distributed anonymous information storage and retrieval system // Proc. of the International Workshop on Designing Privacy Enhancing Technologies. 2000. Springer-Verlag, New York. P. 46–66.
13. Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Серебряков С. В. Инструментальные средства для открытых сетей агентов // Известия РАН. Теория и Системы Управления. 2008. №. 3. С. 106–124.
14. Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Серебряков С. В. Программная инфраструктура для поддержки концепции повсеместных вычислений в многоагентных P2P системах // Информационные технологии и вычислительные системы. 2008. № 4. С. 51–56.
15. Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Serebryakov S. P2P Agent Platform: Implementation and Testing. In S. Joseph Z. Despotovich, G. Moro, S. Bergamaschi (Eds.) Agents and Peer-to-Peer Computing // LNAI. 2009. V. 5319. P. 41–54.
16. Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Serebryakov S., Balandin S., Leppanen S., Turunen M. Virtual P2P Environment for Testing and Evaluation of Mobile P2P Agents Networks // The 2d International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM 2008), Valencia, IEEE Computer Society, 2008. P. 422–429.
17. Peer-to-Peer Agent Platform Guide. URL: <http://space.ias.spb.su/ap/index.php?me>.
18. FIPA Agent Communication Language Specification. URL: <http://www.fipa.org/specs/fipa00061/>

ИНФОРМАЦИЯ



С 30 января по 2 февраля 2012 г.
в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН состоится
IX Международная конференция
«Идентификация систем и задачи управления»
(SICPRO'12)

Организаторы: Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН,
Российский Национальный Комитет по автоматическому управлению,
Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Российской академией наук.

Председатель конференции — академик РАН С. Н. Васильев

Руководство Международного программного комитета

- В. А. Лотоцкий (Россия), д.т.н., профессор — председатель
- Н. Н. Бахтадзе (Россия), д.т.н., профессор — заместитель председателя
- К. С. Гинсберг (Россия), к.т.н. — заместитель председателя
- Е. Я. Рубинович (Россия), д.т.н., профессор — заместитель председателя
- А. В. Добровидов (Россия), д.ф.-м.н. — ученый секретарь
- К. Р. Чернышев (Россия), к.ф.-м.н. — ученый секретарь

Руководство Национального организационного комитета

- Н. Н. Бахтадзе, д.т.н., профессор — председатель
- К. Р. Чернышев, к.ф.-м.н. — заместитель председателя
- Е. Ф. Жарко, к.т.н. — ученый секретарь

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- ◆ Структурная идентификация
- ◆ Параметрическая идентификация
- ◆ Непараметрическая идентификация
- ◆ Интеллектуальные методы идентификации
- ◆ Обработка сигналов
- ◆ Стохастические системы
- ◆ Адаптивные и робастные системы
- ◆ Методы оптимизации
- ◆ Приложения методов идентификации

Контакты Электронный адрес Оргкомитета — pos@sicpro.org
Контактное лицо — Кирилл Романович Чернышев

УДК 621.01

В. В. Морозов, д-р техн. наук, проф.,

А. В. Жданов, канд. техн. наук, доц.,

М. А. Трефилов, аспирант,

Владимирский государственный университет,

tms@vlsu.ru

Расчет вероятности ошибки технической системы с использованием аппарата сетей Петри

Рассмотрены вопросы представления технических систем в виде сетей Петри. Предложена математическая модель системы электромеханического привода поступательного перемещения. Проведен расчет вероятности возникновения ошибки в ходе работы системы.

Ключевые слова: математическая модель, сеть Петри, надежность технической системы

Вопросы повышения надежности, безопасности и эффективности дополнительных методов диагностики и предотвращения ошибок становятся наиболее важными для многих технических процессов. Задача состоит в определении типа ошибки, а также всех возможных ее особенностей, таких как величина ошибки, место и время ее возникновения. Процедура диагностики основывается на рассмотрении аналитических и эвристических показателей и на полном понимании самого процесса.

В некоторых системах симптомы возможных ошибок в общих чертах известны. Они могут быть записаны в виде причинной связи: ошибка — события — симптомы. Для диагностики эти качественные знания можно дальше выразить в форме правил: если "условие" то "выполняемое действие". В качестве условия выступает симптом, в качестве выполняемого действия — возникающие ошибки и действия, предпринимаемые для их предотвращения. Но данный подход не доказал своей надежности в связи с недискретным характером ошибок и симптомов [1].

Рассмотрим более подробно другой подход, основанный на оценке надежности. Надежность — свойство системы сохранять способность выполнять заданные функции. Это довольно сложное свойство, включающее, в свою очередь, в зависимости от назначений системы и условий ее эксплуатации такие свойства, как безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость.

При анализе надежности, особенно при выборе показателей надежности объекта (системы), существенное значение имеет решение, которое должно быть принято при отказе объекта.

Анализ системы на надежность и ошибки является важной частью моделирования и оценки работоспособности сложных систем. Во многих производственных приложениях отказ системы зависит не только от всех ошибочных состояний компонентов системы, но и от последовательности возникновений этих ошибок. Поэтому данную ситуацию нельзя исключать из рассмотрения.

В настоящее время анализ системы на такого рода ошибки базируется либо на нереальных предположениях, либо неприменим для реальных производственных нужд. В данной статье приводится альтернативная методология оценки ошибок сложных систем. Моделирование системы осуществляется с использованием аппарата сетей Петри. Также применяется принцип счетчиков для учета времени.

Описание системы

Рассмотрим модель динамики электромеханического привода поступательного перемещения [3]. В моноблочной конструкции привода исполнительный механизм размещен в полем роторе электрической машины. Динамика данного привода исследуется на основе двухмассовой математической модели.

Система описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = \Omega_1; \\ \mu J_{pot} \dot{\Omega}_1 = k_M (U - k_X x_2 - k_v v_2 - k_a \dot{v}_2) - \\ - \frac{S_X}{\eta_{РВМ}} F_{12} - \frac{1}{k_\omega} \Omega_1; \\ \dot{x}_2 = v_2; \\ m_2 \dot{v}_2 = F_{12} - k_p x_2 - k_S v_2 - \\ - f_T(v_2, F_{12} - k_p x_2 - k_S v_2), \end{cases}$$

где φ_1 — угол поворота; Ω_1 — угловая скорость вращения ротора; J_{pot} — момент инерции ротора; $\mu = 1 + J_1/J_{pot}$ — коэффициент утяжеления ротора; J_1 — момент инерции входного звена; $k_M = M_n/U_0$ — коэффициент электромагнитной связи; M_n — пусковой момент двигателя, U_0 — номинальное напряжение двигателя; U — напряжение на входе двигателя; k_X — коэффициент усиления датчика; k_v — обратная связь по скорости; k_a — обратная связь по ускорению; S_X — кинематическая передаточная

функция; $\eta_{\text{РВМ}}$ — коэффициент полезного действия; F_{12} — сила упругости; k_{ω} — жесткость механической характеристики привода; x_2 — отклонение выходной координаты; v_2 — скорость звена; m_2 — масса звена; k_p — коэффициент позиционной нагрузки; k_S — коэффициент вязкого трения; f_T — функция, описывающая "сухое трение" [3].

На динамику привода в наибольшей степени влияют следующие возмущения:

$\Delta U(t)$ — на входе, вызванные помехами датчиков обратной связи, электрическими потерями в обмотках двигателя, пульсациями его момента и т. п.;

$\Delta_K(t)$ — по кинематической погрешности, вызванные технологическими погрешностями изготовления, деформациями звеньев в процессе эксплуатации привода и т. п.;

$F(t)$ — по нагрузке, вызванные колебаниями нагрузки и действием внешней среды на выходное звено.

Включая в систему слагаемые возмущений и выражая коэффициенты через постоянные времени и безразмерные коэффициенты, получаем систему уравнений динамики привода:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{y}_1; \\ \dot{y}_1 = \frac{v_0(t) - y_1 - \frac{1}{T_X} x_2 - \delta_v y_2 - \frac{F_{12}(\Delta x, t)}{T_{12}}}{T_{\mu}}; \\ \dot{x}_2 = y_2; \\ \dot{y}_2 = \frac{F_{12}(\Delta x, t) - \delta_p x_2 - T_s y_2 - f_T(y_2, F_2) - F(t)}{T_2^2}, \end{cases}$$

где x_1 — перемещение, эквивалентное повороту ведущего звена на определенный угол φ_1 ; x_2 — положение звена; $v_0(t) = S_X k_{\omega} k_M [U_{\text{упр}}(t) - u(t)]$ — управляющая скорость; $T_X = \frac{1}{S_X k_{\omega} k_M (k_X - \frac{k_a k_p}{m_2})}$ — по-

стоянная времени обратной связи; $\delta_v = S_X k_{\omega} k_M \times \times (k_v - \frac{k_a k_S}{m_2})$ — коэффициент, зависящий от об-

ратной связи по скорости; $\delta_p = \frac{k_p}{c}$ — безразмерный

коэффициент позиционной нагрузки; $T_2 = \sqrt{\frac{m_2}{c}}$ — период собственных колебаний нагрузки; $T_{12} = = \frac{1}{S_X k_{\omega} c (S_{\eta} - \frac{k_a k_M}{m_2})}$ — постоянная времени упругой

связи звеньев 1 и 2; $T_b = \frac{b}{c}$ — постоянная времени

демпфирования передачи; $T_S = \frac{k_S}{c}$ — постоянная времени демпфирования нагрузки; $F_{12}(\Delta x, t) = = f_L(\Delta x - \Delta_K(t)) + T_b \dot{f}_L(\Delta x - \Delta_K(t))$ — сила упругости; $F_2 = f_L(\Delta x - \Delta_K(t)) + T_b \dot{f}_L(\Delta x - \Delta_K(t)) - - \delta_p x_2 - F(t)$ — активные силы, приложенные к выходному звену привода при $y_2 = 0$.

В модели выходное перемещение отслеживается датчиками обратной связи, преобразующими отклонение выходной координаты x_2 в управляющее напряжение. Датчик характеризуется коэффициентом усиления k_X и обеспечивает жесткую обратную связь по положению. Дополнительно в системе могут присутствовать обратная связь по скорости K_v или обратная связь по ускорению k_a . Включение данных параметров необходимо, так как плавность выходного перемещения зависит не только от выходного перемещения, но и от его производных.

Средства описания системы

Для составления модели системы воспользуемся аппаратом сетей Петри, которые широко используются в качестве инструмента моделирования сложных систем. Сети Петри можно применять как средство визуальной связи компонентов, подобное блок-схеме, блочной диаграмме, дереву неисправностей и сетям. Их использование повышает понимание взаимосвязей между различными компонентами.

Сети Петри считаются лучшей альтернативой отказоустойчивого анализа, так как сети не только графически отображают причинные и следственные связи между событиями, но и описывают динамическое поведение системы. Переход от дерева неисправностей к представлению в виде сети Петри позволяет выполнять анализ на надежность и ошибки, а также является эффективным способом получения оптимальных и минимальных путей на графе. Моделирование с помощью сетей Петри дает возможность оценки качества и надежности при отказах, вызванных комбинацией незапланированных ошибок и их последовательностей.

Математическая модель

На рис. 1 приведена сеть Петри для модели динамики моноблочного электромеханического привода поступательного перемещения, описанного выше.

Применение сетей Петри для анализа надежности системы

Структура методологии анализа мехатронной системы на надежность состоит из пяти основных этапов. Данная структура объединяет анализ дерева отказов, анализ состояния и последствий отказа и моделирование динамической сети Петри для определения возможных ошибок и последователь-

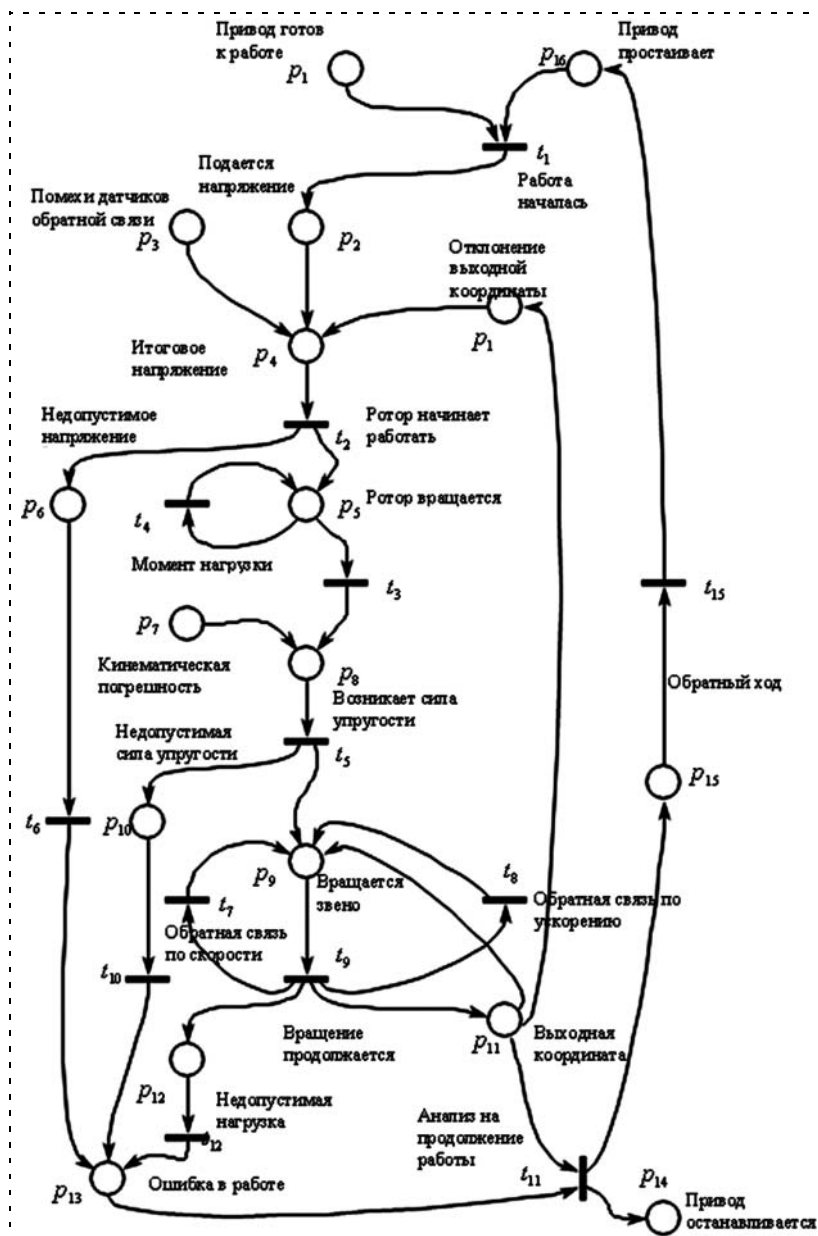


Рис. 1. Сеть Петри для рассматриваемой системы

ности их возникновения. Для расчета вероятности возникновения ошибки применяется принцип счетчиков сети Петри [2].

Анализ на ошибки начинается с определения потенциально возможных отказов системы, которые могут вызвать серьезные ошибки в процессе работы или в продукте. Серьезная ошибка — это неудовлетворительное выполнение действий, возникающее в процессе работы или тестирования. Обычно данный анализ можно провести с помощью дерева отказов, анализа состояния и последствий отказа или другими доступными методами.

Определение последовательности ошибок начинается после построения модели в виде сети Петри системы с учетом возможных отказов. Если ошибки стохастические и взаимно независимы с постоянными ошибками и оценкой ремонта, то можно использовать стохастическую сеть Петри. Ошибки необходимо интегрировать в сеть Петри следующим образом: ошибка должна быть обозначена как переход, причина ошибки должна быть обозначена как входное состояние перехода, последствия ошибки — выходные состояния.

На основе сети Петри можно построить дерево достижимости путем прохода всеми доступными метками по всем доступным переходам, начиная с начальной метки. Эта процедура выполняется до тех пор, пока не будут пройдены все состояния. В результате данное представление всей системы включает в себя процесс нормального ее функционирования и все возможные ошибки. С использованием меток можно определить последовательности ошибок путем прослеживания состояний от начальной метки до метки, которая находится в состоянии отказа системы. Таким образом, удастся определить маршруты сети, которые приводят к ее отказу.

После того как определилась последовательность ошибок, можно рассчитать вероятность их возникновения. Так как последний переход в последовательности определяет ошибку системы, то число раз, которое этот переход отработал за определенное количество времени, дает нам определенную приблизительную оценку. Подробнее метод расчета описан ниже.

Расчет вероятности ошибки для рассматриваемой системы

Принцип определения вероятности ошибки в работе системы основан на использовании счетчиков в сети Петри [2].

Допустим, необходимо вычислить вероятность того, что система выдаст ошибку через 4000 ч. Значения интенсивности отказов и среднего времени до возникновения ошибки на переходах приведены в таблице.

Интенсивность отказа	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}	λ_{15}
	1	0,5	0,5	0,1	0,5	0,03	0,5	0,5	1	0,02	1	0,03	1
Среднее время до ошибки	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6	ϕ_7	ϕ_8	ϕ_9	ϕ_{10}	ϕ_{11}	ϕ_{12}	ϕ_{15}
	1	2	2	10	2	2000	2	1	10	3000	10	3333	1

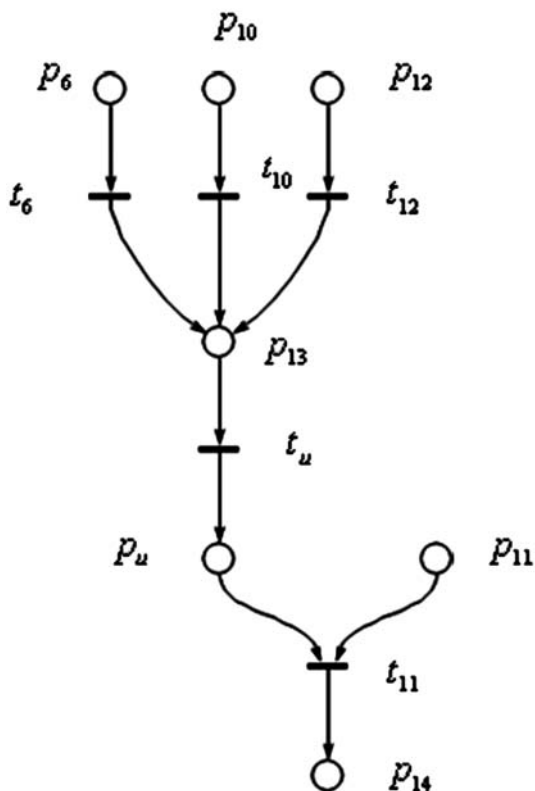


Рис. 2. Каноническое преобразование сети, изображенной на рис. 1

В сети Петри, изображенной на рис. 1, у перехода t_{11} два входных состояния — p_{11} и p_{13} . Состояние p_{13} — последовательное, поэтому для вычисления ошибки на основе приведенного ранее метода необходимо выполнить каноническое преобразование, показанное на рис. 2. Вводятся фиктивный переход t_u и фиктивное состояние p_u .

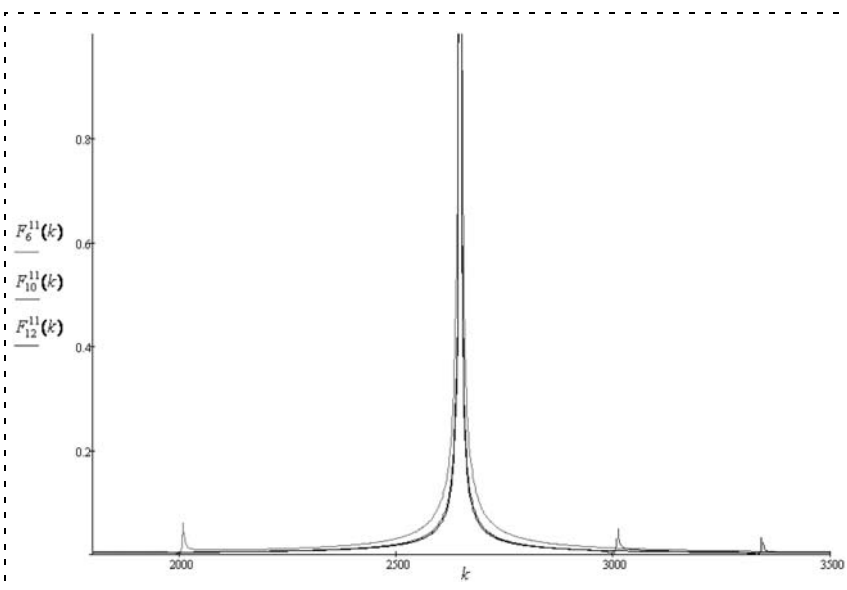


Рис. 3. График вероятности ошибки системы в зависимости от различных факторов

Вероятность того, что переход t_u отработает к моменту времени k , рассчитывается как $f_9(k) = \frac{X_9(k)}{k}$,

где $X_9(k) = \left[\frac{k}{X_9(k - \phi_9 - \phi_6)} \right]$. Вероятность того, что переход t_u отработает через переход t_6 (недопустимое напряжение) к моменту времени k , вычисляется как

$$f_u^6(k) = \frac{X_6(k - \phi_6)}{X_6(k - \phi_6) + X_{10}(k - \phi_{10}) + X_{12}(k - \phi_{12})}.$$

Аналогично рассчитываются вероятности того, что переход t_u отработает через переход t_{10} и t_{12} к моменту времени k .

Получаем вероятность ошибки системы через 4000 ч:

$$\begin{aligned} F_6^{11}(k) &= f_9(k) f_u^6(k) = \left(\left| \frac{\frac{k}{X_9(k - \phi_9 - \phi_6)}}{k} \right| \right) \times \\ &\times \left(\left| \frac{X_6(k - \phi_6)}{X_6(k - \phi_6) + X_{10}(k - \phi_{10}) + X_{12}(k - \phi_{12})} \right| \right) = \\ &= \left(\left| \frac{1}{k - \phi_9 - \phi_6} \right| \right) \left(\left| \frac{\frac{k - \phi_6}{\phi_6}}{\frac{k - \phi_6}{\phi_6} + \frac{k - \phi_{10}}{\phi_{10}} + \frac{k - \phi_{12}}{\phi_{12}}} \right| \right); \end{aligned}$$

$$F_6^{11}(4000) = f_9(4000) f_u^6(4000) = 0,003432.$$

Функция $F_6^{11}(k)$ имеет точку разрыва в момент времени 2010 ч, вероятность достигает своего максимального значения в точке $k = 2647$ ч. Остальные значения имеют порядок $10^{-1} \dots 10^{-2}$.

График функций $F_6^{11}(k)$, $F_{10}^{11}(k)$

и $F_{12}^{11}(k)$ приведен на рис. 3. Как видно на графике, вероятности отказа под влиянием каждого из факторов имеют по два всплеска. Один из них довольно незначителен и не превышает 0,1, второй происходит в одной и той же точке $k = 2647$. Следовательно, можно предположить, что именно в этой точке риск возникновения отказа системы является максимальным.

В данном примере величины среднего времени до возникновения ошибки являются постоянными. Рассмотрим более общий случай для различных значений данных переменных. Функции $F_6^{11}(k, \phi_6)$, $F_{10}^{11}(k, \phi_{10})$

и $F_{12}^{11}(k, \phi_{12})$ теперь зависят от двух переменных, а значит, их графики трехмерные (рис. 4). Для большей наглядности рассмотрим проекции этих графиков на плоскость XU (рис. 5), что даст возможность увидеть, при каких значениях двух переменных функция имеет критическое значение, т. е. вероятность равна 1.

Таким образом, по графикам на рис. 6 можно оценить, при каких парах значений времени работы

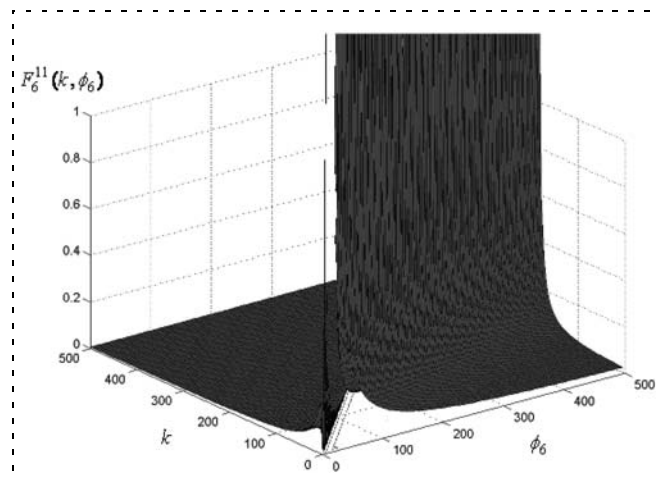


Рис. 4. График вероятности ошибки $F_6^{11}(k, \phi_6)$ при $k \in (0, 500)$, $\phi_6 \in (0, 500)$

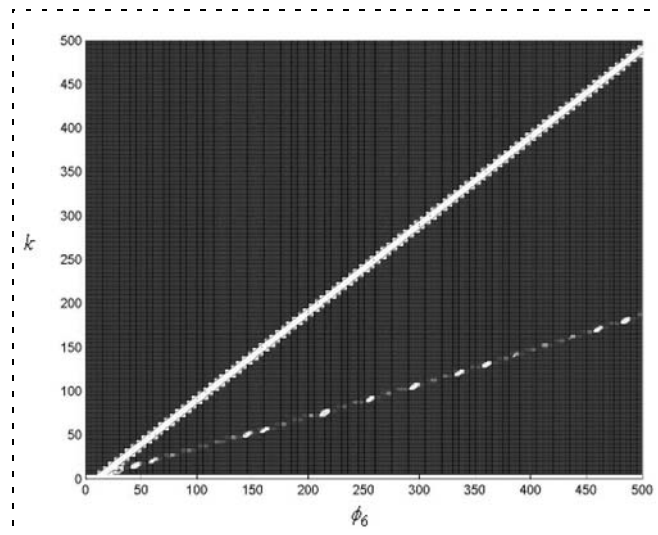


Рис. 5. Проекция графика $F_6^{11}(k, \phi_6)$ при $k \in (0, 500)$, $\phi_6 \in (0, 500)$ на плоскость XU

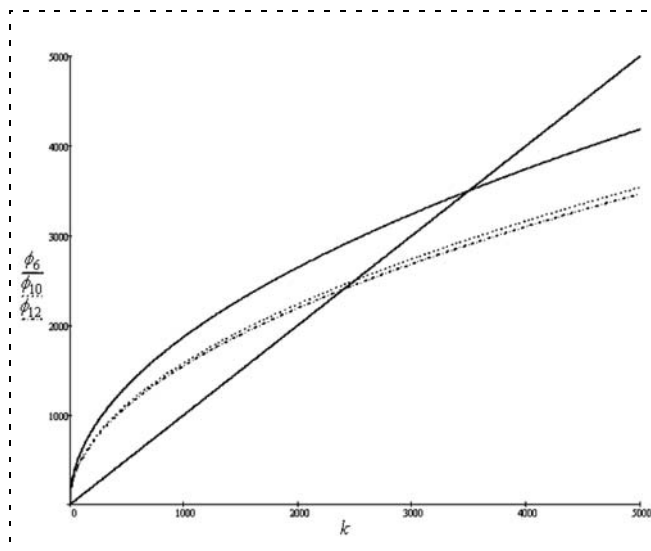


Рис. 6. Проекция графиков $F_6^{11}(k, \phi_6)$, $F_{10}^{11}(k, \phi_{10})$, $F_{12}^{11}(k, \phi_{12})$ при $k \in (0, 5000)$, $\phi_6 \in (0, 5000)$, $\phi_{10} \in (0, 5000)$, $\phi_{12} \in (0, 5000)$ на плоскость XU

и среднем времени до ошибки вероятность ее возникновения будет равна 1.

К преимуществам рассмотренного метода вычисления вероятности ошибки можно отнести: использование меньшего числа переменных; менее сложные расчеты; возможность лучшего понимания динамики системы; возможность исследования больших систем без резкого увеличения пространства состояний; времена возникновения ошибки не лимитированы экспоненциальным распределением. Построенная сеть Петри для рассматриваемой системы позволяет наглядно представить процессы системы и возможные нежелательные ситуации, а полученные в результате проведенного анализа сети графики позволяют наглядно увидеть, при каких значениях параметров системы в течение времени работы привода могут возникать ошибки. Это позволяет использовать данный метод для определения вероятности их возникновения.

Список литературы

1. Isermann R. Model-based fault-detection and diagnosis — status and applications // Annual Reviews in Control. 2005. № 29. С. 71—85.
2. Adamyan A., He D. Sequential failure analysis using counters of Petri net models // Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans. 2003. № 33. С. 1—11.
3. Морозов В. В., Костерин А. Б., Новикова Е. А. Плавность динамических звеньев электромеханических приводов. Владимир: изд. ВлГУ, 1999. С. 25—36.

А. Н. Сочнев, канд. техн. наук, доц.
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск,
lesek@mail.ru

Методы сокращения размеров сетевых моделей роботизированных технологических систем

Представлены результаты применения известных методов сжатия для минимизации информации, описывающей структуру сети Петри. Определена эффективность сжатия матриц инцидентий сетей Петри различными методами. Рассмотренные методы могут быть применены в любых программных продуктах, использующих аппарат сетей Петри.

Ключевые слова: сеть Петри, матрица инцидентий, фактор сжатия

Общие принципы сетевого моделирования

Сети Петри разрабатывались специально для моделирования систем, содержащих взаимодействующие компоненты. Взаимодействие этих компонентов может порождать последовательные, ветвящиеся и циклические процессы. Различные расширения классических сетей (временные, цветные сети и т. д.) позволяют проводить временной и стоимостной анализ динамического поведения моделируемой системы.

Существует несколько представлений сети Петри [1, 2, 3]:

- ♦ **Теоретико-множественное.** Сеть Петри определяется пятеркой

$$C = (P, T, I, O, \mu),$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ — конечное множество позиций, $n \geq 0$;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ — конечное множество переходов, $m \geq 0$;

$I = \{I(t_1), I(t_2), \dots, I(t_m)\}$ — конечное непустое множество входных позиций переходов;

$O = \{O(t_1), O(t_2), \dots, O(t_m)\}$ — конечное непустое множество выходных позиций переходов;

$\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$ — вектор маркировок.

Множество позиций и множество переходов не пересекаются.

- ♦ **Матричное.** Используются матрицы D^+ , D^- и D , описывающие, соответственно, входные и выходные функции переходов.

- ♦ **Графическое.** Сеть Петри представляется в виде двудольного ориентированного мультиграфа.

При создании сети в системе используется как графическое (для визуализации), так и матричное представление, так как для матричного представления разработаны эффективные алгоритмы испол-

нения и анализа сети. Далее в статье рассматривается и исследуется матричное представление сетей Петри.

Одной из довольно популярных сфер применения сетей Петри является моделирование производственных процессов [4, 5]. Такие модели позволяют провести предварительное планирование производства, добиться требуемых значений показателей качества процессов, а также при необходимости управлять ими в реальном времени.

В процессе сетевого моделирования возникает необходимость создания архивов моделей процессов по состоянию на отдельные даты. Сохраненные модели процессов позволяют в случае необходимости просмотреть отдельные цепочки операций, а также использовать имеющиеся планы производства для разработки новых.

Специфика сетевых моделей производственных систем состоит в том, что кратности дуг сетевой модели, как правило, имеют три типичных значения: 0, 1 и n . Нулевая кратность означает отсутствие связи между вершинами графа, единичная — моделирует перемещения одного объекта в системе (изделия, инструмента, управляющей программы и т. д.). Кратность n отображает перемещение группы объектов, например партии изделий.

Сеть Петри, построенная для производственной системы, может быть описана матрицей инцидентности, имеющей две отличительные особенности:

1) большую размерность. Для каждой операции производственного процесса требуется определить переход и множества связанных с ним позиций. Технологический процесс представляется множеством переходов, с каждым из которых связаны, как минимум, две позиции: входная и выходная;

2) небольшой перечень значений элементов матрицы по причинам, описанным выше. Как правило, присутствуют пять значений: 0, -1 , $+1$, $-n$, $+n$.

Анализ этих особенностей позволяет предложить методы уменьшения объема данных, представляющих сеть Петри.

Рассмотрим известные методы архивирования данных на примерах моделей простых производственных систем.

Описание производственной системы

Роботизированный технологический комплекс состоит из токарного станка с ЧПУ, оперативного накопителя для хранения заготовок и готовых изделий, а также робота-манипулятора, выполняющего транспортные операции (рис. 1). Планируется обработка изделий одного типа. Время выполнения каждой операции предварительно определено. В накопителе находится восемь партий у заготовок, каждая партия содержит четыре заготовки.

Сетевая модель системы на основе обобщенной сети Петри имеет вид, представленный на рис. 2.

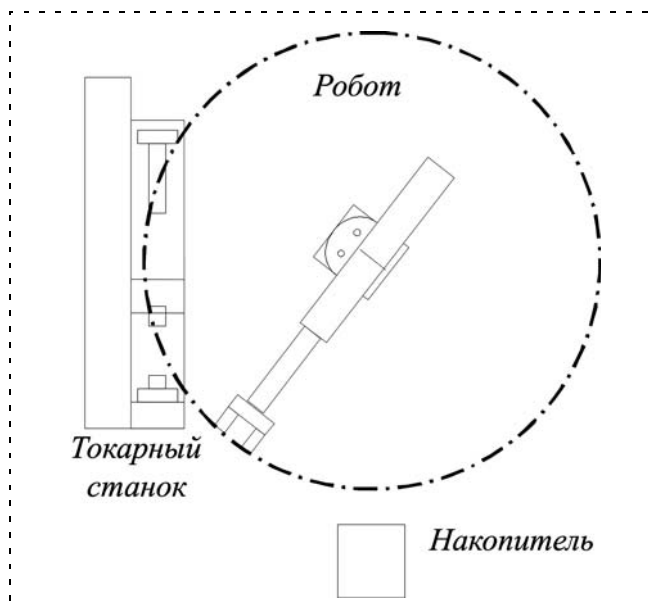


Рис. 1. Структура роботизированной производственной системы № 1

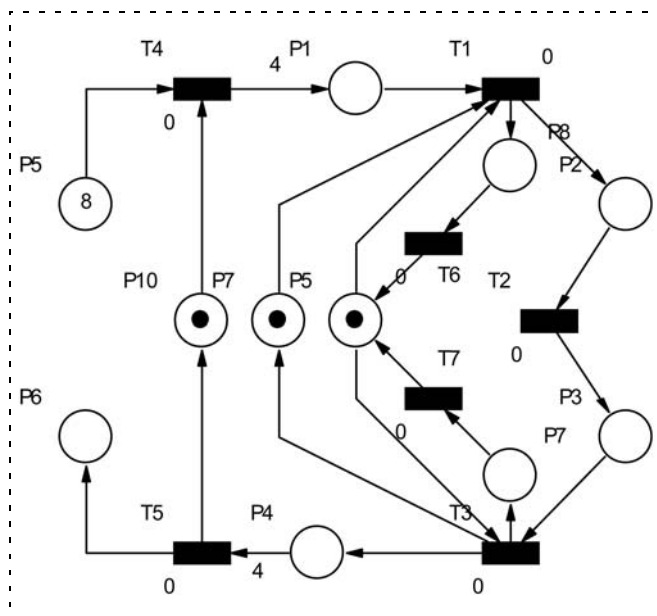


Рис. 2. Сетевая модель роботизированной производственной системы № 1

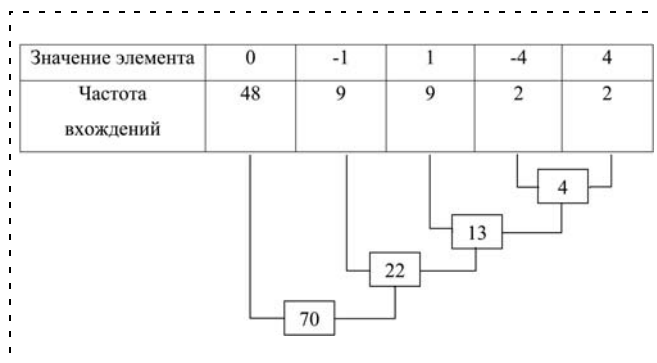


Рис. 3. Дерево Хаффмана

Матрица инцидентий сформированной модели имеет следующий вид:

$$D = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -4 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для оценки эффективности метода определим, что под каждый элемент матрицы отводится область памяти, равная одному байту. При этом кратности дуг сети могут быть числами в диапазоне от -128 до +127. Представленная матрица в памяти ЭВМ занимает область 70 байтов, поскольку она содержит 10 строк и 7 столбцов.

Рассмотрим особенности применения известных методов сжатия данных для обработки матрицы инцидентий сети Петри, например, кодирование Хаффмана или методы типа LZ [6, 7].

LZ-методы основаны на формировании словаря наборов символов по мере обработки данных для применения его в дальнейшем. Можно сказать, что для рассматриваемой задачи этот метод подходит плохо, поскольку в матрице инцидентий в общем случае будет мало одинаковых числовых последовательностей или их не будет вообще.

Кодирование Хаффмана формирует коды разной длины для чисел, тем самым уменьшая объем наиболее часто встречающихся данных. Поскольку в приведенной выше матрице много повторений одинаковых элементов, то можно прогнозировать, что этот метод сжатия даст большой эффект.

Дерево Хаффмана для рассматриваемой матрицы показано на рис. 3.

Сформированный код Хаффмана представлен в табл. 1.

Заменяем элементы матрицы инцидентий соответствующими кодами. Для оценки эффективности метода полученные коды объединяются по во-

Таблица 1

Коды Хаффмана для элементов матрицы D

Номер	Число	Код
1	0	0
2	-1	10
3	1	110
4	-4	1110
5	4	1111

семь битов в целях определения требуемой области памяти в байтах:

$D^* = 10001111, 00011010,$
 $00000011, 01000000, 01100111,$
 $00010010, 11100110, 11000001,$
 $11100100, 11000001, 10000010,$
 $00011000, 01000010, 11000xxx.$

Объем требуемой памяти для представления матрицы инцидентий после применения рассматриваемого метода архивирования составляет 14 байтов. К этим данным еще добавятся частоты появления чисел или сами числа, необходимые для декодирования, в рассматриваемом случае — еще пять байтов (пять чисел). Коэффициент сжатия $70/19 = 3,68$. Высокое значение этого коэффициента можно было спрогнозировать. Кроме того, степень сжатия должна увеличиваться с увеличением размеров матрицы инцидентий, так как при этом будет увеличиваться число повторений в ней значений $0, -1, +1, -n, +n$.

Применение кодирования Хаффмана для сжатия матрицы инцидентий имеет недостаток, выражающийся в том, что доступ к элементам происходит по последовательному принципу. Это означает, что если необходимо использовать последний элемент матрицы для расчета следующего состояния сети, то потребуются просмотреть все предыдущие элементы. В то же время для задачи долгосрочного хранения сетевых моделей в базе данных этот недостаток не существен.

Для моделирования производственных систем довольно часто используются раскрашенные сети Петри. Особенности сжатия матрицы инцидентий раскрашенной сети показаны на примере другой производственной системы. Система представляет собой гибкий производственный комплекс (ГПК), предназначенный для операций токарной и фрезерной обработки. Общий вид ГПК представлен на рис. 4.

Сетевая модель системы

Число позиций сети (рис. 4) $P = 29$, число переходов $T = 20$, число цветов $C = 20$. Для данной сети потребуются $P \times T \times C = 29 \times 20 \times 20 = 11\,600$ байт.

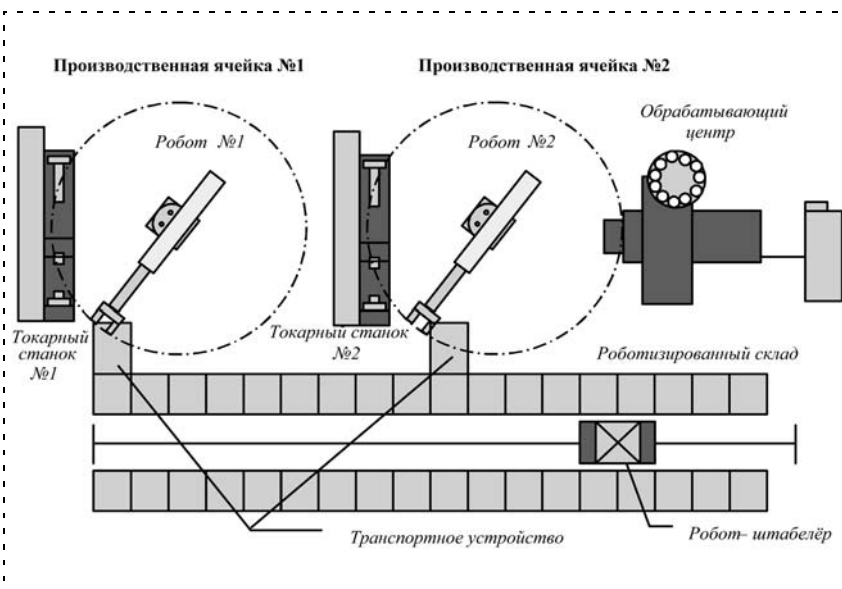


Рис. 4. Структура роботизированной производственной системы № 2

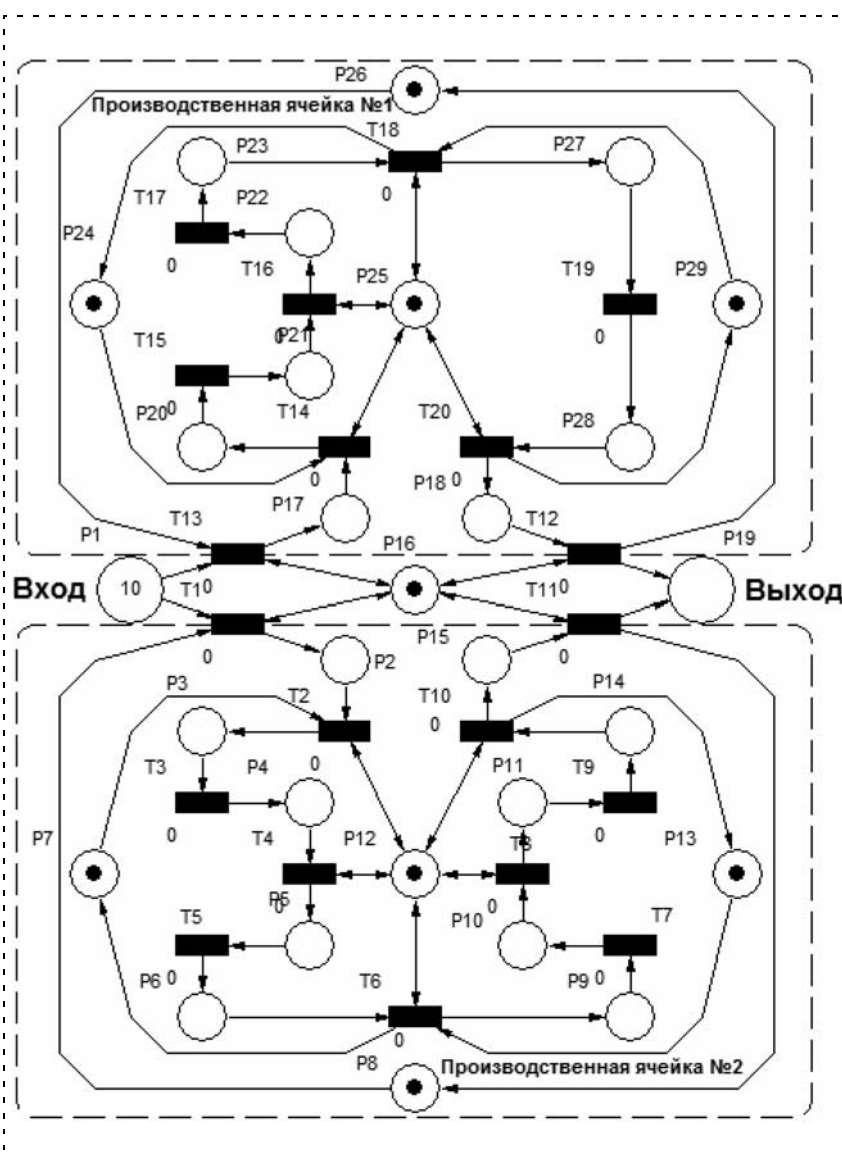


Рис. 5. Сетевая модель роботизированной производственной системы № 2

Таблица 2
Коды Хаффмана для элементов матрицы D^+ и D^-

Номер	Число	Код	Число бит	Число элементов в матрице D^-	Число элементов в матрице D^+
1	0	0	1	548	548
2	1	10	2	30	30
3	n	110	3	2	2

Модель, представленная на рис. 5, описывается матрицами входных и выходных инцидентов D^+ и D^- . В этих матрицах будут присутствовать элементы, равные 0, 1 и n , что позволяет сформировать таблицу кодов для каждого цвета (табл. 2). Будем считать что изделия однотипные, их технологические процессы могут быть представлены одинаковыми матрицами D^+ и D^- . Отличаться они будут только значением n , определяющим число изделий в партии.

Объем матрицы D^- для одного цвета, при условии что каждый элемент равен одному байту, составит $20 \times 29 = 580$ байтов. После применения сжатия по методу Хаффмана для ее хранения будет достаточно 2×3 бита + 30×2 бита + 548×1 бит = 548 битов = 77 байтов. К этому объему необходимо добавить три байта для хранения самих чисел 0, 1 и n . Окончательно размер данных составит $77 + 3 = 80$ байтов.

$$\text{Фактор сжатия} = \frac{\text{Размер исходной матрицы} \times \text{Число цветов}}{\text{Размер полученной матрицы}};$$

$$\text{Фактор сжатия} = \frac{580 \text{ байтов} \times 20}{80 \text{ байт}} = 145.$$

Анализ результатов позволяет сделать вывод о росте фактора сжатия при увеличении размеров модели. Высокое значение фактора сжатия обусловлено одинаковыми матрицами D^+ и D^- для всех цветов. Полученное значение является граничным и на практике может быть меньше.

Сжатие матриц инцидентов ординарных сетей Петри

Отдельные участки производственных систем могут адекватно представляться ординарными сетями Петри, например, отдельные агрегаты или небольшие группы связанных технологически агрегатов (производственные участки или модули).

Матрицы входных и выходных инцидентов ординарной сети состоят из элементов 0 и 1, что позволяет предложить простые методы уменьшения объема памяти для хранения структуры сети.

Будем рассматривать строки (столбцы) матрицы инцидентов как двоичные комбинации, представляющие собой отдельные байты (8 битов), слова (16 битов), длинные целые (32 бита), длинные целые (64 бита). Максимальный размер сжимаемой матрицы, таким образом, составит $n \times 64$ элемента. Так же, как и в предыдущем примере, будем счи-

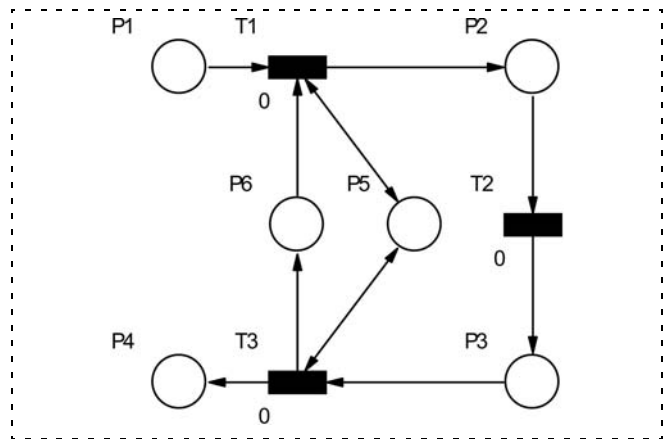


Рис. 6. Сетевая модель роботизированной производственной системы № 2

тать, что один элемент матрицы занимает в памяти один байт. Для хранения элементов 0 и 1 достаточно одного бита, однако программные и аппаратные средства микропроцессорных систем ориентированы на операции с байтами и словами.

С учетом этих обстоятельств объем памяти для хранения структуры сети, состоящей из 64 позиций и 64 переходов, составит $2 \times 64 \times 64 \times 1$ байт = 8192 байтов. Для хранения сети, представленной на рис. 6, потребуется $2 \times 3 \times 6 \times 1$ байт = 36 байтов.

Матрицы входных D^- и выходных D^+ инцидентов имеют вид:

$$D^- = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; D^+ = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Применим к столбцам матрицы D^- известную формулу двоично-десятичного преобразования [8]:

$$e_1 = 1 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^5 = 1 + 16 + 32 = 49;$$

$$e_2 = 0 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^5 = 2;$$

$$e_3 = 0 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^5 = 20.$$

Получим вектор $E = (49 \ 2 \ 20)$, содержащий все данные матрицы входных инцидентов D^- .

Исходная матрица легко может быть восстановлена по схеме преобразования десятичных чисел в двоичный код целочисленным делением y на основание системы с пошаговым запоминанием остатков (табл. 3).

Таблица 3
Восстановленные значения первого столбца матрицы

49/2	24/2	12/2	6/2	3/2	1/2
1	0	0	0	1	1

Объем требуемой памяти для представления матрицы инцидентов после применения рассматриваемого метода архивирования составляет 3 байта. Коэффициент сжатия $18/3 = 6$. Для матрицы 64×64 элемента коэффициент сжатия составил $4096/(64 \times 8) = 8$.

Заключение

Представленные в статье методы сжатия сетевых моделей являются основой для создания информационной базы предприятия, а также могут использоваться для хранения информации о структуре сети Петри в любых приложениях. В статье рассмотрен вопрос эффективности применения известных методов для сжатия матриц инцидентности сети Петри. Актуальным для дальнейших исследований может являться вопрос особенностей применения других методов для сжатия сетевых моделей.

Список литературы

1. Юдицкий С. А., Магергут В. З. Логическое управление дискретными процессами. Модели, анализ, синтез. М.: Машиностроение, 1987. 176 с.
2. Котов В. Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 160 с.
3. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.
4. Горнев В. Ф., Емельянов В. В., Овсянников М. В. Оперативное управление в ГПС М.: Машиностроение, 1990. 256 с.
5. Воробьев С. А. Планирование и управление дискретным производством на основе временных сетей Петри с переменной нагрузкой: Дис. канд. техн. наук: 05.13.14. Красноярск, 2002. 149 с.
6. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. М.: Техносфера, 2004. 368 с.
7. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. 384 с.
8. Каймин В. А. Информатика: Учебник. М.: ИНФРА-М, 2000. 232 с.

УДК 519.6:004.942

П. Ю. Вильвер, программист,
А. В. Протасов, канд. техн. наук, науч. сотр.,
Институт динамики систем
и теории управления СО РАН, г. Иркутск,
arprot@icc.ru

Имитационное моделирование сложных динамических систем с использованием сетей Петри

Обсуждается разработка имитационной модели на основе расширенного формализма сетей Петри для исследования сложных динамических систем и обеспечения их безопасной эксплуатации.

Ключевые слова: имитационная модель, сеть Петри, сетевой формализм, ОРС-сервер

Введение

Для исследования сложных технических систем (СТС) с возможностью описания поведения элементов СТС на высоком уровне детализации, а также исследования динамики взаимодействия элементов во времени и контроля протекания процессов в системе все большее применение находит метод имитационного моделирования.

Любая сложная динамическая система имеет в своем составе элементы, работающие параллельно. В зависимости от способа их взаимодействия параллельные процессы подразделяются на асинхронный (состояние которого не зависит от состояния другого параллельного процесса), синхронный (состояние которого зависит от взаимодействующего с ним процесса), зависимый (управляется процес-

сом более высокой иерархией), независимый (не зависит от других процессов системы).

Тип параллельных процессов определяет выбор метода и средства создания модели. Как правило, используются языки, для которых характерны методы реализации квазипараллелизма, основанные на ведении списков событий (SIMULA, GPSS и др.).

В качестве средства для создания и анализа асинхронных моделей выбран классический язык описания — язык сетей Петри (СП) [1, 2]. Анализ методик исследования СТС на базе использования формализма СП, описанных в работах [2, 3, 4, 5], позволил выявить следующие достоинства, которые повлияли на выбор этого языка:

- язык предназначен для описания параллельных процессов;
- возможно наглядное графическое представление процесса;
- имеется удобная формализация причинно-следственных зависимостей.

Но наряду с положительными сторонами известных расширений СП (цветные, алгебраические, приоритетные, временные, Е-сети, нечеткие СП и др.) отмечены следующие недостатки, которые наиболее существенны для моделирования динамической СТС:

- требуются большие трудозатраты на создание модели и проведение экспериментов, а также обработку их результатов;
- затруднена проверка адекватности созданных моделей СТС и их поведения;
- существующие расширения СП не способны прогнозировать состояние элементов модели (кроме нейронных СП);

- нет механизмов контроля безопасного функционирования моделируемых элементов системы (выход за допустимые технологические параметры).

Данная статья посвящена созданию имитационной модели для исследования сложных динамических ТС и обеспечения их безопасного функционирования с использованием формализма СП.

Модификация формализма СП

Для исключения выявленных недостатков в сетевой формализм (СФ) СП [3] были введены следующие расширения:

- функции динамического обмена данными модели и объектов СТС с применением технологии ОРС, что позволит модели функционировать в режиме реального времени и контролировать адекватность модели;
- определенные на дугах прогностические функции атрибутов меток для придания программно-измерительному комплексу функции системы поддержки принятия решений (СППР);
- механизм динамического изменения прогностических функций в зависимости от значений параметров меток с учетом изменения поведения СТС.

Таким образом, модифицированный СФ определяется следующим набором:

$$NF = \langle P, T, M, MET, LEV, I, O, R, DSS, \tau_i, \tau_o, M_0 \rangle.$$

Здесь

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{N_p}\}$ — множество позиций.
- $T = \{t_1^{prt_1}, t_2^{prt_2}, \dots, t_{N_t}^{prt_{N_t}}\}$ — множество переходов, на которых определена система приоритетов $prt_i \in N^+ \leq N_t$, $prt_i \neq prt_j$, $i, j = \overline{1, N_t}$.
- $M: P \rightarrow MET \cup \{M(p) | p \in P\}$ — маркировка сети, где множество меток MET определяется как совокупность векторов с указанием приоритета метки prm_i , типа (цвета) метки tm_i и множества параметров $(at_{i1}, at_{i2}, \dots, at_{iN_{ka}})$, описывающих этот тип, с историей значений his :

$$MET = \left\{ \begin{array}{l} (m_1^{prm_1}, m_2^{prm_2}, \dots, m_{N_m}^{prm_{N_m}}) | \\ m_i^{prm_i} = \{tm_i^k, (at_{k1}, at_{k2}, \dots, at_{kN_{ka}})^{his}\}, \\ prm_i \in N^+ \leq N_m, prm_{i1} \neq prm_{i2}, \\ i1, i2, i = \overline{1, N_m}, \\ tm_i^k \in TM, at_{kj} \in AT_j, k = \overline{1, N_k}, \\ j = \overline{1, N_{ka}}, his = \overline{1, N_{his}}, \end{array} \right\},$$

где TM — множество типов меток; AT_j — множество значений параметра at_{ij} ; N_k — число типов меток; N_{ka} — число параметров, принадлежащих данному

типу метки; N_{his} — число предыдущих значений параметров меток.

- $I = (I_m, I_f, I_l, I_{lev})$ — входная функция, где $I_m: P \times T \rightarrow MET \cup \{M(p) | p \in P\}$ — функция, определяющая возможность срабатывания перехода и изменение параметров меток по каждому из цветов множества TM ;

$$I_f: P \times T \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (f_{k1}, f_{k2}, \dots, f_{N_k N_{ka}})^k | \\ f_{kj} = f(at_{kj}), k = \overline{1, N_k}, j = \overline{1, N_{ka}} \end{array} \right\} —$$

функция, вычисляющая атрибуты меток;

$$I_l: P \times T \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (L_{k1}, L_{k2}, \dots, L_{N_k N_{ka}})^k | \\ at_{kj} \in L_{kj}, k = \overline{1, N_k}, j = \overline{1, N_{ka}} \end{array} \right\} —$$

функции разметки входных дуг,

где f_k — алгебраическая функция, определяющая метод вычисления значения атрибута метки в позиции p ;

L_k — ограничение на значение атрибута метки в позиции p ;

$I_{lev}: P^{lev_i} \times T^{lev_i} \rightarrow P^{lev_{i+1}} \times T^{lev_{i+1}}$ — функция, описывающая взаимодействие уровней сети на входных дугах.

- Аналогично определяется выходная функция:

$O = (O_m, O_f, O_l, O_{pro}, O_{lev})$ — выходная функция,

где $O_m: T \times P \rightarrow MET \cup \{M(p) | p \in P\}$;

$$O_f: T \times P \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (f_{k1}, f_{k2}, \dots, f_{N_k N_{ka}})^k | \\ f_{kj} = f(at_{kj}), k = \overline{1, N_k}, j = \overline{1, N_{ka}} \end{array} \right\};$$

$$O_l: T \times P \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (L_{k1}, L_{k2}, \dots, L_{N_k N_{ka}})^k | \\ at_{kj} \in L_{kj}, k = \overline{1, N_k}, j = \overline{1, N_{ka}} \end{array} \right\};$$

$$O_{pro}: T \times P \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (f_{k1}^{pro}, f_{k2}^{pro}, \dots, f_{N_k N_{ka}}^{pro})^k | \\ f_{kj}^{pro} = f^{pro}(\{at_{kj}\}^{his}), \\ k = \overline{1, N_k}, j = \overline{1, N_{ka}}, his = \overline{1, N_{his}} \end{array} \right\} —$$

функция прогнозирования значений параметров метки на основе предыдущих (исторических) значений;

$O_{lev}: T^{lev_i} \times P^{lev_i} \rightarrow T^{lev_{i+1}} \times P^{lev_{i+1}}$ — функция, описывающая взаимодействие уровней сети на выходных дугах.

$$\bullet \quad LEV: P \times T \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (lev_1, lev_2, \dots, lev_{N_{lev}}) | \\ \sum_{lev_i} NF^{lev_i} = NF, i = \overline{1, N_{lev}} \end{array} \right\} —$$

функция, описывающая иерархические уровни сети.

- $DSS: \rightarrow f(R_{pro}, O_{pro}, LEV)$ — функция "кооперативной СППР", позволяет изменять, пополнять или улучшать решения, предлагаемые системой, посылая затем эти изменения в систему для проверки.
- $\tau_1: T \rightarrow N$ и $\tau_2: P \rightarrow N$ — функции, определяющие время задержки при срабатывании перехода и время задержки в позиции, что интерпретируется как время загрузки аппарата и время получения промежуточного продукта соответственно.
- M_0 — начальная разметка сети.

Создание модели

Построение модели функционирования с использованием иерархических уровней основано на декомпозиции исследуемых элементов СТС. Переход от нижнего уровня к верхнему осуществляется последовательно, в соответствии с иерархическим уровнем сети.

Переходами сети моделируются происходящие события технологического процесса. Позициями сети моделируются элементы СТС.

Атрибутами меток моделируются состояния элементов СТС. Использование атрибутов меток дает возможность группировать метки, описывающие один материальный поток, отражает изменение параметров СТС как в пределах допустимых, так и недопустимых значений, что позволяет сократить число меток и уменьшить размер модели.

Использование ограничений позволяет разделить множество состояний функционирования на подмножества с номинальными, допустимыми и недопустимыми значениями параметров. Благодаря этому становится возможным моделировать аварии и инциденты, возникающие при функционировании СТС.

Функционирование модели

При данном описании сети Петри переход $t_j \in T$ с маркировкой $\mu(p)$ разрешен, если для всех $p_i \in P$ во входных позициях имеются метки такого цвета, который указан в функциях дуг, а значения параметров этих меток принадлежат множеству AT_j , т. е. выполнены условия I_m, I_f, I_t :

$$\mu(p_i) \geq (p_i, I(t_j)).$$

Переход запускается удалением всех разрешающих меток из его входных позиций и последующим помещением в каждую из его выходных позиций по одной метке для каждой дуги. Цвет метки определяется функциями дуг и значениями атрибутов этих меток.

Переход t_j с маркировкой $\mu(p)$ может быть запущен всякий раз, когда он разрешен. В результате запуска разрешенного перехода t_j образуется новая

маркировка $\mu'(p)$, определяемая следующим соотношением [1]:

$$\mu'(p_i) \geq \mu(p_i) - (p_i, I(t_j)) + (p_i, O(t_j)).$$

Моделирование события происходит следующим образом:

- на каждом шаге выполнения метка $m_i^{prm_i} = \{tm_k, (at_{k1}, at_{k2}, \dots, at_{N_k N_{ka}})^{his}\}$, имеющая цвет tm_k и находящаяся во входной позиции P_g по отношению к выполняемому переходу T_l , получает новые значения атрибутов в результате опроса датчиков СТС, и полученные значения присваиваются параметрам меток $(at_{k1}, at_{k2}, \dots, at_{N_k N_{ka}})'$;
- массив значений атрибутов метки цвета tm_k изменяется:

$$(at_{k1}, at_{k2}, \dots, at_{N_k N_{ka}})^1 := (at_{k1}, at_{k2}, \dots, at_{N_k N_{ka}})',$$

$$(at_{k1}, at_{k2}, \dots, at_{N_k N_{ka}})^{his+1} := (at_{k1}, at_{k2}, \dots, at_{N_k N_{ka}})^{his},$$

$$his = \overline{1, N_{his} - 1};$$

- при выполнении предусловия перехода T_l , связанного с входной позицией P_g , метка изымается и происходит коррекция коэффициентов уравнения $f_{kj}^{pro} = f^{pro}\{(at_{kj})^{his}\}$;
- при выполнении постусловий O_l тип и атрибуты метки изменяются в соответствии с функциями выходных дуг O_f ;
- в выходной позиции P_{g+1} для выполняющегося перехода T_l создается метка $m_{i+1}^{prm_{i+1}}$ с заданным цветом и атрибутами.

Использование модифицированного СФ в качестве средства создания имитационной модели позволяет построить частичный граф дерева достижимых маркировок (ДДМ).

Создание имитационной модели сложных динамических систем с использованием расширенного формализма СП рассмотрено на примере программно-измерительного комплекса развески локомотива.

Описание СТС и постановка задачи

Техническое состояние локомотивов является одной из основ надежности и безопасности движения подвижного состава. Не последнюю роль при этом играет взаимозависимость между состоянием пути и характером его использования. Для системы колесо—рельс характерны высокие и неравномерные динамические нагрузки, накопительный характер нагрузки, являющейся причиной износа и возникновения неисправностей. В связи с этим распределение статических нагрузок по элементам колесных пар на локомотивах требует специальной регулировки (развески), что способствует уменьшению степени износа колесных пар и, как следствие, сокращению

эксплуатационных расходов железнодорожного транспорта (рис. 1, см. четвертую сторону обложки).

В процессе испытания локомотива одним из основных пунктов является статическая развеска, позволяющая осуществить такое взаимное расположение его узлов и агрегатов, при котором было бы реализовано равномерное распределение нагрузок от колесных пар на рельсы.

Поставленная проблема решается с помощью программно-измерительного комплекса развески локомотива на основе использования имитационной модели.

Структура программно-измерительного комплекса

Отражение специфики поведения отдельных существенных элементов комплекса осуществляется декомпозицией в соответствии со структурой, приведенной на рис. 2. Технологические системы комплекса разделены на пять подсистем: 1) управление подсистемами; 2) датчики давления; 3) кнопочные пульты; 4) панели светодиодные (LED); 5) гидравлическая система.

Управление подсистемами работает в соответствии с регламентом проведения измерений:

- выполняется включение и отключение гидравлической системы: маслостанции, и запорной арматуры;
- обеспечивается контроль работоспособности датчиков давления и измерение давления;
- осуществляется выбор контролируемой оси и считывание данных с датчиков давления;
- контролируется работоспособность и отображение результатов измерения и расчета.

В комплексе используются сигналы следующего оборудования: датчиков давления, датчиков уровня, концевых выключателей запорной арматуры, слу-



Рис. 2. Структура программно-измерительного комплекса

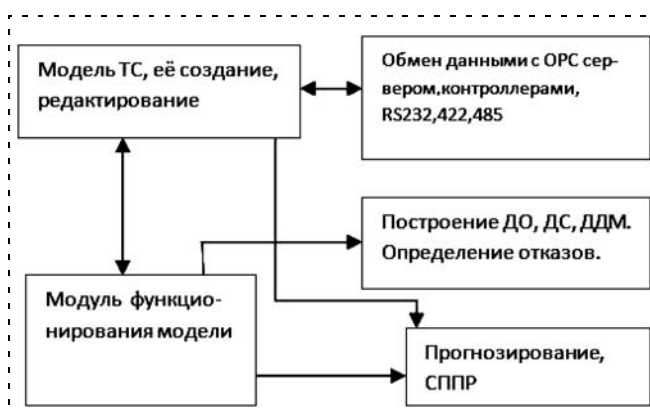


Рис. 3. Структура программной системы программно-измерительного комплекса

жебных сигналов системы управления светодиодными панелями, служебных сигналов системы управления маслонасосами.

Архитектура программной системы

Структура программной системы программно-измерительного комплекса отображена на рис. 3. Элементы структуры в дальнейшем называются модулями.

Программное обеспечение включает следующие модули:

1) модуль интерфейса пользователя — ввод задания на моделирование, управление интерфейсом пользователя;

2) создание, редактирование, модели СТС — создание и редактирование позиций, переходов, меток, дуг, заполнение деклараций, анализ соответствия СТС и построенной модели;

3) управляющий и измерительный модуль — связывание объектов (позиций и меток) модели с контроллерами и датчиками через OPC-сервер, а также другими устройствами, поддерживающими стандарт OPC;

4) моделирование функционирования СТС — построение дерева отказов (ДО), дерева событий (ДС) и ДДМ при возникновении отказа;

5) прогностический модуль — вывод и коррекция прогностических уравнений по состоянию модели;

6) модуль функционирования модели СТС.

Алгоритм работы диагностического комплекса представляется следующим образом: набор аналоговых и дискретных сигналов управления от оборудования (датчиков давления, концевых выключателей, запорной арматуры, LED) поступает на вход контроллеров или напрямую на вход компьютера по протоколу RS232. Набор получен-

УДК 681.518

Л. Б. Беленький, канд. техн. наук, ст. науч., сотр.,

С. Ю. Боровик, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.,

Б. К. Райков, ст. науч. сотр.,

Ю. Н. Секисов, д-р техн. наук, зав. лаб.,

О. П. Скобелев, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,

В. В. Тулупова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

Учреждение Российской академии наук

Институт проблем управления

сложными системами РАН, г. Самара

borovik@iccs.ru

Метод ускоренного получения информации о смещениях торцов лопаток в компрессорах и турбинах¹

Рассматривается новый метод получения информации о трех координатах смещений торцов лопаток за один период вращения лопаточного колеса с помощью распределенного по поверхности статора кластера одновитковых вихретоковых датчиков. Анализируются отличительные особенности метода, связанные с выполнением датчиками компенсационных функций в дифференциальной измерительной цепи, а также особенности коммутации датчиков в этой цепи.

Ключевые слова: метод ускоренного получения информации, координаты смещений торцов лопаток, лопаточное колесо, реализуемость метода, распределенный кластер, одновитковые вихретоковые датчики, чувствительные элементы в виде отрезка проводника

Введение. Известны методы получения информации о трех координатах смещений торцов лопаток с помощью распределенного кластера высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1, 2]. Методы предусматривают такое размещение кластера из трех чувствительных элементов (ЧЭ₁, ЧЭ₂, ЧЭ₃) ОВТД на статорной оболочке, при котором угловое расстояние между двумя точками в зонах чувствительности ЧЭ₁ и ЧЭ₂, названными виртуальными геометрическими центрами (ВГЦ), выбирается равным $1,5\Delta\psi_{\text{д}}$, где $\Delta\psi_{\text{д}}$ — угловой шаг установки лопаток на колесе

ротора, а расстояние между точками в зонах чувствительности ЧЭ₂ и ЧЭ₃ (второго и третьего ВГЦ) выбирается равным $\Delta\psi_{\text{д}}$.

Методы, рассматриваемые в указанных источниках, различаются длительностью получения информации, которая составляет либо три [1], либо два [2] периода вращения лопаточного колеса. При этом искомая информация фиксируется в моменты прохождения замками каждой лопатки каждого из трех ВГЦ, и в дифференциальной измерительной цепи (ИЦ), реализующей первый метод [1], функции рабочего ЧЭ закрепляются последовательно от периода к периоду за ЧЭ₁, ЧЭ₂, ЧЭ₃, а функции компенсационного выполняют на первом периоде ЧЭ₂ и на двух последующих — ЧЭ₁; если в ИЦ реализуется второй метод [2], то на первом периоде функции рабочих последовательно выполняют ЧЭ₁ и ЧЭ₂, а компенсационных — соответственно ЧЭ₂ и ЧЭ₁, на втором периоде функции рабочего закреплены за ЧЭ₃ и компенсационного — за ЧЭ₁.

Как отмечалось в работе [2], число периодов вращения лопаточного колеса определяет время получения информации о координатах смещения торцов всех лопаток и, как следствие, динамические возможности методов, дальнейшее улучшение которых возможно только в том случае, когда искомая информация по всем лопаткам будет получена в течение одного периода вращения лопаточного колеса.

Решению этой задачи и посвящена данная статья. В ней приводится описание нового метода ускоренного получения информации о трех координатах смещения торцов лопаток (за один период) и рассматриваются вопросы его реализации. При этом анализируются отличительные особенности метода, связанные с выполнением датчиками компенсационных функций в дифференциальной ИЦ, а также особенности коммутации датчиков в ИЦ на протяжении всего периода вращения лопаточного колеса.

Предлагаемый метод. На рис. 1 представлена плоская развертка фрагмента лопаточного венца, где в идеализированном виде изображены замки и торцы лопаток под номерами $n - 1, n, 1, 2$. На том же рисунке жирными линиями показаны ЧЭ распределенного кластера ОВТД (ЧЭ₁, ЧЭ₂, ЧЭ₃), топология размещения которых и ориентация ЧЭ относительно торцов лопаток аналогичны тем, что приведены в работах [1, 2] (для большей наглядности распределенный кластер представлен в сосредото-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-08-00422а).

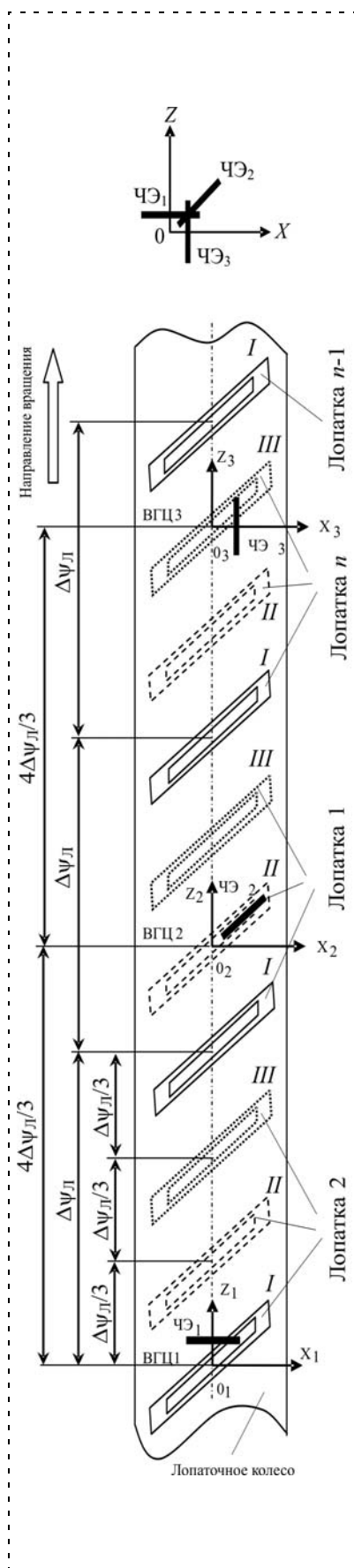


Рис. 1. Размещение ЧЭ датчиков в распределенном кластере относительно лопаток

ченном виде в правой верхней части рис. 1)².

Вместе с тем, в отличие от известных методов в предлагаемом методе предусмотрены смещения ВГЦ на расстояние $4\Delta\psi_{л}/3$ друг от друга и соответствующие смещения ЧЭ датчиков относительно ВГЦ. При этом ВГЦ в точках 0_1 , 0_2 , 0_3 совмещены с началами систем отсчета $X_1Y_1Z_1$, $X_2Y_2Z_2$, $X_3Y_3Z_3$, оси Z совпадают с направлением вращения, оси X соответствуют направлению оси вращения, а оси Y направлены по радиусу лопаточного колеса (по перпендикуляру к плоскости рисунка в точках 0_1 , 0_2 , 0_3).

Очевидно, что при выбранном расстоянии между ВГЦ ($4\Delta\psi_{л}/3$) в процессе вращения лопаточного колеса в зоне чувствительности одного из пары ЧЭ через каждые $\Delta\psi_{л}/3$ будет появляться торец лопатки, а это означает, что получение искомой информации по всем лопаткам станет возможным в течение одного, а не трех или двух периодов вращения, как это показано в [1, 2].

Действительно, при прохождении замка лопатки под номером 2 ВГЦ 1 в точке 0_1 ЧЭ₁ в дифференциальной ИЦ выполняет рабочую функцию (ЧЭ₁-Р), а ЧЭ₂ — компенсационную (ЧЭ₂-К) (следует отметить, что для роли компенсационного возможен выбор и ЧЭ₃, но его положение по отношению к ближайшей лопатке под номером $n-1$ менее благоприятно, чем у ЧЭ₂ по отношению к лопатке под номером 1³).

В рассматриваемом положении лопаточного колеса (рис. 1) контуры замков и торцов лопаток обведены сплошными линиями и

² ЧЭ размещены и ориентированы в соответствии с рекомендациями, изложенными в [3], которые обеспечивают разрешимость и сходимость системы уравнений, представляющих собой семейство функций преобразования (ФП), связывающих выходные параметры (индуктивности) ОВТД в составе кластера с координатами смещений торцов лопаток.

³ В идеале в зоне чувствительности компенсационного датчика не должны находиться торцы лопаток (или они должны находиться на максимально возможном расстоянии от ЧЭ).

дополнительно обозначены римскими цифрами I.

Очередные угловые перемещения лопаточного колеса на $\Delta\psi_{л}/3$ вызывают соответствующие изменения положения замков и торцов лопаток: на рис. 1 они занимают теперь вторую и третью позиции, на которых их контуры обведены штриховыми и пунктирными линиями и дополнительно обозначены римскими цифрами II и III, соответственно. При этом вторая позиция характеризуется прохождением замком лопатки под номером 1 ВГЦ 2 в точке 0_2 . В дифференциальной ИЦ функции рабочего выполняет ЧЭ₂ (ЧЭ₂-Р), а компенсационного — ЧЭ₃ (ЧЭ₃-К). И, наконец, третья позиция характеризуется прохождением замком лопатки под номером n ВГЦ 3 в точке 0_3 . В ИЦ функции рабочего выполняет ЧЭ₃ (ЧЭ₃-Р), а компенсационного — ЧЭ₁ (ЧЭ₁-К).

В табл. 1 сведены результаты анализа, иллюстрированные на рис. 1 тремя позициями лопаточного колеса, а также результаты анализа для всех последующих позиций на протяжении полного периода вращения лопаточного колеса. При этом в первой колонке

Таблица 1
Порядковые номера очередных перемещений лопаточного колеса, лопаток и чувствительных элементов датчиков

Позиция	Лопатки	Чувствительные элементы	
		рабочий	компенсационный
1	2	1	2
2	1	2	3
3	n	3	1
4	3	1	2
5	2	2	3
6	1	3	1
7	4	1	2
8	3	2	3
9	2	3	1
10	5	1	2
11	4	2	3
12	3	3	1
...	...	...	...
...	...	...	...
$3n-5$	n	1	2
$3n-4$	$n-1$	2	3
$3n-3$	$n-2$	3	1
$3n-2$	1	1	2
$3n-1$	n	2	3
$3n$	$n-1$	3	1

даны порядковые номера очередных перемещений лопаточного колеса (на угол $\Delta\psi_{\text{Л}}/3$), а в следующих колонках — порядковые номера лопаток, рабочих и компенсационных ЧЭ соответственно.

Как следует из табл. 1, после девятого по счету перемещения лопаточного колеса, т. е. после его поворота на $3\Delta\psi_{\text{Л}}$, для лопатки под номером 2 будет сформирована информация, достаточная для вычисления координат смещений торцов этой лопатки⁴.

Затем аналогичная информация будет получена для лопатки под номером 1 и т. д. согласно табл. 1. Если при этом после каждого поворота лопаточного колеса на угол $3\Delta\psi_{\text{Л}}$ будут вычисляться искомые координаты, то к моменту окончания периода вращения будут завершены вычисления координат для всех лопаток. И это выгодно отличает предлагаемый метод от известных [1, 2], в которых аналогичные результаты не могут быть получены на текущем периоде (в процессе сбора информации), а только спустя три [1] или два [2] периода вращения лопаточного колеса.

Реализуемость метода. В работах [1, 2] отмечается, что реализуемость методов, в которых используются как распределенные, так и сосредоточенные кластеры ОБТД, зависит от размещения и ориентации ЧЭ, что, в свою очередь, определяет разрешимость и сходимость системы уравнений, выражающих связь полученных с датчиков результатов преобразований и семейств ФП (ГХ). Для заданных геометрических параметров ЧЭ и лопаток с помощью модели их электромагнитного взаимодействия после серии вычислительных экспериментов найден вариант размещения и ориентации ЧЭ относительно лопаток, который обеспечивает разрешимость и сходимость уравнений и получение искомых координат x, y, z в диапазонах изменений около 1 мм (именно этот вариант размещения ЧЭ изображен на рис. 1 (см. примечание 2 и работу [3]). Разумеется, в указанных источниках речь идет о рабочих ЧЭ, включенных в дифференциальную ИЦ, т. е. предполагается, что замки лопаток проходят соответствующие ВГЦ, а их торцевые части находятся в зоне чувствительности ЧЭ-Р. Что же касается компенсационных ЧЭ в тех же ИЦ, то в момент получения измерительной информации ближайшие к ним лопатки должны находиться на максимально возможном расстоянии вне зоны чувствительности ЧЭ-К и согласно [1—4] — в положении между лопатками, т. е. на равном $(0,5\Delta\psi_{\text{Л}})$ расстоянии от них.

Однако в соответствии с предлагаемым методом это расстояние уменьшается до $\Delta\psi_{\text{Л}}/3$ (рис. 1) и существует возможность вторжения ближайшей ло-

⁴ Согласно [1—4] полученная информация представляется в виде триады цифровых кодов, а для вычисления координат необходимо решить систему из трех уравнений, каждое из которых представляет собой семейство ФП, полученное на моделях, или семейство градуировочных характеристик (ГХ), найденных экспериментально.

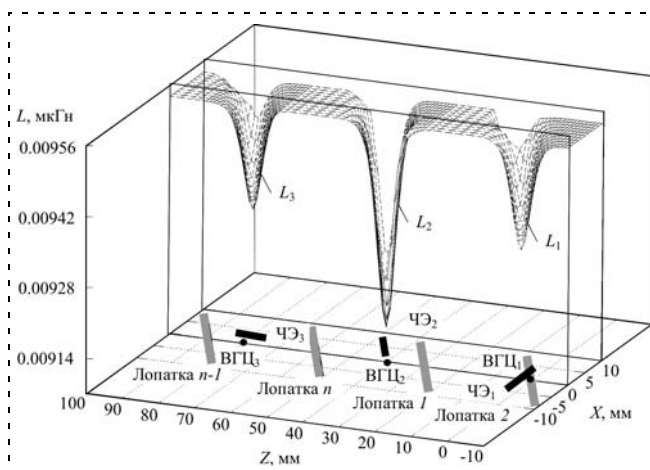


Рис. 2. Функции преобразования ЧЭ

патки в зону чувствительности ЧЭ-К, если шаг установки лопаток ($\Delta\psi_{\text{Л}}$) недостаточно велик (такой лопаткой, например, может оказаться лопатка под номером 1 в зоне чувствительности ЧЭ₂-К, когда в зоне чувствительности ЧЭ₁-Р находится лопатка под номером 2 (табл. 1, строка 1)).

Поэтому при решении вопросов реализуемости метода необходим анализ эффективности функционирования каждого из трех ЧЭ в качестве компенсационного, а для ее количественной оценки предлагается критерий, названный порогом чувствительности (ПЧ). Для определения ПЧ должны быть известны семейства ФП (или ГХ), по которым вычисляется чувствительность к смещениям торцов лопаток и выбираются ее пороговые значения.

Пусть для определения ПЧ используются семейства ФП, представленные в виде зависимостей выходных параметров (индуктивностей L) ЧЭ от координат смещений торцов лопаток (x, y, z). Тогда можно воспользоваться результатами, которые приводятся в работе [3] и получены с помощью модели, подробное описание которой представлено в работе [5]. Результаты расчета ФП изображены на рис. 2 в виде зависимостей

$$L_1 = f_1(x, z), L_2 = f_2(x, z), L_3 = f_3(x, z)$$

при постоянных и минимальных значениях y ($0,5 \text{ мм}$)⁵.

При этом изображения ФП "привязаны" к рис. 1, где линейный эквивалент углового шага $\Delta\psi_{\text{Л}}$ выбран равным 30 мм, а параметры модели — длина ЧЭ, длина торца имитатора лопатки и его высота составляют 10 мм, 20 мм и 13 мм соответственно.

На том же рисунке показаны проекции ЧЭ₁, ЧЭ₂, ЧЭ₃ и торцов лопаток на плоскость XZ , а также ВГЦ $0_1, 0_2, 0_3$.

Из рис. 2 следует, что изменения индуктивностей L_1, L_2, L_3 зависят от ориентации ЧЭ, а их наибольшее значение наблюдается у индуктивности L_2

⁵ Минимальное значение y (т. е. радиальный зазор) гарантирует максимальную чувствительность для всех ЧЭ в составе кластера.

(ЧЭ₂). Вместе с тем, при выбранном шаге $\Delta\psi_L$ хорошо просматриваются участки поверхности ФП, на которых изменения индуктивностей незначительны. Очевидно, что на этих участках и следует искать ПЧ для каждой пары компенсационных и рабочих ЧЭ в распределенном кластере (ЧЭ₂-К, ЧЭ₁-Р; ЧЭ₃-К, ЧЭ₂-Р; ЧЭ₁-К, ЧЭ₃-Р).

На рис. 3 приведены зависимости чувствительностей ЧЭ₁, ЧЭ₂, ЧЭ₃ от координат смещений x и z ,

которые определяются по формуле $S_i = \sqrt{S_{ix}^2 + S_{iz}^2}$, где S_{ix} и S_{iz} — проекции чувствительности S_i на оси X и Z ($i = 1, 2, 3$ — порядковый номер ЧЭ). При этом проекции S_{ix} и S_{iz} вычисляются по данным, полученным при расчетах ФП: $S_{ix} = \Delta L_x / \Delta x$, $S_{iz} = \Delta L_z / \Delta z$, где Δx и Δz — выбранные значения шага по осям X и Z , а ΔL_x и ΔL_z — соответствующие проекции изменений индуктивностей.

Как следует из рис. 3, чувствительности S_1 , S_2 , S_3 имеют форму "воронки", причем в идеале ее "глубина" достигает нулевого уровня⁶.

Как и ожидалось, наибольшей чувствительностью характеризуется ЧЭ₂, размещенный под углом 45° к оси Z (параллельно торцу лопатки).

Представляется очевидным, что при выборе значения ПЧ следует учитывать не только чувствительность каждого ЧЭ в кластере, но и соотношения между ними в парах (табл. 1), от которых зависят погрешности системы, реализующей предложенный метод, а также шаг лопаток, установленных на лопаточном колесе. Действительно, в существующих системах, предназначенных для получения информации о координатах смещений (в том числе и радиальный зазор), семейства ГХ (зависимости цифрового кода в каналах ОВТД от искомым координат) определяются экспериментально. Методика получения семейств ГХ [4] предусматривает использование специально разработанного градуировочного устройства, обеспечивающего эталонные смещения торца лопатки в заданных диапазонах по координатным осям X , Y , Z относительно исследуемого рабочего ЧЭ. При этом компенсационный датчик (ЧЭ) отдален от торца лопатки, который ни при каких смещениях не попадает в зону его чувствительности. Оба ЧЭ (рабочий и компенсационный) включены в дифференциальную ИЦ, но ее выходные сигналы определяются только изменениями индуктивности рабочего ЧЭ, связанными со смещениями лопатки в процессе градуировки⁷.

При этом в реальных условиях, когда ЧЭ датчиков размещены на статорной оболочке в соответствии с рис. 1 и 2, вторжения лопатки в зону ЧЭ,

⁶ Поскольку чувствительности рассчитываются по приращению, то "глубина" зависит от величины приращений и уменьшается с их увеличением.

⁷ Как известно, использование компенсационных ЧЭ в дифференциальной ИЦ призвано уменьшить погрешности, вызванные мешающими факторами (в первую очередь, температуры, изменения которой в турбинах достигают 1500 °С).

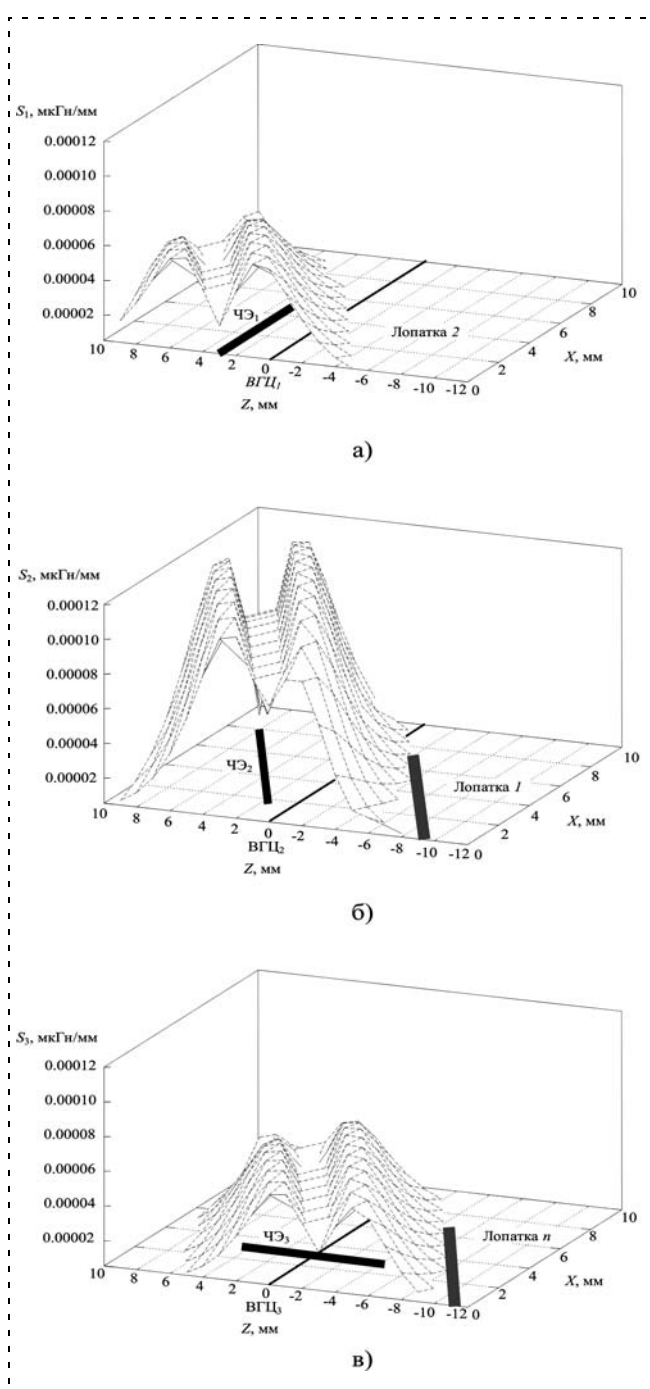


Рис. 3. Зависимости чувствительности ЧЭ от координат (S_1 (а), S_2 (б) и S_3 (в))

выполняющего компенсационные функции, будут вызывать (и это отмечалось ранее) непредусмотренные методикой градуировки погрешности. Допустимое значение этих погрешностей и должен регламентировать выбранный ПЧ. Пусть, например, ПЧ ($S_{ПЧ}$) составляет $6 \cdot 10^{-6}$ мкГн/мм, и выбранному ПЧ соответствуют начала отсчета по вертикальным осям (S_1 , S_2 , S_3), расположенные в горизонтальных плоскостях XZ (рис. 3). Линии пересечения функций $S_1(x, y)$, $S_2(x, y)$, $S_3(x, y)$ с плоскостями XZ определяют границы выбранного ПЧ компенса-

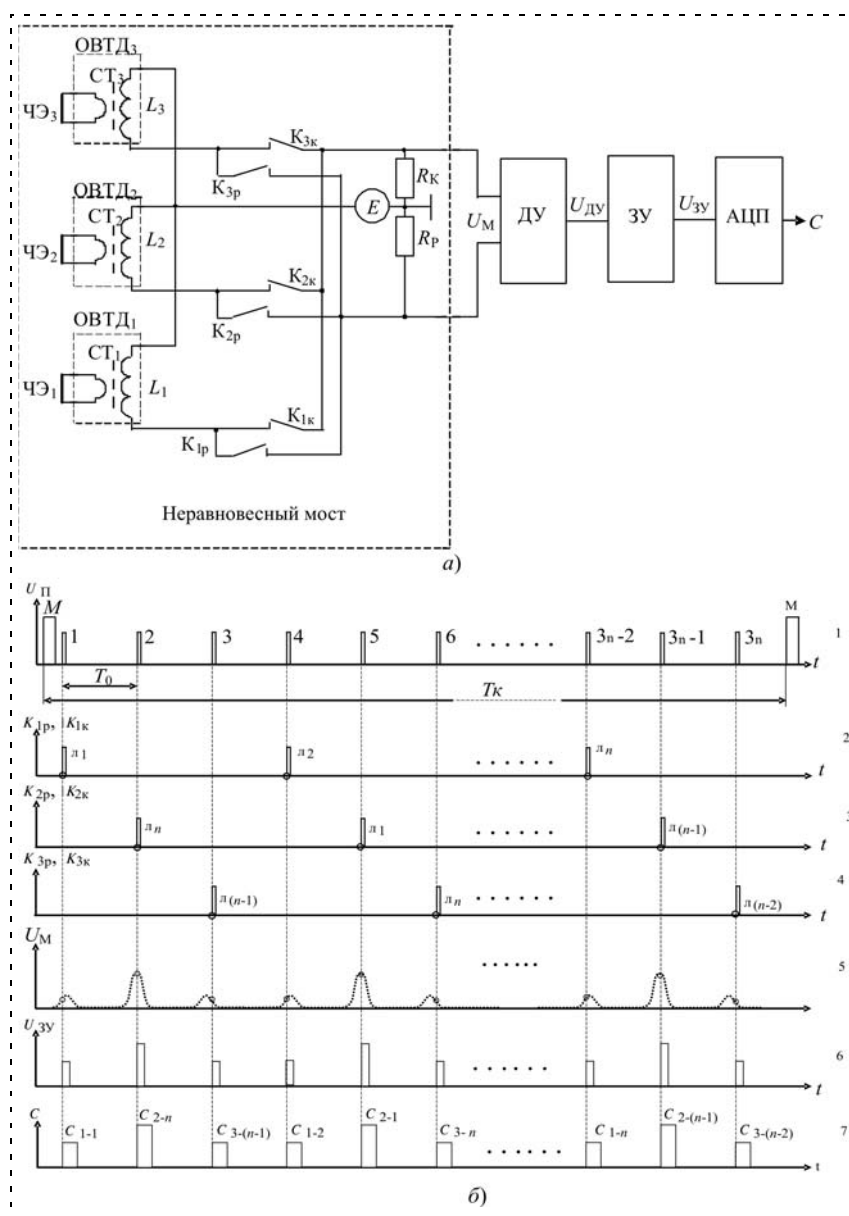


Рис. 4. Измерительная цепь (а) и временные диаграммы (б)

онного ЧЭ. Это означает, что на всех возможных режимах работы компрессора или турбины торцы лопаток могут находиться только вне зоны чувствительности ЧЭ-К (с внешней стороны границы, где $S < S_{ПЧ}$). Касания проекцией торца лопатки границы на плоскости XZ фиксируют предельно возможные положения лопаток (когда $S = S_{ПЧ}$). При этом по утроенному расстоянию между центрами лопаток и соответствующими ВГЦ можно найти минимально допустимый шаг лопаток на лопаточном колесе, который ограничивает применение метода.

Если в соответствии с табл. 1 (строка 1) работает пара ЧЭ₁-Р и ЧЭ₂-К, т. е. контролируется лопатка 2, а лопатка 1 касается границы, то относительную приведенную погрешность (δ) системы, вносимую ИЦ, можно оценить отношением ПЧ ($S_{ПЧ}$) к максимальной чувствительности (S_{1m}) ЧЭ₁-Р (т. е. $\delta = S_{ПЧ}/S_{1m}$)

(рис. 1, 2, 3, б). Приблизленно погрешность δ составляет 0,1 (10 %), а минимально допустимый шаг лопаток в линейном выражении — около 30 мм. Подобные оценки в парах ЧЭ₂-Р и ЧЭ₃-К, а также ЧЭ₃-Р и ЧЭ₁-К составляют около 0,05 (5 %) и 35 мм, 0,1 (10 %) и 20 мм соответственно. Из перечисленных числовых значений выбираются наибольшие — погрешность 0,1 (10 %) и шаг 35 мм.

Погрешность δ уменьшается с понижением ПЧ, но при этом увеличивается минимально допустимый шаг лопаток⁸.

Далее рассматриваются вопросы реализации предлагаемого метода, связанные с ИЦ. Предназначенные для решения аналогичной задачи получения информации о трех координатах смещений торцов лопаток ИЦ [2, 3] содержат мостовую схему с тремя ключами, осуществляющими коммутацию питания трех ОВТД в составе кластера, дифференцирующее и запоминающее устройства (ДУ, ЗУ) и АЦП. Коммутация датчиков обеспечивает также импульсное питание мостовой схемы, предусмотренное реализуемым в ИЦ методом первой производной [4], а для получения однополярного сигнала на выходе мостовой схемы в нее вводится дополнительная катушка индуктивности.

На рис. 4, а представлена ИЦ, реализующая предлагаемый метод, которая содержит те же элементы: неравносильный мост с датчиками⁹, ДУ, ЗУ и АЦП, но отличается от ИЦ в работах [2, 3] схемой коммутации датчиков (ОВТД₁, ОВТД₂, ОВТД₃). Это, с одной стороны, связано со спецификой пред-

лагаемого метода, а с другой — с требованием однополярного напряжения на выходе моста (U_M), удовлетворить которое в рассматриваемой ИЦ с помощью дополнительной катушки индуктивности не

⁸ Указанные ограничения могут быть устранены при использовании иной методики градуировки, предусматривающей замену в градуировочном устройстве одной лопатки группой из четырех лопаток (см. рис. 1) и одного рабочего ОВТД — кластером из трех датчиков. Процедура градуировки ИЦ сохраняется, но она проводится последовательно при включении в ИЦ трех пар рабочих и компенсационных ЧЭ, когда в полученных ГХ учитывается влияние ближайших к компенсационным ЧЭ лопаток (в их зонах чувствительности). Однако такая модернизация градуировочного устройства серьезно усложняет его конструкцию и экспериментальную установку в целом, поскольку процесс градуировки должен сопровождаться изменениями температуры в диапазонах, соответствующих ее вариациям в газозвуковом тракте.

⁹ В составе датчиков на рис. 4, а показаны согласующие трансформаторы (СТ₁, СТ₂, СТ₃) [4].

Пары ключей и соответствующие пары чувствительных элементов

Ключи	Чувствительные элементы
K_{1P}, K_{2K}	$ЧЭ_1-P, ЧЭ_2-K$
K_{2P}, K_{3K}	$ЧЭ_2-P, ЧЭ_3-K$
K_{3P}, K_{1K}	$ЧЭ_3-P, ЧЭ_1-K$

представляется возможным. Однополярность U_M обеспечивается применением вдвое большего числа ключей по сравнению с аналогичными схемами в работах [2, 3]. Ключи разделены на две группы, названные рабочими (K_{1P}, K_{2P}, K_{3P}) и компенсационными (K_{1K}, K_{2K}, K_{3K}). Рабочие ключи (при замыкании) возбуждают ток в LR -контуре "источник питания E —датчик, выполняющий рабочую функцию (он же — рабочее плечо моста)—резистор R_P (плечо моста, на котором объединены рабочие ключи)—источник E ".

Компенсационные ключи, которые замыкаются синхронно с рабочими, возбуждают ток в LR -контуре "источник E —датчик, выполняющий компенсационную функцию (он же — компенсационное плечо моста)—резистор R_K (плечо моста, на котором объединены компенсационные ключи)—источник E ".

С увеличением токов в обоих контурах возрастает напряжение на выходе моста (U_M), которое дифференцируется в ДУ, а максимум напряжения $U_{ДУ}$ запоминается в ЗУ и преобразуется в цифровой код (C) на выходе АЦП.

Получению информации о координатах смещений предшествует измерение периода вращения лопаточного колеса (T_K), которое осуществляется с помощью "меток" (M) (эпюра 1, рис. 4, б) аналогично [2, 3]. По результатам измерения T_K вычисляются моменты прохождения замками лопаток ВГЦ (точек $0_1, 0_2, 0_3$) в зонах чувствительности рабочих ЧЭ распределенного кластера, а также период импульсов питания мостовой схемы $T_0 = T_K/3 \cdot n_L$, где n_L — число лопаток, причем период T_0 строго соответствует повороту колеса на угол $\Delta\psi_L/3$.

Импульсы питания ($U_{П}$) формируются при синхронном замыкании пар ключей $K_{1P}-K_{2K}, K_{2P}-K_{3K}, K_{3P}-K_{1K}$ (в диагональ моста включен источник постоянного напряжения E). Длительность импульсов питания невелика (доли мкс), но достаточна для фиксации максимума производной в ЗУ (эпюра 1).

Импульсы управления парами рабочих и компенсационных ключей показаны, на эпюрах 2...4, а соответствующие им пары рабочих и компенсационных датчиков (ЧЭ) представлены в табл. 2, причем на эпюрах 2...4 точками обозначены моменты прохождения лопатками ВГЦ, а также указаны номера контролируемых лопаток.

На эпюрах 5...7 изображены напряжения на выходах мостовой схемы (U_M)¹⁰, ЗУ ($U_{ЗУ}$) и АЦП (C). В двойных индексах цифровых кодов $U_{ЗУ}$ и C первая цифра соответствует порядковым номерам ВГЦ и ЧЭ, а вторая — номерам лопаток. Триады кодов, полученных с рабочих ЧЭ₁, ЧЭ₂, ЧЭ₃ для одной и той же лопатки, позволяют найти искомые координаты смещения торца выбранной лопатки. Процедура вычислений повторяется для каждой лопатки.

¹⁰ Пунктирные линии означают изменение U_M в предположении уменьшения периода импульсов питания.

В качестве ключей в ИЦ (рис. 4, а) предусмотрено использование униполярных транзисторов.

В работе [3] исследовалось влияние остаточных параметров таких ключей (межэлектродных сопротивлений и емкостей) с учетом индуктивностей и сопротивлений датчиков, а также параметров операционного усилителя (ОУ) в режиме дифференцирования. Исследования проводили на модели поведения эквивалентной схемы ИЦ, включающей неравновесный мост с импульсным питанием и дифференцирующий усилитель на его выходе. Приведены подробные описания методики исследований, эквивалентных схем, модели и полученных результатов.

Подобные исследования проводили и на моделях поведения эквивалентных схем аналогичных элементов ИЦ, представленных на рис. 4, а. Однако, несмотря на отличительные особенности коммутационных цепей, чтобы избежать возможных повторов, авторы считают нецелесообразным включать в статью описания эквивалентной схемы и ее модели, ограничившись результатами исследования влияния остаточных параметров ключей.

Оценку влияния проводили по изменению максимального значения напряжения на выходе ДУ ($U_{ДУm}$) в сравнении с идеальными ключами. Эти изменения не превышали 2 %, что сопоставимо с аналогичными оценками в работе [3] (вычислительные эксперименты на моделях проводили для равных или близких значений остаточных параметров униполярных транзисторов, ОУ, индуктивностей датчиков и сопротивлений, которые приведены в указанном источнике).

Заключение. Разработан новый метод ускоренного получения информации о трех координатах смещений торцов лопаток с помощью распределенного кластера ОБТД, который обеспечивает получение искомой информации всего за один период вращения лопаточного колеса, что в 2...3 раза меньше, чем в известных методах.

В процессе анализа реализуемости разработанного метода получены оценки погрешностей, связанные с выполнением датчиками компенсационных функций, и минимально допустимых значений шага лопаток, разработаны ИЦ с дополнительными ключами коммутатора в мостовой схеме, обеспечивающими однополярный сигнал на выходе, и исследовано влияние остаточных параметров ключей. Полученные результаты подтверждают состоятельность разработанного метода.

Список литературы

1. Беленький Л. Б., Боровик С. Ю., Логвинов А. В., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В. Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Часть 1. Обоснование предлагаемых методов и их описание // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 4. С. 16—19.
2. Беленький Л. Б., Боровик С. Ю., Логвинов А. В., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В. Уменьшение длительности получения информации о смещениях торцов лопаток // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 5. С. 53—59.

3. Беленький Л. Б., Боровик С. Ю., Логвинов А. В., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В. Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Часть 2. Реализуемость методов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 1. С. 21—30.
4. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю. Н. Секисова, О. П. Скобелева / Самара: СамНЦ РАН, 2001. 188 с.
5. Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Тулупова В. В. Функции преобразования кластерного одновиткового вихретокового датчика // Автометрия. 2008. № 1. С. 47—58.

УДК 62-523.6

А. Н. Шемякин¹, науч. сотр.,

М. Ю. Рачков², д-р техн. наук, проф.,

Н. Г. Соловьев¹, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб.,

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

² Московский государственный
индустриальный университет
michyur@gmail.com

Исследование влияния натекания воздуха в газовый контур на мощность излучения лазерного технологического комплекса. Часть 1

Исследовано влияние натекания воздуха в газовый контур на мощность излучения лазерного технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом и предложен метод, который расширяет диагностические возможности системы управления, позволяя контролировать натекание воздуха в газовый контур лазера.

Ключевые слова: лазерный технологический комплекс, несамостоятельный тлеющий разряд, мощность излучения лазера, газовый контур, диагностика, система управления

Лазерные технологические комплексы (ЛТК) широко используются в современном машиностроении и металлообработке. Необходимым условием для их применения является полная автоматизация на базе современных систем управления. Лазерный комплекс представляет собой сложную техническую систему, поэтому одной из важных задач автоматизации становится диагностика неисправностей, которые могут возникнуть в процессе его работы. Натекание воздуха в газовый контур лазера является трудно диагностируемой неисправностью, приводящей к снижению мощности излучения. Существующий метод диагностики натекания позволяет выявить только большое (~1 мм рт. ст.) натекание воздуха, произошедшее за длительный (~20 ч) период времени [1].

В статье рассматривается влияние натекания воздуха в газовый контур на мощность излучения ЛТК с несамостоятельным тлеющим разрядом (НТР), который представляет собой универсальный двухкоординатный комплекс портального типа с перемещением оптики [2]. Он предназначен для резки, сварки и модификации поверхности различных материалов. Комплекс состоит из технологического лазера, микропроцессорного устройства управления и координатного стола с персональным компьютером для ввода управляющих программ.

Важнейшим элементом ЛТК является лазер, в основе которого лежит оригинальный способ организации тлеющего разряда в камере большого объема — несамостоятельный тлеющий разряд с импульсной емкостной ионизацией [3]. Это комбинированный разряд, в котором функции создания проводимости плазмы и вклада энергии разделены между двумя различными типами разрядов. Проводимость (ионизация) обеспечивается импульсным емкостным разрядом, а вклад энергии — прохождением тока основного разряда через плазму с концентрацией электронов, задаваемой ионизацией. Такой способ организации разряда определяет основные преимущества лазера:

- быстрое управление мощностью излучения;
- возможность работы как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме с регулируемой скважностью и длительностью импульсов, возможность перехода из одного режима в другой;
- высокую оптическую однородность и стабильность разряда;
- высокое качество излучения;
- простоту электродной системы — отсутствует секционирование и балластирование электродов;
- высокий КПД;
- малое потребление рабочих газов, возможность работы в отпаянном режиме и на смесях без содержания гелия.

Лазер выполнен в виде моноблока, который требует подвода охлаждающей воды, электроэнергии, сжатого воздуха и рабочих газов [4].

Внешний вид лазера показан на рис. 1.

Активной средой лазера является рабочая смесь газов, которая находится в герметичном газовом контуре 1. Основные части контура выполнены из коррозионно-стойкой стали и герметично соединены между собой. В нижней части газового контура расположено устройство прокачки газа, состоящее из двух осевых вентиляторов типа 8А-6311-00. В качестве привода вращения применяются два электрошпинделя ШЛ9/2.2. Устройство управления электрошпинделями позволяет изменять частоту вращения вентиляторов, регулируя тем самым скорость газа в камере в диапазоне 0...70 м/с. Газ, разогнанный вентиляторами, проходит через входную поворотную секцию газового контура и попадает в разрядную камеру, расположенную в верхней части контура. В камере организуется объемный тлеющий разряд, осуществляющий возбуждение газовой смеси. Нагретый в разряде газ через выходную поворотную секцию попадает в теплообменник, где остывает до температуры, близкой к температуре охлаждающей воды, и снова попадает в вентилятор. За вентиляторами расположен теплообменник, снимающий тепло, полученное газом при прохождении вентилятора. Таким образом, газ движется по замкнутому циклу.

Система газообмена, которая расположена в системном блоке 2, позволяет откачивать газовый контур с помощью встроенного вакуумного насоса до остаточного давления 0,1 мм рт. ст. и наполнять его газовой смесью с заданным соотношением компонентов: 18 мм рт. ст. азота, 16 мм рт. ст. гелия и 2,5 мм рт. ст. углекислого газа. Давление рабочей смеси в контуре — 36,5 мм рт. ст.

Схема системы газообмена приведена на рис. 2.

Подача рабочих газов в контур и ресивер происходит через пневмораспределители.

При напуске углекислый газ, азот и гелий из баллонов 1, 2, 3 через редукторы 4, 5, 6 и пневмораспределители 7, 9, 11 непосредственно подаются в газовый контур. Смесь приготавливается по парциальному давлению каждой компоненты. Пневмораспределители включаются по очереди. При работе в режиме обмена газовой смеси ресивер через пневмораспределители 8, 10, 12 заполняется до заданного давления газами в том же соотношении, что и газовый контур. Затем по мере необходимости включается пневмораспределитель 13, и газы из ресивера поступают в контур. При уменьшении давления в ресивере ниже заданного вновь происходит его наполнение. Давление смеси газов в контуре и ресивере контролируется измерительными преобразователями 14, 15. Вакуумный насос откачивает газовый контур перед напуском рабочей смеси и рабочую смесь газов в процессе обмена. Насос подключен к контуру через вакуумный клапан 16.

Натекание воздуха в газовый контур лазера приводит к снижению мощности излучения. Это объясняется тем, что происходит потеря электронов, созданных в газе импульсами ионизации за счет



Рис. 1. Лазер с несамостоятельным тлеющим разрядом:
1 — газовый контур; 2 — системный блок; 3 — микропроцессорное устройство управления

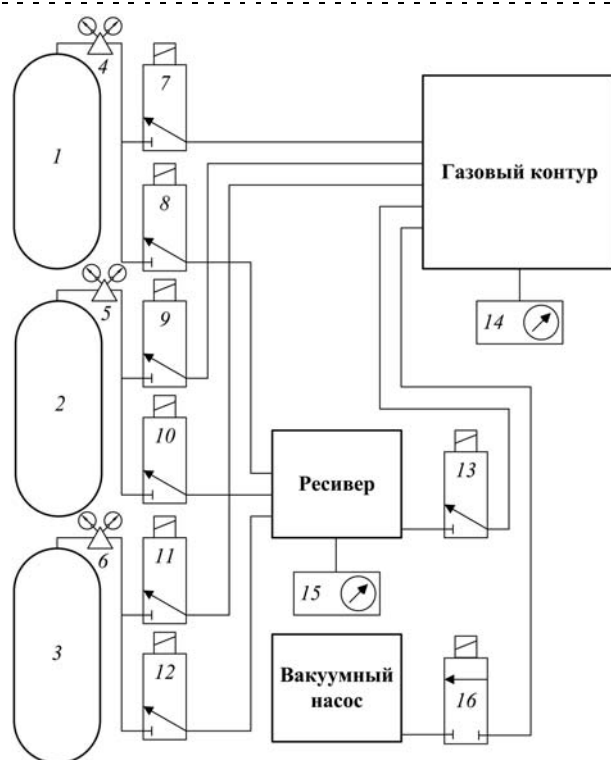


Рис. 2. Схема системы газообмена:
1 — баллон с углекислым газом; 2 — баллон с азотом; 3 — баллон с гелием; 4–6 — редуктор ДКП-1-65; 7–13 — пневмораспределители ПРЭЗ/2,5; 14, 15 — измерительный преобразователь "Сапфир 22ДА"; 16 — вакуумный клапан КВМ25

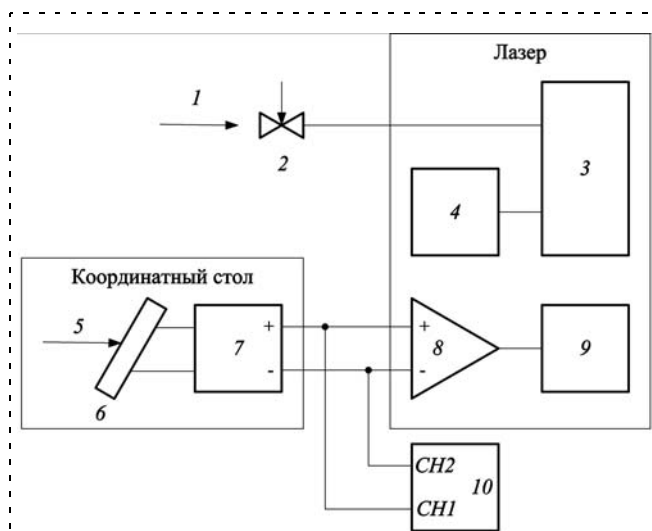


Рис. 3. Схема эксперимента:

1 — воздух; 2 — регулировочный игольчатый клапан; 3 — газовый контур; 4 — система газообмена; 5 — лазерное излучение; 6 — термоэлектрический зеркало-приемник; 7 — предварительный усилитель; 8 — окончательный дифференциальный усилитель; 9 — устройство измерения и стабилизации мощности; 10 — цифровой запоминающий осциллограф

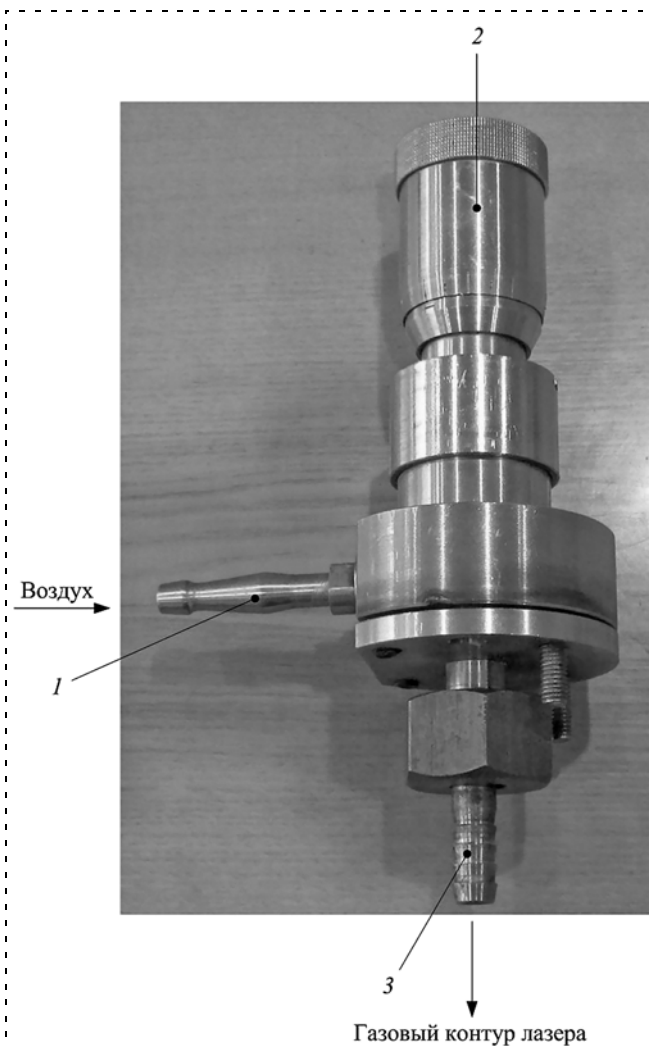


Рис. 4. Регулировочный игольчатый клапан:

1 — входной штуцер; 2 — микрометрический винт; 3 — выходной штуцер

процессов прилипания, сопровождающегося образованием отрицательных ионов кислорода. Кроме того, концентрацию электронов уменьшают молекулы воды, которые присутствуют в воздухе [5].

Схема измерительного эксперимента

Схема эксперимента приведена на рис. 3.

В газовый контур лазера 3, предварительно заполненный рабочей смесью газов с помощью системы газообмена 4, через регулировочный игольчатый клапан 2 добавляется воздух 1. Лазерное излучение 5 подается на термоэлектрический зеркало-приемник 6, которое установлено во втором блоке поворотных зеркал координатного стола.

Сигнал с зеркала-приемника 6 поступает на предварительный усилитель 7. Прямой и инверсный сигналы с этого усилителя передаются в лазер на окончательный дифференциальный усилитель 8, который усиливает поступившие сигналы, подавляя при этом синфазные помехи, возникшие при передаче сигналов. Сигнал с усилителя 8 поступает в устройство измерения и стабилизации мощности лазера 9. Прямой и инверсный сигналы предварительного усилителя 7 регистрируются каналами CH1, CH2 цифрового запоминающего осциллографа 10. Основные параметры осциллографа TDS2014 фирмы Tektronix приведены ниже.

Число каналов	4
Полоса пропускания, МГц	100
Разрядность АЦП	8
Погрешность измерений	$\pm(3\% \cdot \text{показание} + 0,1 \text{ дел.} + 1 \text{ мВ})$
Частота выборки, $10^9/\text{с}$	1,0
Число отсчетов на каждый канал	2500
Связь с персональным компьютером	Коммуникационный модуль TDS2MEM с памятью 514 Мбайт

Регулировочный игольчатый клапан представлен на рис. 4.

Воздух поступает в клапан через входной штуцер 1. Микрометрический винт 2, перекрывающий канал подачи воздуха игольчатым штоком, регулирует подачу воздуха в выходной штуцер 3. Регулировочный клапан откалиброван с помощью измерительного преобразователя "Сапфир 22ДА" класса точности 0,5, который измеряет давление смеси газов в контуре. В предварительно откачанный газовый контур с помощью регулировочного клапана напускался воздух. Измерялось время, необходимое для достижения парциального давления воздуха 1 мм рт. ст. Клапан откалиброван таким образом, что для этого требуется 1122 с. Таким образом, для того, чтобы напускать воздух с минимальным шагом 0,025 мм рт. ст., следует открывать клапан на 28 с.

В качестве приемника лазерного излучения было выбрано термоэлектрическое зеркало-приемник с анизотропией термоЭДС в пленках на основе висмута, теллура или других материалов, осажденных при наклонном угле конденсации [6]. Принцип

действия приемника основан на возникновении термоЭДС в плоскости анизотропной пленки вследствие температурного градиента, создаваемого нагревом внешней поверхности пленки поглощенным излучением. Основными преимуществами приемника являются непосредственное измерение мощности широкоапертурного (диаметр 20...50 мм) интенсивного излучения и высокое быстродействие ($\sim 10^{-5}$ с). Термоэлектрическое зеркало-приемник с анизотропией термоЭДС обладает линейной характеристикой в диапазоне мощности от 0 до 3 кВт и может быть использовано в качестве датчика при исследовании временных характеристик мощности лазерного излучения ЛТК с НТР [7].

Предварительная обработка результатов эксперимента

В серии экспериментов исследовали зависимость мощности лазерного излучения от частоты импульсов ионизации при парциальном давлении воздуха 0; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1 мм рт. ст. Осциллограммы мощности излучения снимали при частоте импульсов ионизации 1540, 2190, 2550 и 2730 Гц. Обратная связь в устройстве измерения и стабилизации мощности отключалась для того, чтобы она не смогла компенсировать падение мощности, вызванное натеканием воздуха, и исказить результаты эксперимента.

Пример осциллограммы сигналов с зеркала-приемника приведен на рис. 5.

Маркер на вертикальной стороне экрана слева указывает нулевой уровень сигналов каналов 1, 2. Записано по 200 точек на каждый канал с частотой выборки $1 \cdot 10^6$ с $^{-1}$. Сигналы с зеркала-приемника соответствуют мощности лазерного излучения при частоте ионизации 2190 Гц и парциальном давлении воздуха 0,1 мм рт. ст.

Цифровые осциллограммы мощности лазерного излучения были записаны в компьютер для последующей обработки.

Сигнал с зеркала-приемника U определяется как

$$U = U_{CH1} - U_{CH2},$$

где U_{CH1} — сигнал с прямого выхода предварительного усилителя 7 (см. рис. 3); U_{CH2} — сигнал с инверсного выхода предварительного усилителя 7.

Мощность лазерного излучения равна $W = kU$, где $k = 2478,4$ Вт/В — коэффициент преобразования схемы зеркало-приемник—усилитель.

На рис. 6 показана форма сигнала мощности W , соответствующая осциллограмме на рис. 5.

На этом рисунке ясно видны амплитудные изменения мощности лазерного излучения с частотой импульсов ионизации и помехи, наводимые на сигнал этими импульсами.

Для устранения помех от импульсов ионизации применимо линейное сглаживание экспериментальной кривой по пяти точкам [8]. Экспериментальная кривая W заменяется сглаженной кривой W_s . Для

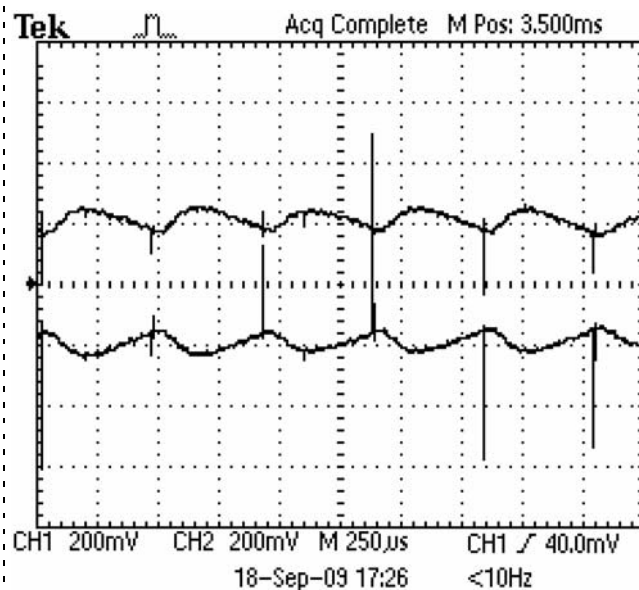


Рис. 5. Осциллограмма сигналов с зеркала-приемника (цена деления по вертикали — 200 мВ, цена деления по горизонтали — 250 мкс)

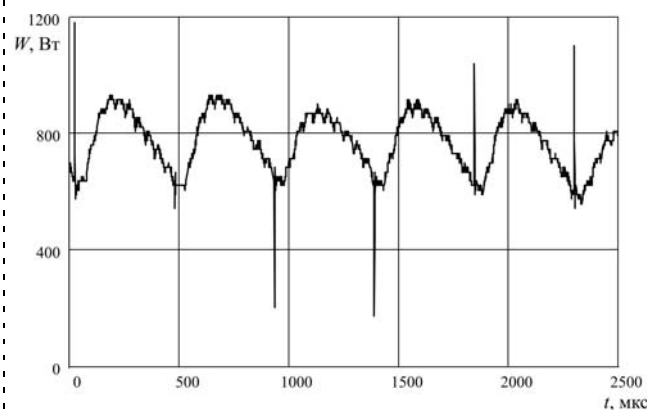


Рис. 6. Мощность лазерного излучения W при частоте ионизации 2190 Гц и парциальном давлении воздуха 0,1 мм рт. ст.

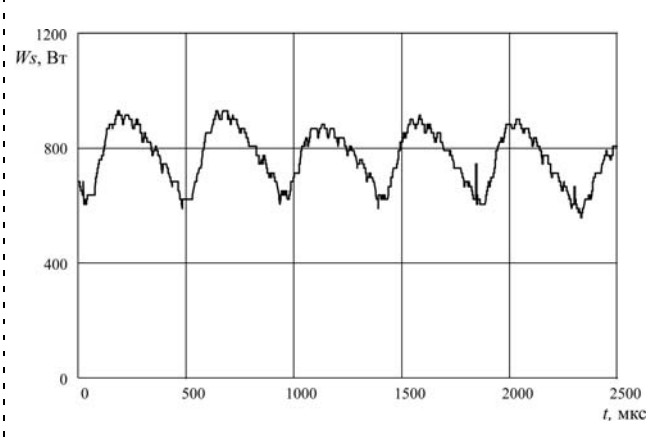


Рис. 7. Сглаженная мощность лазерного излучения W_s при частоте ионизации 2190 Гц и парциальном давлении воздуха 0,1 мм рт. ст.

сглаживания воспользуемся функцией *medsmooth* программы компьютерной математики MathCAD [9].

На рис. 7 показан результат линейного сглаживания по пяти точкам экспериментальной кривой, изображенной на рис. 6.

Помехи от импульсов ионизации исчезли и можно перейти к определению параметров лазерного излучения.

Список литературы

1. **Лазер** газовый технологический комбинированного действия ЛГТ-2.02 УХЛ4.2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИЕГВ 433713.001 ТО. Ленинград: ВНИИЭСО, 1988. Ч. 1. 125 с.

2. **Шемякин А. Н., Рачков М. Ю.** Выбор способа управления мощностью излучения лазерного технологического комплекса с

несамостоятельным тлеющим разрядом // Известия МГИУ. 2009. № 3 (16). С. 25–31.

3. **А. с. 615795 СССР, МКИ³ НОИС 3/22.** Способ получения непрерывного тлеющего разряда / Н. А. Генералов, В. П. Зимаков, В. Д. Косынкин [и др.]. Оpubл. 21.03.1978.

4. **Технологический лазер Лантан-3** / О. М. Бойцов, В. М. Верин, Н. А. Генералов [и др.] — М: ИПМ АН СССР, 1989. Препринт № 407. 38 с.

5. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда. 3-е изд., перераб. и доп. Долгопрудный: Издат. Дом "Интеллект", 2009. 736 с.

6. **Глебов В. Н., Мананков В. М.** и др. Термoeлектрическое зеркало-приемник лазерного излучения // Известия РАН. Сер. физическая. 1993. Т. 57, № 12. С. 167–169.

7. **Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Якимов М. Ю.** Измерение мощности лазерного излучения технологического комплекса с самостоятельным тлеющим разрядом // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 2 (19). С. 22–29.

8. **Румшинский Л. З.** Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971. 192 с.

9. **Дьяконов В. П.** Mathcad 11/12/13 в математике. Справочник. М.: Горячая линия — Телеком, 2007. 958 с.



🎉 Поздравляем Юбилера! 🎉

*Профессору кафедры «Автоматика»
Новосибирского государственного технического университета,
действительному члену Международной академии наук высшей школы,
руководителю научно-образовательного центра
«Системы автоматического управления, мехатроники и робототехники»,
члену редколлегии журнала «Мехатроника, автоматизация, управление»,
лауреату Премии Президента РФ, Заслуженному деятелю науки РФ,
доктору технических наук, профессору*

Анатолию Сергеевичу ВОСТРИКОВУ *исполнилось 70 лет*

А. С. Востриков — известный ученый, крупный специалист в области автоматике и процессов управления, основатель и руководитель одной из ведущих отечественных научных школ по автоматическому управлению сложными динамическими объектами, крупный организатор науки и высшего образования, активный общественный деятель. С 1990 по 2005 гг. являлся ректором Новосибирского государственного технического университета и заместителем Председателя Совета ректоров России.

Анатолий Сергеевич внес огромный вклад в развитие современной теории и практики автоматического и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами. Им разработано новое научное направление в теории синтеза нелинейных автоматических систем — метод локализации. Полученные теоретические и практические результаты показали эффективность применения данного метода при синтезе систем регулирования для широкого спектра объектов промышленности, энергетики и транспорта (дуговые сталеплавильные печи, металлорежущие станки, системы кондиционирования и системы испытания летательных аппаратов, машины литья пластмассовых изделий и др.).

Под руководством А.С.Вострикова защищены 10 докторских и более 30 кандидатских диссертаций. Он является автором более 200 научных работ, включая 3 монографии, 4 учебных пособия, а также 30 авторских свидетельств на изобретения. В научной среде А.С. Востриков пользуется заслуженным авторитетом: он является почетным профессором Харбинского технического университета, Самарского государственного технического университета и Алтайского государственного технического университета.

Высокий профессионализм, широкая эрудиция, большая трудоспособность, чуткость и отзывчивость снискали ему большое уважение учеников и коллег.

*Редакционный совет, редакционная коллегия и коллектив редакции журнала
сердечно поздравляют Анатолия Сергеевича Вострикова с юбилеем
и желают ему здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов
на благо российской науки и образования.*

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ОАО "ИНЭУМ им. И. С. БРУКА" В ОБЛАСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ И ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

УДК 338

Н. Л. Прохоров,

д-р техн. наук, проф., научный руководитель,
prokhorov_n@ineum.ru,

А. А. Швеин, канд. техн. наук, нач. отдела,
shvein_a@ineum.ru,

Г. Г. Знайко, канд. техн. наук, зам. ген. директора
znayko_g@ineum.ru,

В. Е. Красовский,

канд. техн. наук, проф., ученый секретарь,
krasovsky_v@ineum.ru,

ОАО "ИНЭУМ им. И. С. Брука"

Проблемы управления информационными процессами в проектировании и применении медицинской техники

Обобщается опыт и анализируются проблемы и модели управления информационными процессами, полученные при выполнении ряда междисциплинарных проектов, направленных на создание и внедрение отечественной конкурентоспособной медицинской диагностической техники. Обсуждаются перспективы импортозамещения, а также развития национальной инфраструктуры здравоохранения на основе интегрированной телемедицинской среды. Для анализа проблем организации эффективного управления в названных сферах предлагается эволюционно-технологическая модель, позволяющая формализовать процессы трансформации знаний, получаемых в различных предметных областях, объединив их в совокупность взаимосвязанных технологических и эволюционных циклов.

Ключевые слова: информационные процессы, проектирование, технологии, медицинская диагностика, предметная область, эволюция, моделирование, инфраструктура, здравоохранение, телемедицина

Эволюция научных знаний и технологий управления информационными процессами

Среди наиболее значимых научных достижений XX века, положивших начало наблюдаемому сейчас стремительному процессу перехода от индустриальной эпохи к эпохе информационного общества, явилось "рождение кибернетики — особой отрасли научного знания междисциплинарного характера, призванной изучать процессы управления и обработки информации в системах любой природы" [1].

Интересно отметить, что такие понятия, как кибернетика, управление, информация, а также изобретение ЭВМ, полупроводниковых технологий вошли в широкий научный обиход практически одновременно и немедленно инициировали лавинообразный процесс трансформации новых научных знаний в технологии, которые до неузнаваемости изменяют окружающую среду и взаимоотношения проживающих в ней субъектов. Следующий этап развития кибернетики — мехатроника — это область науки и техники, посвященная созданию и эксплуатации машин и систем с компьютерным управлением, которая базируется на знаниях в области механики, электроники и микропроцессорной техники.

В нашей стране стартовой датой переходной эпохи можно считать начало деятельности пионеров отечественной вычислительной техники и основателей ныне развивающихся в ОАО "ИНЭУМ им. И. С. Брука" научных школ И. С. Брука и С. А. Лебедева, которые в 1948 г. приступили к разработкам проектов первых советских ЭВМ и независимо друг от друга и от зарубежных ученых пришли к аналогам технических решений, которые доминировали в сфере компьютерных технологий в течение многих десятилетий под названием "архитектура фон Неймана".

В декабре 1947 года состоялось официальное представление изобретения биполярного транзистора, который создали У. Шокли, Дж. Бардин и У. Браттейн в лабораториях Bell Labs (США). Именно эта дата считается днем изобретения транзистора, который и в настоящее время остается ключевым управляющим элементом в проектировании технологий цифровой обработки данных. 4 декабря 1948 г. советские ученые И. С. Брук и Б. И. Рамеев получили авторское свидетельство № 10475 на изобретение "Автоматическая цифровая электронная машина" — первое изобретение в СССР, зарегистрированное в области цифровой электронной вычислительной техники. В 1998 г. к 50-летию этой даты Российское отделение IEEE Computer Society [2] предложило отмечать этот день как День российской информатики.

В том же 1948 г. были опубликованы ставшие классическими работы в области управления и информатики — монография Н. Винера "Кибернетика, или управление и связь в животном и машине" [3] и статья К. Шеннона "Математическая теория свя-

зи" [4], в которой впервые изложены методы оценки качества информации.

Как отмечается в статье [1], "универсальный характер двух феноменов — информации и управления — явился причиной небывалой экспансии кибернетической методологии в весьма различные по природе изучаемых объектов области знаний". При этом, благодаря изобретению ЭВМ с программным управлением, стремительному развитию полупроводниковых технологий и программно-аппаратных средств взаимодействия человека с техническими устройствами и системами, эти фундаментальные научные парадигмы в исторически рекордные сроки стали катализатором развития практически всех сфер жизнедеятельности человека.

В конце 50-х гг. И. С. Брук выдвинул идею использования ЭВМ в качестве управляющих машин. Впервые предлагалось применять вычислительную технику не только для больших математических, физических или технических расчетов, но и в решении задач управления технологическими объектами и даже экономическими процессами. В 1958 г. составленная группой специалистов под руководством члена-корреспондента АН СССР И. С. Брука проблемная записка "Разработка теории, принципов построения и применения специализированных вычислительных и управляющих машин" была рассмотрена экспертной комиссией Президиума АН СССР под руководством академика М. В. Келдыша и одобрена бюро Отделения технических наук АН СССР. Постановлением Президиума АН СССР № 413 от 27.06.1958 г. Лаборатория управляющих машин и систем (ЛУМС) Энергетического института АН СССР под руководством члена-корреспондента АН СССР И. С. Брука была преобразована в ИНЭУМ АН СССР.

Во второй половине XX века область применения кибернетических идей и компьютерных технологий в управлении сложными процессами расширялась очень быстрыми темпами. В процессе глобальной "кибернетизации" и "компьютеризации" появлялись лаборатории, отделы, институты, промышленные предприятия и целые отрасли, специализирующиеся на исследовании, создании и внедрении новых технологий, предназначенных для автоматизации управления сложными процессами [5].

К началу XXI века в результате лавинообразного распространения персональных ЭВМ, всемирной сети Интернет, мобильной связи и других достижений электроники и информационно-коммуникационных технологий в инновационные процессы стремительно вовлекается практически все грамотное население планеты. Не является исключением и Россия. К концу предыдущего столетия общее число российских пользователей домашних компьютеров не превышало 5 % общей численности населения от 16 лет и старше [6], а численность российской аудитории сети Интернет составляла немногим более 1 % [7]. К концу 2006 г. число российских пользователей компьютерной техники достигло

35 %, а число интернет-пользователей превысило 15% и составило более 24 млн человек [8]. По данным аналитических агентств в 2010 г. общее число пользователей сети Интернет в мире превысило 2 млрд человек, а в России — 50 млн человек.

По данным исследования IDC в 2007 г. в мире было создано и скопировано 281 млрд Гбайт цифровой информации или по 45 Гбайт информации в расчете на каждого жителя планеты. Информация, созданная в 2011 г., будет храниться в 20 квадриллионах контейнеров, что будет требовать гигантских усилий по управлению ими. Организации вынуждены тратить огромные ресурсы на планирование эффективного использования данных и управление информацией. С увеличением объема следов, оставляемых человеком в цифровой вселенной, растет и объем ответственности организаций в вопросах хранения, защиты, обеспечения доступности и достоверности информации.

Однако важны не столько количественные показатели, сколько качественные фундаментальные изменения в глобальной социально-технологической среде. Как отмечал немецкий философ и социолог Н. Луман [9], "простого указания на рост сложности и увеличение количества доступной информации оказывается недостаточно, так как оно не объясняет механизма социальных изменений". По мнению Н. Лумана, изменение заключается в том, что все больше и больше общественных структур создаются и изменяются посредством принятия решений.

В данной статье анализируются опыт и проблемы проектирования и применения компьютеризованной медицинской диагностической техники и перспективы развития инфраструктуры отечественной медицинской промышленности на основе импортозамещения и развития интегрированной телемедицинской среды. В качестве аналитического инструмента используется разработанная ранее эволюционно-технологическая модель [10] информационного взаимодействия субъектов, вовлеченных в эту актуальную для нашей страны сферу междисциплинарных исследований и разработок.

Опыт и проблемы проектирования и применения медицинской диагностической техники

Внедрение в медицинскую практику аппаратуры, способной осуществлять многопрофильное обследование пациентов и поддерживать хорошую связь с крупными медицинскими центрами, становится доминирующим направлением развития медицинских услуг в национальных программах многих стран. Важнейшими актуальными направлениями для нашей страны являются развитие отечественной медицинской промышленности на основе разработки и производства конкурентоспособного импортозамещающего и инновационного медицинского оборудования и изделий медицинского назначения, а также развитие телемедицинских услуг.

Работы по исследованию и созданию компьютеризованных средств медицинской диагностики проводятся в ИНЭУМ с середины 1990-х гг. в тесной кооперации с медицинскими учреждениями, вузами и другими профильными организациями.

К концу 1990-х гг. были проведены исследования и выполнены опытные разработки по реализации ряда наиболее актуальных для отечественной медицины диагностических режимов, позволяющих выявлять заболевания и последствия травм головного мозга, магистральных и периферийных сосудов, а также гайморовых и фронтальных пазух [11].

В 2001—2007 гг. некоторые оригинальные модели портативных ультразвуковых комплексов диагностики нарушений в системе мозгового кровообращения с применением режимов одноканального и двухканального ультразвукового сканирования [12, 13] прошли стадию лицензирования и сертификации и в настоящее время поставляются в сотни медицинских учреждений по всей стране.

В 2003—2008 гг. основные проектно-технологические работы были направлены на улучшение технико-экономических характеристик серийных диагностических ультразвуковых приборов:

- уменьшение материалоемкости, массы и энергопотребления;
- расширение диагностических возможностей [14];
- разнообразие функциональных и конструктивных вариантов диагностических приборов в зависимости от особенностей применения.

В 2008—2010 гг. разработана новая серия диагностических приборов в различных конструктивных исполнениях, которые прошли все необходимые испытания и находятся на завершающей стадии лицензирования и сертификации. Некоторые из этих приборов показаны на рис. 1 (см. четвертую сторону обложки).

Они обеспечивают следующие функциональные характеристики:

- отображение в реальном времени и в режиме "стоп-кадр" эхоэнцефалограмм (А + А), пульсограмм (А + Р);
- измерение глубины и линейных размеров отражающих объектов;
- измерение временных параметров пульсограмм и доплерограмм;
- измерение скорости кровотока с указанием его направления;
- расчет диагностических параметров;
- ввод данных о пациенте и объединение их с результатами обследования;
- запоминание результатов обследования;
- длительный мониторинг с сохранением данных на жестком диске;
- пересылка и прием результатов обследований по различным каналам электронной связи.

Одновременно проводились теоретические и экспериментальные исследования, направленные на разработку современных методов и технологий цифровой обработки сигналов в реальном времени [15],

совершенствование методологии проектирования [16, 17], создание адекватной проектно-технологической платформы [18, 19] и разработку проектов развития отечественной инфраструктуры здравоохранения на основе сети телемедицинских услуг.

В последние годы сфера деятельности ИНЭУМ в области исследований и разработок, направленных на создание отечественной конкурентоспособной медицинской диагностической техники, существенно расширилась. В настоящее время в институте на разных стадиях проектного цикла прорабатываются следующие направления:

- фундаментальные исследования, направленные на решение проблем диагностики и мониторинга сложных заболеваний на ранней стадии;
- прикладные исследования и разработки в области развития методов цифровой обработки сигналов, высокой степени визуализации диагностической информации;
- опытно-конструкторские работы (ОКР), направленные на создание современной технологии проектирования с применением средств имитационного и полунатурного моделирования;
- проекты по созданию широкой номенклатуры конкурентоспособной медицинской диагностической техники на основе импортозамещения, стандартизации и унификации технических решений;
- инфраструктурные проекты, ориентированные на формирование и развитие в России сети персонализированных телемедицинских услуг.

Фундаментальные научные исследования

В настоящее время выполняется проект "Исследование принципов, моделей и технологий управления в сложных управляющих динамических информационно-вычислительных системах". Это инициативный научно-исследовательский проект, выполняемый сотрудниками ИНЭУМ, МИРЭА и Института машиноведения РАН при поддержке РФФИ. Результаты исследования направлены на моделирование распределенных систем управления и разработку методов проектирования проблемно-ориентированных управляющих комплексов с применением отечественных многоядерных микропроцессорных платформ [20], многомашинных конфигураций, локальных и глобальных информационно-вычислительных сетей. Среди наиболее актуальных областей применения разрабатываемых моделей и методов — комплексные технологические решения в моделировании гемодинамики системы кровообращения, а также в управлении процессами мониторинга и лечения сложных заболеваний.

Проект "Теоретические и экспериментальные исследования по созданию технологии комплексной диагностики и мониторинга психофизических параметров состояния человека" выполняется сотрудниками ИНЭУМ в кооперации с ФГУП "Исток".

В рамках данного проекта проведен информационный анализ теоретических представлений и экспериментальных исследований механизмов взаимодействия различных видов излучения (звукового, электромагнитного, включая СВЧ, КВЧ, светового) с биологическими тканями и объектами в целях последующей выработки технических предложений по созданию неинвазивных устройств для мониторинга и диагностики психофизиологических состояний человека.

Проект "Исследование принципов, моделей и технологий создания комплексных систем оценки психофизиологического состояния боевых расчетов и реализации управляющих воздействий, обеспечивающих повышение боевой устойчивости войск" планируется выполнить совместно с ОАО НТЦ "Промтехаэро".

Создание и развитие интегрированной проектно-технологической платформы

В рамках данного направления в 2008—2010 гг. разработаны базовая технология автоматизированного проектирования систем многоканального эхо-сканирования и опытный образец комплекса аппаратно-программных средств, обеспечивающих эффективное управление информационными процессами реализации сквозного цикла при создании инновационной медицинской диагностической техники, начиная от этапов предпроектных и маркетинговых исследований и заканчивая этапами лицензирования, сертификации, промышленного внедрения и продвижения на рынок.

Эволюционные и технологические циклы управления информационными процессами

Эволюционные циклы		Технологические циклы	
e_1	Управление исследованиями	f_1	Управление продвижением
e_1	Управление знаниями	f_1	Управление ожиданиями
e_1	Управление проектами	f_1	Управление организацией
e_1	Управление персоналом	f_1	Управление операциями
e_1	Управление ресурсами	f_1	Управление данными
e_1	Управление производством	f_1	Управление информацией
e_1	Управление бизнесом	f_1	Управление активами

Методологические основы управления информационными процессами в данной сфере прорабатываются на основе предложенной в работе [10] концептуальной эволюционно-технологической модели информационного взаимодействия субъектов, представленной в виде совокупности эволюционных и технологических циклов, позволяющих локализовать проблемы различного временного масштаба с учетом особенностей предметных областей, научных дисциплин и технологических ресурсов.

Позиционирование основных функциональных компонентов разработанной базовой технологии в структуре взаимодействующих эволюционных и технологических циклов (см. таблицу) иллюстрирует рис. 2.

В развитие этого направления подготовлены предложения к ФЦП "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008—2015 гг. по следующим темам:

- "Разработка технологии комбинированного имитационного моделирования информационно-управляющих систем комплексной экспресс-диагностики, мониторинга и анализа состояния сложных биологических объектов в режиме реального времени";
- "Разработка унифицированных многофункциональных модулей для создания сложной медицинской техники на основе отечественных высокопроизводительных систем на кристалле".

В рамках формирования ФЦП "Развитие фармацевтической и медицинской промышленности Российской Федерации до 2020 года" подготовлены предложения по выполнению проектов создания инновационной медицинской диагностической техники:

- "Разработка и организация производства установки для прикроватного ТКД-мониторинга инсульта";
- Разработка и организация серийного производства неинвазивного устройства для диагностики сосудистой системы человека";

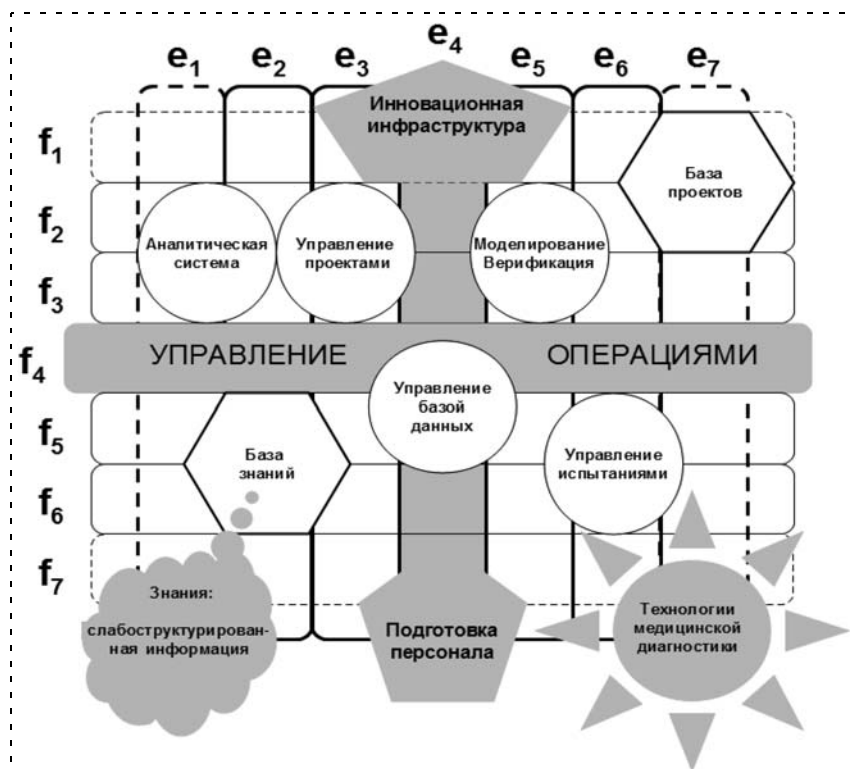


Рис. 2. Позиционирование основных компонентов базовой технологии в структуре взаимодействующих эволюционных и технологических циклов

- "Портативная ультразвуковая компьютеризированная станция для визуализации внутренних органов и диагностики сложных заболеваний";
- "Портативная ультразвуковая компьютерная станция для диагностики заболеваний головного мозга";
- "Разработка и организация серийного производства оптоэлектронного биосенсора для дистанционной телеметрической передачи результатов измерений параметров пульсовой волны и дыхательного цикла".

Перспективы развития инфраструктуры отечественной медицинской промышленности

Важнейшей задачей здравоохранения цивилизованного государства, решение которой способствует стабильности общества, является обеспечение права гражданина на медицинское обслуживание независимо от его социального положения и места жительства. Для реализации этого права в России необходимо проведение целого ряда комплексных мероприятий. Однако, если вопросы обеспечения лечебно-профилактических учреждений полноценным финансированием, оснащения новейшим оборудованием и другими ресурсами можно решить хотя бы теоретически, то обеспечить каждую районную больницу специалистами мирового класса невозможно даже в теории. Решение подобной задачи возможно только при внедрении телемедицинских технологий в практику работы учреждений здравоохранения. Это особенно актуально для России с ее огромной территорией, неравномерным распределением населения и концентрацией ведущих специалистов-медиков в крупных городах.

Специалистами ИНЭУМ совместно с ОАО НТЦ "Промтехазро" и другими профильными организациями разрабатывается проект концепции "Развитие телемедицины в Российской Федерации".

Телемедицина предоставит новые возможности для реорганизации и интенсификации системы управления здравоохранением на всех уровнях. Дистанционное повышение квалификации и обучение позволит ускорить внедрение новых медицинских технологий и даст возможность привлечь высококвалифицированных научных работников к преподавательской деятельности без отрыва от основной работы.

Потенциальные области применения телемедицинских услуг:

- электронная медицинская карта, медицинские справочные базы данных, экспертные системы;
- видеоконференции, телемедицинские консультации, системы динамического наблюдения;
- телеобразование, дистанционные медицинские манипуляции;
- телемедицина скорой помощи, телемедицина urgentных состояний, чрезвычайных ситуаций и катастроф, военная телемедицина;

- телемедицина на транспорте, разноцелевые мобильные телемедицинские комплексы;
- домашняя телемедицина, социально-гигиенический мониторинг.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: проект № 10-08-01156а

Список литературы

1. Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 2—10.
2. 4 декабря — день российской информатики. URL: http://www.ieee.ru/the_day.shtml
3. Wiener N. Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine. Actualities Sci. Ind., no. 1053; Hermann et Cie., Paris, The MIT Press, Cambridge, Mass. and Wiley, N. Y., 1948; Math. Rev. 9 (1948), 598.
4. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. 1948. V. 27. P. 379—423, 623—656.
5. Управляющие вычислительные комплексы: Учеб. пособие / Н. Л. Прохоров, Г. А. Егоров, В. Е. Красовский и др.; Под ред. Н. Л. Прохорова, 3-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 2003. 352 с.
6. Швейн А. А. Российский рынок домашних компьютеров // Computerworld. 1998. № 15.
7. Швейн А. А. Информационная и методологическая база Интернет-исследований // Интернет Медиа XXI века. Москва, 2—3 марта 2000 г.
8. Корпоративный журнал АФК "Система". М., 2007. № 16.
9. Луман Н. Общество как социальная система: Пер. с нем. / А. Антоновский. М.: Логос, 2004. 232 с.
10. Швейн А. А. Проблемы и перспективы применения суперкомпьютерной техники в управлении информационными процессами // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. 2010. Вып. 3. С. 153—164.
11. Знайко Г. Е., Стулин И. Д. Компьютеризованный многофункциональный комплекс для исследования головного мозга, артерий и вен головы и конечностей // Научные технологии. 2001. № 1.
12. Знайко Г. Г., Соловьев С. Ю., Красовский В. Е. Приборы для ультразвуковой диагностики сосудистых заболеваний // Медицинская техника. 2003. № 4.
13. Знайко Г. Г., Стулин И. Д. Компьютеризованный многофункциональный прибор "ЭхЭДГ-Комплекс-М" для диагностики в ангиологии // Научные технологии. 2003. № 1.
14. Прохоров Н. Л., Знайко Г. Г., Стулин И. Д. Пути повышения диагностических возможностей ультразвуковых компьютеризованных приборов // Информационные технологии и вычислительные системы. 2004. № 4.
15. Проектирование комплексов обработки сигналов для медицинской диагностики: Учеб. пособие / Н. Л. Прохоров, Г. Г. Знайко, В. Е. Красовский и др. М.: МИРЭА, 2006. 140 с.
16. Знайко Г. Г. Проектирование компьютеризованных диагностических комплексов на основе стандартов открытых систем // Приборы. 2007. № 5.
17. Знайко Г. Г. Проектирование компьютеризованных медицинских диагностических комплексов с применением имитационных моделей // Информационные технологии и вычислительные системы. 2005. № 4.
18. Инновационные технологии в проектировании медицинских диагностических комплексов / Н. Л. Прохоров, А. Я. Олейников, Г. Г. Знайко и др. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. 2008. Вып. 2.
19. Развитие проектно-технологической платформы для управления процессами создания медицинской техники / Н. Л. Прохоров, А. А. Швейн, Г. Г. Знайко и др. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. 2011. Вып. 3.
20. Ким А. К., Фельдман В. М. Вопросы создания суперЭВМ на основе архитектурной платформы "Эльбрус" // Приборы. 2009. № 1 (103).

Г. А. Егоров, д-р техн. наук,
ст. науч. сотр., зам ген. директора по науке,
egorov_g@ineum.ru,

А. Д. Белоногов, канд. техн. наук,
ст. науч. сотр., ст. инженер,
belonogov@sumail.ru,

М. А. Островский, канд. техн. наук, нач. отдела,
mike@mail.ru,

Я. А. Рейзман, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.,
4991356132@mail.ru,

ОАО "ИНЭУМ им. И. С. Брука"

Реализация человеко-машинного интерфейса в интегрированной технологии проектирования автоматизированных систем контроля и управления

Рассматривается одна из составных частей интегрированной технологии проектирования распределенных автоматизированных систем контроля и управления, являющаяся основой при разработке программного обеспечения операторских станций. Рассмотрены общие принципы реализации операторского интерфейса, способы построения мнемоблоков различных типов, в том числе проектируемым изображением. Изложены возможности повторного использования разработанных мнемоблоков — их загрузка из ранее созданных проектов и формирование пользовательских библиотек.

Ключевые слова: проектирование распределенных систем, человеко-машинный интерфейс, операторские станции

Общие положения

Разработанная в ОАО "ИНЭУМ им. И. С. Брука" интегрированная технология проектирования автоматизированных систем контроля и управления (АСКУ) [1] предназначена для обеспечения всех видов работ, возникающих при разработке проекта АСКУ, а именно для разработки:

- программного обеспечения контроллеров;
- программного обеспечения операторских станций;
- проектной документации.

Основой данной интегрированной технологии является инструментальная среда ConField, базирующаяся на графическом языке блок-схем (ЯБС). На этом языке технологический алгоритм представляется в виде схемы соединений функциональных блоков (алгоблоков) различного типа. Алгоблоки могут быть как элементарными, так и более сложными, образующимися в результате свертки проектов.

Среди элементарных алгоблоков отдельную группу составляют алгоблоки человеко-машинного интерфейса. Они называются *мнемоблоками* и кроме схемного представления (обязательного для всех алгоблоков) имеют еще дополнительное мнемоническое представление (отображаемое на экране в процессе выполнения проекта). Именно мнемоблоки являются основой построения человеко-машинного интерфейса проекта.

При этом, если при разработке программного обеспечения контроллеров роль человеко-машинного интерфейса незначительна (а иногда и просто нулевая), то при работе с операторскими станциями ситуация меняется коренным образом. Трудозатраты на построение человеко-машинного интерфейса (экрана) операторской станции сравнимы (а иногда значительно превышают) трудозатраты на разработку схемной части проекта.

Поэтому проблема реализации человеко-машинного интерфейса является важной составляющей системы ConField.

При построении экранов операторских станций (пример фрагмента экрана приведен на рис. 1) кроме мнемоблоков используются также пассивные элементы — *экранные объекты*, имеющие мнемоническое отображение, но не имеющие схемной части (связи с проектом).

Как мнемоблоки, так и объекты (будем называть их *мнемозементами*) обладают так называемыми *свойствами*, определяющими параметры изображения. Каждый мнемоземента имеет некоторые общие свойства (размер, положение) и свойства, уникальные для каждого типа мнемоземента (цвет и толщина линии, цвет заливки, параметры шрифта и др.). Свойства определяются при проектировании через диалог с оператором, остаются неизменными в процессе выполнения проекта, сохраняются и восстанавливаются вместе с проектом.

Как мнемоблоки, так и объекты (будем называть их *мнемозементами*) обладают так называемыми *свойствами*, определяющими параметры изображения. Каждый мнемоземента имеет некоторые общие свойства (размер, положение) и свойства, уникальные для каждого типа мнемоземента (цвет и толщина линии, цвет заливки, параметры шрифта и др.). Свойства определяются при проектировании через диалог с оператором, остаются неизменными в процессе выполнения проекта, сохраняются и восстанавливаются вместе с проектом.

Экранные объекты

Экранные объекты играют роль элементов оформления. У них отсутствует схемная часть (связь с проектом), поэтому они являются статическими (не меняют свое изображение в процессе выполнения).

Как начертание, так и цветовое оформление объекта задается через свойства на этапе проектирования. Так, например, в *Рамке* можно задать параметры контура и фона, наличие и параметры линий деления (вертикальных и горизонтальных) и закруглений на углах (рис. 2).

Некоторые объекты (например, *Фигура*, *Контур*, *Круговая шкала*) кроме задания свойств допускают еще экранное редактирование, позволяющее существенно менять начертания объекта. Так, например, для *Фигуры* (представляющей собой многоугольник) предусмотрены вставка, удаление и перемещение узлов при экранном редактировании.

Комбинирование объектов (группировка) позволяет создавать достаточно сложное статическое оформление. Кроме того, в перечне экранных объектов существует *Картинка*, позволяющая включать в состав оформления образы из стандартных графических файлов (*.bmp, *.jpg и др.).



Рис. 1. Фрагмент экрана операторской станции

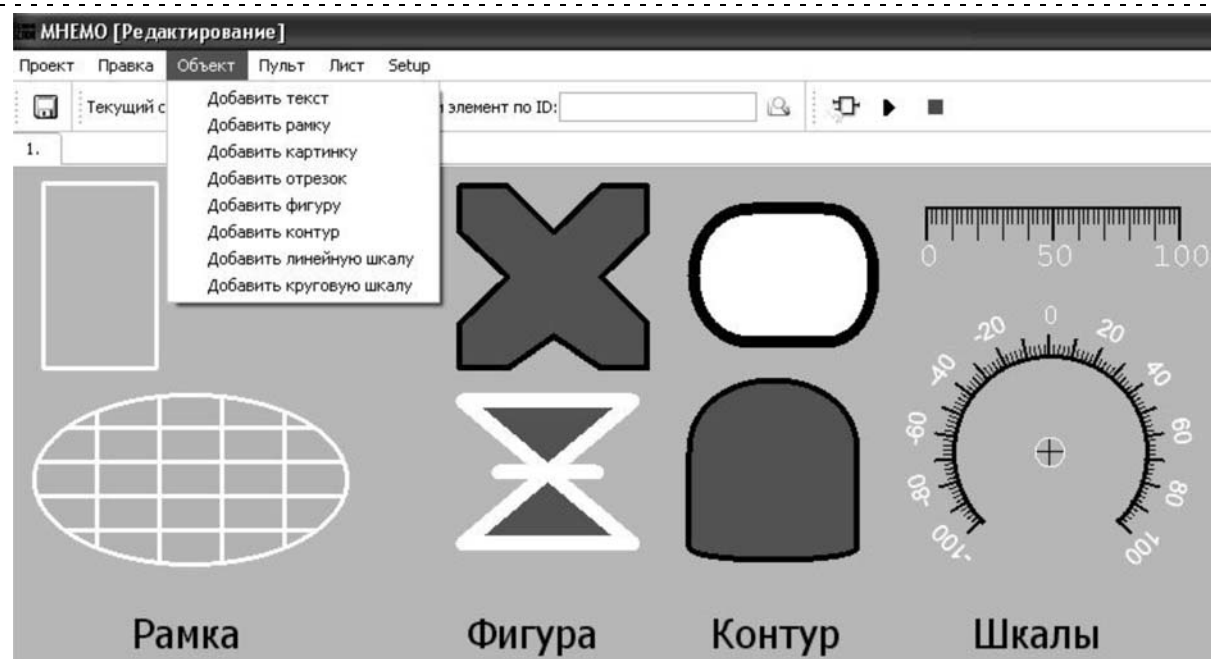


Рис. 2. Экранные объекты

Мнемоалгоблоки

Поскольку мнемоалгоблоки имеют как экранное изображение, так и схемную часть (связь с проектом), то они обеспечивают изменение различных параметров изображения в процессе выполнения проекта (динамическое отображение). По способам формирования изображения мнемоалгоблоков они делятся на два типа:

- *конфигурируемые мнемоалгоблоки*, в которых за счет задания свойств может проводиться выбор того или иного варианта изображения (из числа заданных);
- *проектируемые мнемоалгоблоки*, в которых построение требуемого изображения выполняется в процессе проектирования (никаких заданных вариантов не предусмотрено).

Первый тип требует меньше трудозатрат в процессе проектирования, зато второй тип позволяет реализовывать мнемоалгоблоки произвольного изображения.

Конфигурируемые мнемоалгоблоки призваны моделировать устройство с той или иной функцией. В настоящее время система ConField включает около 40 таких алгоблоков, например:

- *Дисплей* — отображение числовой или текстовой информации;
- *Лампа сигнальная, табло на два состояния* — отображение факта включения и отключения;
- *Выключатель* — реализация включения и отключения;

- *Задатчик* — устройство, формирующее числовой выход;
- *Насос перекачивающий, Клапан, Кран, Задвижка* и др.

На рис. 3 приведен проект из *Выключателя* и *Табло на два состояния*, а также его отображение при отключенном и включенном выключателе. Оба использованных мнемоалгоблока являются конфигурируемыми — при задании свойств можно выбрать вид отображения из числа заданных, а для табло — также цвет и текст надписи (рис. 4).

Для технологического элемента *Насос перекачивающий* (рис. 5) в его свойствах предусмотрены пять различных изображений и флажки ориентации, возможно задание цветовой настройки (отдельно для фона и окантовки), а также мигания при промежуточных состояниях.

Некоторые конфигурируемые мнемоалгоблоки (например, *Трубопровод, Агрегат обобщенный*) кроме задания свойств допускают еще экранное редактирование, позволяющее менять начертания объекта. Так, например, для *Трубопровода* (представляющего собой последовательность колен) предусмотрены вставка, удаление и перемещение колен при экранном редактировании.

Одним из часто используемых свойств является мигание составных частей мнемоалгоблока, позволяющее привлекать внимание оператора к отдельным состояниям или их смене (аварийное состояние установки или ее узлов, переключение *Крана*, запуск *Насоса* и т. д.).



Рис. 3. Проект из *Выключателя* и *Табло на два состояния*



Рис. 4. Диалоги свойств *Выключателя* и *Табло*

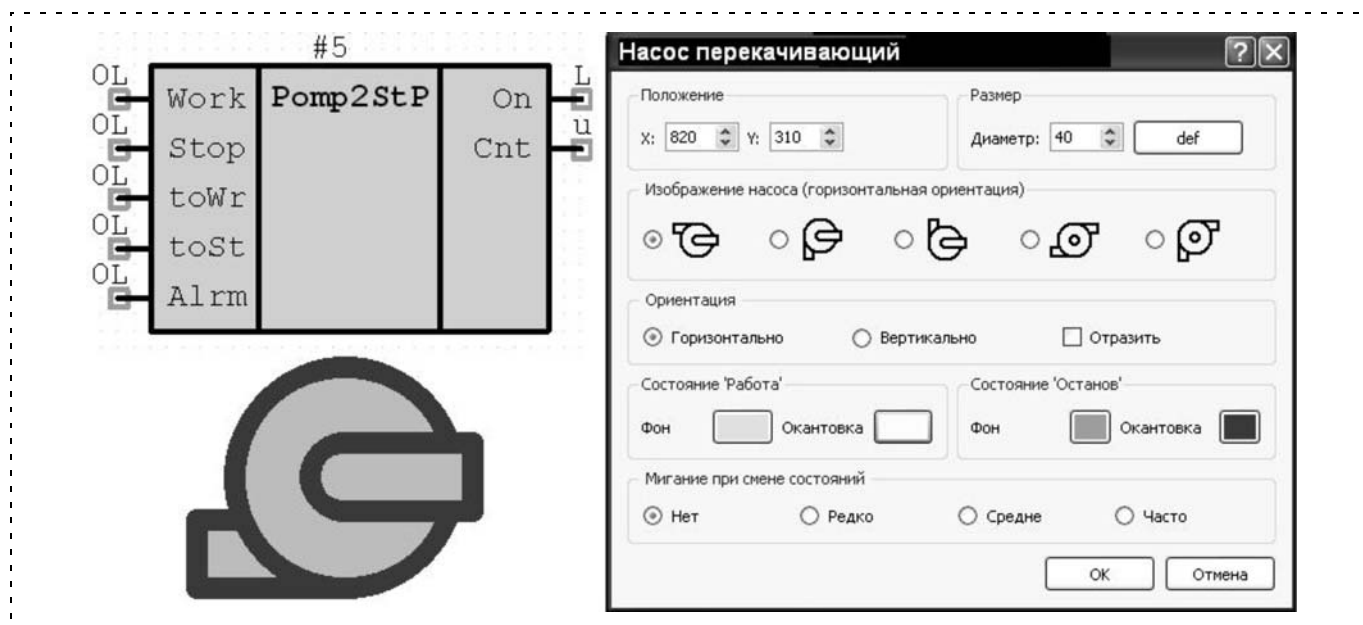


Рис. 5. Изображение *Насоса* на схеме, на экране и его свойства

Особняком стоит мнемоблок под названием *Графопостроитель с редактированием*. Он позволяет осуществлять полную загрузку и редактирование двумерного графика различными способами:

- чтение данных из текстового файла в процессе проектирования;
- очистка, загрузка и редактирование данных графика из проекта через входные контакты;
- экранное редактирование данных графика в процессе работы.

Предусмотрена пересылка данных графика через выходные контакты, а также выгрузка в файл после остановки проекта.

Проектируемые мнемоблоки сложнее в использовании, но, как было сказано ранее, позволяют реализовывать любые изображения, которые возможно создать, комбинируя и настраивая экранные объекты. На базе проектируемых мнемоблоков можно создавать модели самых различных устройств как реально существующих, так и виртуальных.

Друг от друга проектируемые мнемоблоки отличаются набором свойств и типом реакции на эти свойства в зависимости от значений на входных контактах (этот тип реакции называется *анимацией*).

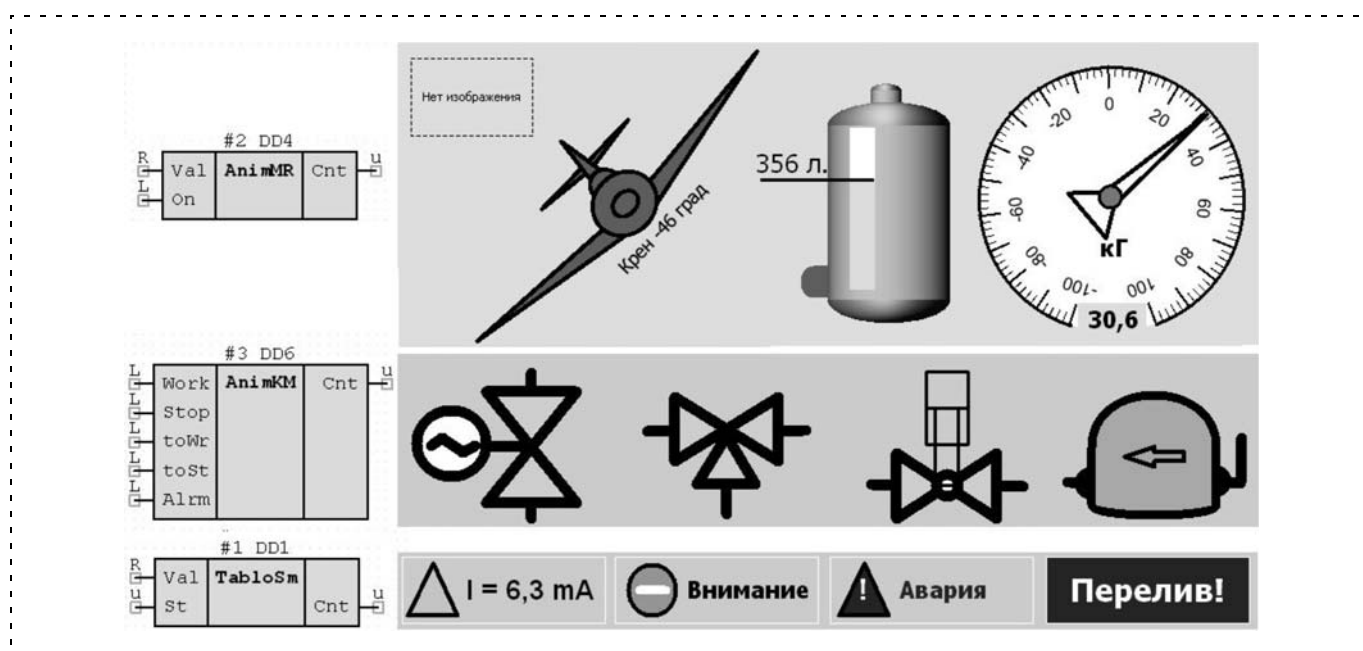


Рис. 6. Примеры проектируемых мнемоблоков

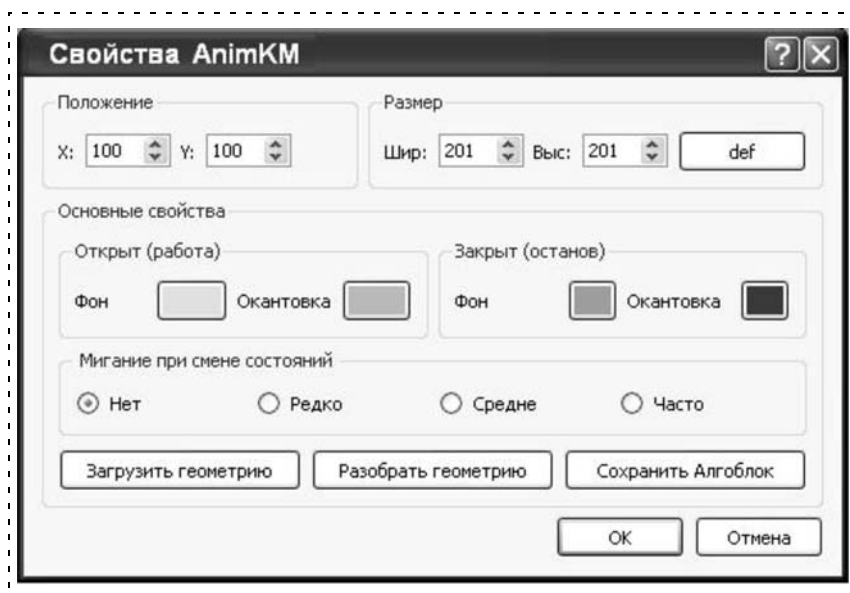


Рис. 7. Диалог свойств проектируемого мнемоблока

Понятие *анимации* является основополагающим понятием в концепции проектируемых мнемоблоков. В настоящее время система ConField использует следующие типы анимации:

- *перемещение* изображения по координатам X и Y позволяет строить различные указатели (указатель уровня, сдвига и др.);
- *вращение* изображения относительно заданной точки позволяет строить стрелочные приборы, модели запорных устройств поворотного типа и другие указатели;
- *индикация* позволяет отображать изменения состояния (за счет изменения цветовой настройки изображения, изменения текста, мигания с различным темпом) и является мощным средством построения индикаторов и табло произвольного вида;
- *вывод значения* в заданном формате.

На этих типах анимаций создаются и включаются в систему ConField разновидности проектируемых мнемоблоков, например (рис. 6):

- AnimMR — универсальный, позволяющий использовать все перечисленные типы анимаций;
- AnimKM — специализированный, позволяющий реализовать технологические объекты с двумя устойчивыми состояниями;
- TabloSm — специализированный, позволяющий реализовать табло на несколько состояний.

Порядок использования проектируемых мнемоблоков:

1. С помощью экранных объектов создается и настраивается желаемое изображение (если используется TabloSm, то несколько изображений — по числу состояний). Каждое изображение группируется и ему присваивается имя.

2. Вставляется в проект проектируемый мнемоблок нужной разновидности. На экране отображается его контур и надпись "Нет изображения" (рис. 6, верхний ряд слева).

3. В диалоге свойств (рис. 7) загружается нужное изображение (или у нескольких изображений для TabloSm) и настраиваются необходимые свойства. После загрузки исходные изображения могут быть удалены.

4. Для корректировки загруженных изображений предусмотрена возможность их обратной выгрузки в исходное изображение. После правки исходное изображение вновь может быть загружено обратно в алгоблок.

В связи с особенностями проектируемых мнемоблоков (повышенная трудоемкость и богатство возможностей) достаточно остро встает вопрос повторного использования отработанного варианта в других проектах. Для этого предусмотрена возможность сохранения алгоблока в библиотеке пользователя (рис. 7, кнопка "Сохранить Алгоблок").

При повторном использовании сохраненный алгоблок вставляется в проект на общих основаниях.

Дополнительные возможности

♦ Мнемоблок *Таблица*

Во многих областях деятельности при разработке проектов возникает необходимость в отображении исходных данных или результатов в табличном виде. Обязательными условиями являются гибкий дизайн таблицы, возможность ее редактирования (как из проекта, так и оператором), возможность ее сохранения в легком для чтения виде и обратной загрузки в проект. Существующие системы не имеют такого инструмента, ограничиваясь обеспечением выхода в стандартные пакеты (как правило, в пакет Excel). Это решает проблему, но утяжеляет использование системы.

В системе ConField включен специальный мнемоблок *Таблица*, обеспечивающий все вышеупомянутые возможности (рис. 8). Дополнительно в него введена возможность "прокрутки" таблиц большого размера в ограниченном рабочем поле мнемоблока.

♦ Правило *прозрачности* для сигналов

В процессе проектирования на экран устанавливаются различные экранные объекты и мнемоблоки. Каждый из них занимает определенную область экрана. Если несколько таких элементов перекрывают друг друга, то при щелчке мышью сигнал передается только на тот элемент, который расположен на самом верху — этот элемент как бы "прикрывает" элементы, лежащие под ним.

Однако и среди экранных объектов, и среди мнемоблоков имеются такие, которые хотя и занимают определенную область экрана, но визуально ее не закрывают, позволяя видеть то, что под ними.

ЗАПОЛНЕНИЕ КАССЕТЫ СТЕНД CONField

Оператор: **Пилиявский С.**

Освободить кассету: 0 Загрузить кассету: [кнопка]

Блокнот

Тип	Uвх	Рн	Uвых	Исп
СПН	27	10	27	I

Кассета

Тип	Uвх	Рн	Uвых	Исп	№	№
СПН	27	05	05	I	4663	1
СПНМ	27	25	05	II	9169	2
СПН	27	15	15		9117	3
СПН	27	15	06	M	9347	4
СПН	27	10	27	I	9006	5
СПН	27	10	27	M	9008	6
СПНМ	27	10	09	I	9010	7
СПН	27	15	06	M	9346	8
СПНМ	27	25	05	II	9168	9
СПН	27	15	15		9118	10
СПНМ	27	10	09	I	9009	11
СПНМ	27	25	05	II	7807	12

Заполнение блокнота

Тип	Uвх	Рн	Uвых	Исп
СПН	12	03	2,5	
СПНМ	27	05	3,3	I
В	10	05	II	
	15	06	M	
	25	09		
	50	12		
	100	15		
Вт	27			
	36			
В				

Рис. 8. Использование мнемоблока *Таблица*



Рис. 9. Использование правила проницаемости для сигналов

Это экранные объекты *Рамка*, *Фигура*, *Контур* (если у них отсутствует заливка) и мнемоблоки *Дисплей* и *Табло* (если у них отсутствует подложка). Логичным продолжением этого является введенное в систему ConField правило *проницаемости* для сигналов — если элемент видим, значит, он достижим для сигнала мышью (даже если поверх него лежит другой элемент).

На рис. 9 элементы, воспринимающие сигналы мышью (*Переключатель* и два *Задатчика*) перекрыты экранными объектами *Текст*, что не мешает им успешно работать.

♦ Использование блочного обмена данными

По общей идеологии системы ConField обмен данными между алгоблоками проводится последовательно, через входные и выходные контакты. Поскольку некоторые мнемоблоки требуют для своего полного заполнения или обновления большого объема данных (*Таблица*, *Графики*), то этот процесс становится очень затратным как по времени выполнения, так и по трудоемкости проектирования.

Для устранения этих затрат разработаны разновидности указанных мнемоблоков с возможностью *блочного обмена* данных. При этом полное заполнение или обновление данных проводится через специальный буфер за один шаг, в то время как при обычном обмене за один шаг обновляется только один элемент (точка *Графика* или ячейка *Таблицы*).

Заключение

1. Реализация человеко-машинного интерфейса в интегрированной технологии проектирования АСКУ строилась по принципу "простые вещи должны выполняться просто, а сложные вещи имеют право выполняться сложнее". Этот принцип позволяет успешно строить проекты даже не очень опытным пользователям. Противоположный принцип "простые и сложные вещи должны выполняться единообразно" хорош для высококлассных профессионалов, но затрудняет работу начинающих пользователей.

2. Изложенный человеко-машинный интерфейс позволяет просто и с меньшими (сравнительно с существующими системами) трудозатратами собирать добротные экраны проектов, используя экранные объекты и конфигурируемые мнемоблоки, набор которых существенно превышает обычный типовой.

3. Вместе с тем, изложенный интерфейс обладает весьма мощными средствами (проектируемые мнемоблоки, правило проницаемости для сигналов, Таблицы, блочный обмен данными), которые в полном объеме почти не присутствуют в существующих системах. Это позволяет подготовлен-

ным пользователям успешно создавать наиболее замысловатые и дизайнерски сложные экраны проектов.

Список литературы

1. Егоров Г. А., Островский М. А., Рейзман Я. А. Интегрированная технология проектирования систем контроля и управления // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. 2010. Вып. 3.
2. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / Под ред. проф. В. П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 256 с.
3. Золотарев С. В., Пастушенков Д. В. CoDeSys SP RTE: SoftPLC + возможности реального времени в среде Windows // Мир компьютерной автоматизации. 2005. № 3.

УДК 004.231.3; 004.382.6; 004.382.7; 004.384

В. М. Фельдман,

д-р техн. наук, зам. ген. директора по науке,
ЗАО "МЦСТ"
feld@mcst.ru

Направления развития вычислительных устройств серии Эльбрус

Представлены ключевые направления совершенствования структуры вычислительных устройств, построенных на отечественных микропроцессорах серий МЦСТ-R и Эльбрус. Предложены методы повышения производительности этих устройств, намечены пути снижения их стоимости.

Ключевые слова: вычислительные устройства, микропроцессоры, контроллеры, система на кристалле, шина, коммутатор

Введение

За последние годы в ЗАО "МЦСТ" и в ОАО "ИНЭУМ им. И. С. Брука" разработан ряд вычислительных комплексов (ВК) на отечественных микропроцессорах двух архитектурных платформ: МЦСТ-R (SPARC-совместимая) и Эльбрус.

Первоочередными задачами для разработчиков вычислительных средств являются вопросы обеспечения технических характеристик, в первую очередь, производительности. Достижение высокой производительности во многом определяется правильно выбранной структурой вычислительного устройства. Помимо обеспечения высокой производительности очень важной для отечественных вычислительных устройств является задача снижения стоимости.

В статье рассматривается решение упомянутых выше задач при создании и развитии вычислительных комплексов серии Эльбрус. В первую очередь показано, как развивалась и модифицировалась структура вычислительных комплексов при обеспечении требуемых тактико-технических характери-

стик и сохранении программной и конструктивной совместимости с предыдущими моделями. Кроме того, обозначены пути снижения стоимости вычислительных комплексов в процессе их развития.

Модификация структуры вычислительных комплексов Эльбрус

Для первоначальной реализации вычислителя ВК "Эльбрус-90микро" был выбран системный блок рабочей станции Sparcstation10 фирмы Sun Microsystems [1].

Упрощенная базовая структура рабочей станции Sparcstation10 изображена на рис. 1. В этой структуре используются до четырех микропроцессоров SuperSPARC, объединенных на системной шине MBus в симметричную многопроцессорную систему. Системная шина MBus позволяет поддерживать согласованную работу иерархии памяти, включающей многоуровневые кэши.

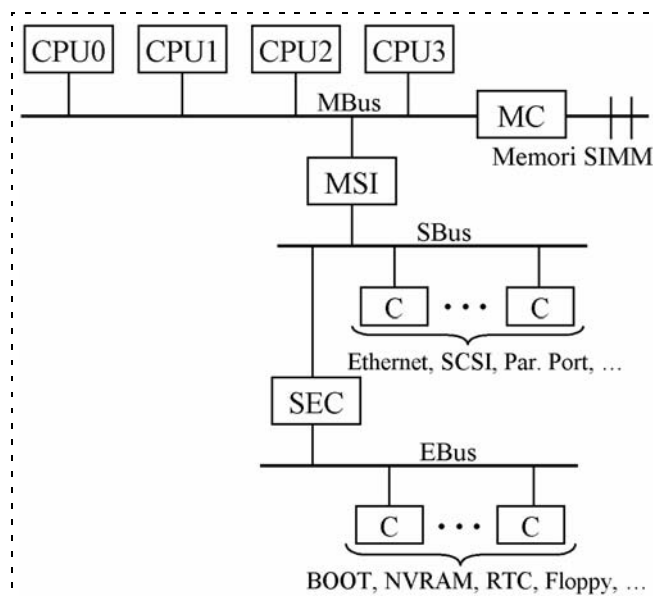


Рис. 1. Упрощенная структурная схема рабочей станции Sparcstation10

Периферийные шины SBus и EBus позволяют подключать широкий набор высокоскоростных и низкоскоростных контроллеров ввода-вывода С, работающих как в режиме программного управления обменом от процессора, так и в режиме прямого доступа в память.

В рассматриваемой архитектуре рабочей станции была использована иерархия шин (MBus, SBus и Ebus) и мостов (MSI и SEC), связывающих эти шины между собой. Использование шин для построения вычислительных систем имеет ряд преимуществ. Во-первых, это наиболее дешевый способ объединения основных элементов системы: процессоров, памяти и подсистемы ввода-вывода. Во-вторых, шина позволяет легко (до определенного предела) строить систему без дополнительных связующих элементов. В-третьих, на шине просто реализуется механизм когерентности общей памяти, базирующийся на ширококестоватной передаче адресов памяти всем абонентам шины [2].

Вместе с тем, шина имеет очевидные недостатки, основной из которых — невозможность обеспечения масштабируемости системы. Добавление элементов в систему, например дополнительных процессоров, ограничено пропускной способностью шины. Кроме того, существующие физические ограничения в реализации шины не позволяют адекватно отслеживать возрастающую скорость работы процессоров.

Приблизительная оценка пропускной способности шины MBus для обеспечения работы четырех процессоров и внешних устройств, подключенных через шину SBus, с оперативной памятью описывается следующим выражением:

$$P_{MBus} \geq 4L \& S_{cpu} + P_{SBus, max}, \quad (1)$$

где P_{MBus} — требуемая пропускная способность шины MBus; $P_{SBus, max}$ — максимальная пропускная способность шины SBus; $4L \& S_{cpu}$ — темп запросов процессора в шину MBus для доступа в память и в устройства ввода-вывода по чтению и записи.

При использовании в системе кэш-памяти второго уровня максимальный темп запросов процессора в шину MBus значительно сокращается и может быть приблизительно вычислен по следующей формуле:

$$L \& S_{cpu, max} = 1,3F_{cpu}Bm, \quad (2)$$

где F_{cpu} — тактовая частота микропроцессора; B — размер блока кэш-памяти в байтах (для SuperSPARC равен 32); m — интегральная вероятность промаха при обращении в кэш-памяти первого и второго уровня.

Коэффициент 1,3 в выражении (2) учитывает, что микропроцессор каждый такт нуждается в команде, которая находится в памяти, а также то, что по статистике примерно каждая третья выполняемая команда является командой типа load/store (для RISC микропроцессора SuperSPARC).

Подставляя (2) в (1), задав вероятность промаха в кэш-память равной 0,1, а также учитывая, что шина SBus имеет пиковую пропускную способность в четыре раза ниже, чем MBus, получим, что реальная пропускная способность шины MBus должна быть не меньше чем 240 Мбайт/с, что составляет 75 % от пикового значения. Это означает, что система работает на пределе своих возможностей.

В историческом плане проектирование ВК "Эльбрус-90микро" можно разделить на три стадии [3, 4]:

- использование полностью покупных составляющих в виде вычислительных блоков рабочей станции Sparcstation10;
- воспроизведение со стопроцентной программной совместимостью рабочей станции Sparcstation10 с использованием отечественных микропроцессоров, системных и периферийных контроллеров, построенных на ПЛИС, и повторением конструктивных решений, примененных фирмой Sun;
- модификация структуры и конструкции вычислительного комплекса, связанная с улучшением характеристик, введением современных интерфейсов, переходом на другую периферию, выполнением требований заказчика, исчезновением с рынка используемых комплектующих и другими причинами.

Блок-схема первоначального варианта комплекса "Эльбрус-90микро" практически повторяла базовую блок-схему для рабочей станции Sparcstation10. Однако в дальнейшем возникли причины, требующие модификации исходной структуры:

- построение персонального компьютера на базе стандарта ATX;
- разработка вычислительного комплекса на базе широко распространенного индустриального стандарта CompactPCI при сохранении возможности работы под операционной системой Solaris;
- увеличение пропускной способности ввода-вывода;
- постепенный переход к архитектуре с одной или двумя шинами PCI вместо устаревшей шины SBUS;
- включение в состав комплекса современных периферийных интерфейсов, таких как IDE, USB, AC-97 и других, подключаемых к шине PCI.

Структура, изображенная на рис. 2, получена из исходной (см. рис. 1) путем добавления еще одной периферийной шины — PCI. Это делается с помощью моста MPI, связывающего шину MBUS с шиной PCI.

Введение в структуру, изображенную на рис. 2, дополнительной периферийной шины потребовало увеличения темпа работы оперативной памяти и системной шины MBUS. Кроме того, этого требовало повышение тактовой частоты микропроцессоров с 40 МГц до 150 МГц, а затем до 500 МГц. Хотя при переходе на другие микропроцессоры был в четыре раза увеличен размер кэша второго уровня

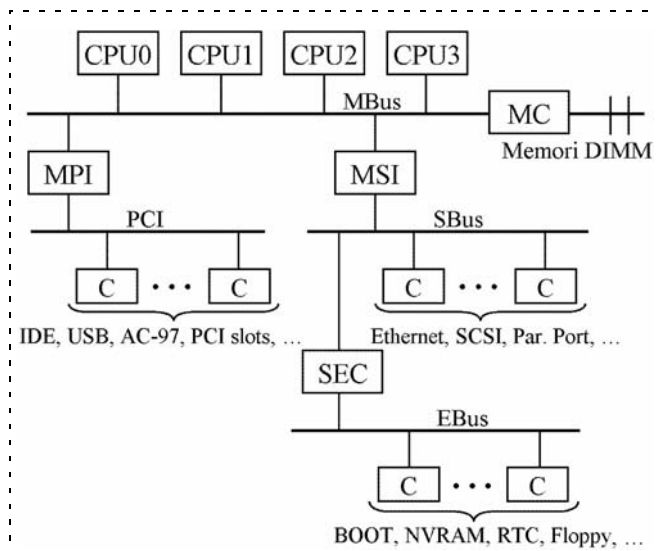


Рис. 2. Блок-схема модифицированной структуры вычислительного комплекса "Эльбрус-90микро"

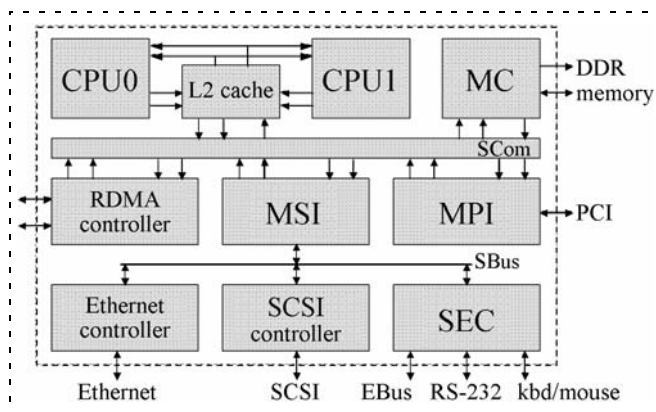


Рис. 3. Структура системы на кристалле R-500S

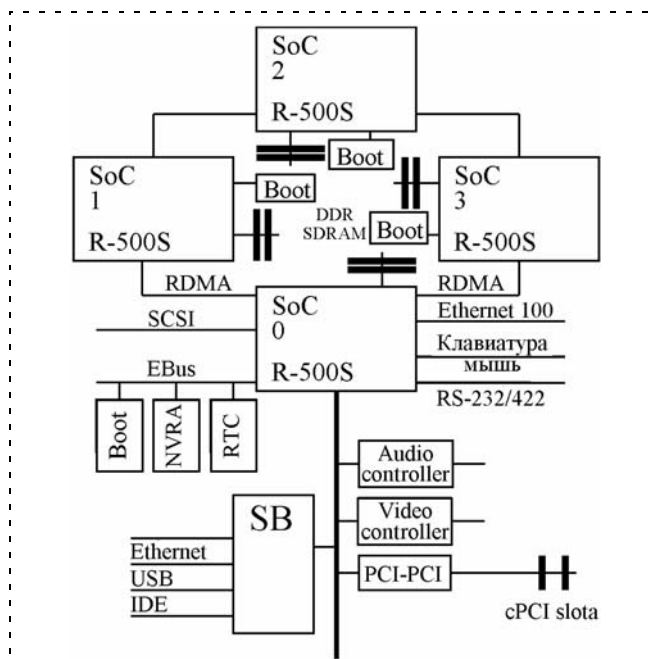


Рис. 4. Вычислительный комплекс на базе системы R-500S

(с одного до четырех мегабайт), темп заявок в память вырос значительно. Тактовая частота шины MBUS и памяти была увеличена более чем в два раза. Однако это позволило поднять реальный средний темп работы шины и памяти примерно на 30 %.

Дальнейшее повышение тактовой частоты шины оказалось невозможным в силу физических ограничений, присущих шине, и из-за характеристик библиотечных элементов ввода-вывода, использованных в микропроцессорах. Надо также отметить, что протокол шины MBUS к началу двадцать первого века сильно устарел, он не предусматривал работу в конвейерном режиме, что наряду с низкой тактовой частотой привело к отставанию по пропускной способности от современных системных интерфейсов более чем на порядок.

Следующим шагом по развитию структуры ВК "Эльбрус-90микро" был переход к использованию многоядерных систем на кристалле.

Система на кристалле R-500S, структура которой представлена на рис. 3, включает в себя большую часть устройств, реализованных в структуре на рис. 2, в виде отдельных микросхем.

В состав R-500S входят: два процессорных ядра CPU0 и CPU1, разработанных на базе микропроцессора R-500 архитектурной линии МЦСТ-R (SPARC, версия 8); кэш второго уровня L2cache; коммутатор SCom, заменивший шину MBus; контроллер оперативной памяти MC; двухканальный контроллер удаленного доступа RDMA; контроллер периферийной шины PCI (MPI); контроллер периферийной шины SBus (MSI), к которому подключены внутренние периферийные контроллеры Ethernet, SCSI, RS-232, периферийной шины EBus, клавиатуры и мыши k/m. Система на кристалле R-500S реализована на технологии 130 нм, тактовая частота ее процессорных ядер равна 500 МГц.

Появление систем на кристалле позволило отказаться от использования шинной архитектуры вычислительного комплекса и перейти к другой топологии связей элементов в системе, в частности, к связям "точка—точка".

Пример многопроцессорного вычислительного комплекса, построенного на четырех системах R-500S и связанных с помощью каналов RDMA, показан на рис. 4. Это одномодульный четырехмашинный комплекс, построенный по технологии "сервер—клиент". Каждая машина содержит двухъядерный микропроцессор, оперативную память, постоянную память для начальной загрузки и имеет выход в сеть. Для обеспечения ввода-вывода модуля используются периферийные контроллеры, подключенные к шине PCI только одной микросхемы R-500S.

При выборе структуры вычислительного комплекса "Эльбрус-3М1" [5] ставились следующие основные цели:

- построение многопроцессорной системы с общей памятью;

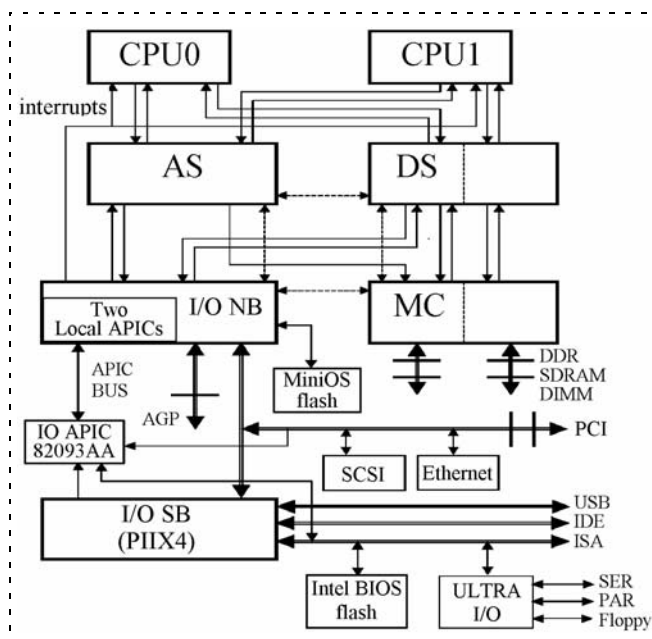


Рис. 5. Структура вычислительного комплекса "Эльбрус-3М1"

- обеспечение высокой пропускной способности каналов, связывающих процессоры с памятью;
- максимальная аппаратная поддержка обеспечения бинарной совместимости с платформой x86 фирмы Intel.

Для реализации поставленных целей, а также в связи с тем, что ВК "Эльбрус-3М1" разрабатывался на пять лет позже ВК "Эльбрус-90микро", было принято решение построить центральную часть комплекса на основе коммутатора, отказавшись от использования шины, а периферийную часть заимствовать от компьютера фирмы Intel, построенного на базе чипсета 440GX.

Структурная схема ВК "Эльбрус-3М1" представлена на рис. 5. Центральная часть комплекса включает два процессора (CPU-0 и CPU-1), адресный коммутатор AS, двухканальный коммутатор данных DS, четырехканальный контроллер памяти MC (на рис. 5 показаны два канала), системный контроллер ввода-вывода два локальных программируемых контроллера прерываний (LoAPIC). Все контроллеры выполнены на ПЛИС.

Для достижения максимальной пропускной способности между абонентами в системе:

- во всех абонентах применена буферизация (имеются соответствующие очереди) запросов по входу и выходу;
- разделены тракты передачи адресов и тракты передачи данных;
- выполнение запроса разделено на фазу передачи адреса (тракты передачи адресов) и фазу выдачи сообщений о процессе выполнения запроса (тракты передачи сообщений-ответов);
- в межсоединениях применяются DDR-интерфейсы (данные передаются на положительном и отрицательном фронтах синхроимпульсов);

- основные тракты передач выполнены однопавленными;
- в адресном коммутаторе имеется специальный фильтр "сноор-запросов" в системе для сокращения лишних когерентных обращений в кэш-памяти процессоров.

Структура вычислительного комплекса с использованием коммутатора имеет свои преимущества и недостатки по сравнению со структурой, построенной с использованием шин. Преимущество — это простота масштабирования. Добавление процессоров в систему увеличивает темп поступления заявок в память и требует добавления модулей памяти, подключаемых через дополнительные каналы коммутатора. Таким образом, может быть увеличена суммарная пропускная способность системы. При использовании шины этого можно добиться, повышая тактовую частоту работы шины, что практически труднодостижимо, особенно при большой разрядности шины.

Вместе с тем, существенный недостаток структуры с коммутатором — это большой объем оборудования и, соответственно, высокая стоимость. В случае со структурой ВК "Эльбрус-3М1" использование ПЛИС для построения коммутатора значительно увеличило стоимость комплекса. Кроме того, использование устаревшего контроллера "южного моста" PIIX4 не предоставляет, с современных позиций, требуемый набор функциональных возможностей ввода-вывода.

В настоящее время происходит очередной виток эволюции структурных решений для комплексов "Эльбрус". Это связано с завершением проектирования отечественных микропроцессоров Э3S и МЦСТ-4R, а также контроллера периферийных интерфейсов (КПИ). Заложенное при проектировании решения по организации связей в многопроцессорной системе с использованием соединенного типа "точка—точка" размещение контроллеров

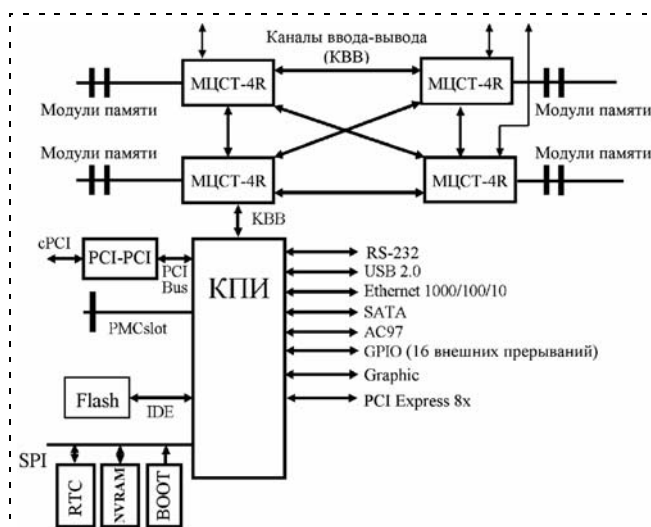


Рис. 6. Структура многопроцессорного вычислительного комплекса на микропроцессорах МЦСТ-4R

памяти и системного контроллера в микропроцессорах и унификация канала ввода-вывода позволяет строить единую для двух архитектурных платформ структуру вычислительного комплекса без использования дополнительных связующих элементов. На рис. 6 показана структура такого комплекса с использованием микропроцессоров МЦСТ-4R. В этой многопроцессорной системе используется общая память с несимметричным доступом и аппаратной поддержкой когерентности иерархии памяти [6].

Решение проблемы стоимости и импортозамещения

Есть области применения вычислительной техники, где крайне необходимо использование отечественной элементной базы. К таким областям, в первую очередь, относятся системы вооружения и военной техники. Сегодня в этих системах часто используются вычислительные средства, построенные на импортных комплектующих. Прежде всего, это определяется не техническими характеристиками, а бытующим мнением, что импортная техника намного дешевле отечественной.

Действительно, существует проблема стоимости проектирования вычислительных средств на отечественной элементной базе, причем есть две стороны этой проблемы: первая — стоимость разработки, вторая — стоимость конечного продукта. На сегодняшний день есть возможность частично сократить стоимость перспективных разработок за счет того, что создан определенный задел в виде закупленных САПР и некоторых библиотек для проектирования микропроцессоров и контроллеров. Кроме того, стоимость разработки значительно уменьшается за счет сокращения числа итераций, использованных для изготовления работающих микропроцессоров и контроллеров. Этому способствует техника прототипирования с использованием ПЛИС, позволяющая сократить число итераций по изготовлению кристаллов.

Что касается стоимости изготовления вычислительных средств, то на сегодняшний день она выше стоимости зарубежных аналогов по нескольким причинам:

- за счет высоких накладных расходов отечественных заводов, изготавливающих вычислительные комплексы небольшими сериями;
- за счет закупки импортных комплектующих через цепочку поставщиков-посредников;
- за счет использования дорогостоящих ПЛИС в качестве системных и периферийных контроллеров.

Если первые две причины трудно устранимы в ближайшее время и носят не технический характер, то проблема с заменой дорогостоящих ПЛИС вполне разрешима. Использование в перспективных разработках технологии "системы на кристалле" и полужаказных микросхем контроллеров периферийных интерфейсов, о чем говорилось выше, позволяет значительно уменьшить стоимость вычис-

лительного комплекса. В частности, для вычислительного комплекса, структура которого изображена на рис. 6, удается сократить стоимость более чем в три раза по отношению к структуре, изображенной на рис. 5, и снизить процент использования импортных комплектующих примерно до 10 %.

Надо отметить, что использование покупных импортных вычислительных устройств для построения комплексов, предназначенных для систем вооружения и военной техники, требует решения ряда задач, повышающих исходную стоимость:

- создание "страхового" запаса комплектующих, закупаемых для того, чтобы обеспечить гарантийный ремонт в течение всего жизненного цикла изделия;
- разработка дополнительных адаптерных ячеек и модулей, необходимых для сопряжения с каналами обслуживаемой системы;
- разработка специальных конструкций для размещения покупной коммерческой техники в целях обеспечения требований соответствующих групп применений;
- адаптация системного и функционального программного обеспечения;
- проведение различных испытаний, включая спецпроверки и специсследования.

В результате стоимость вычислительных комплексов, построенных на отечественных микропроцессорах и контроллерах, может быть сравнима со стоимостью комплексов, построенных с использованием покупных импортных вычислительных средств.

Заключение

В заключение следует отметить, что направление развития вычислительных средств серии "Эльбрус" позволяет решить как задачу повышения технических характеристик, в первую очередь производительности, так и задачу снижения стоимости. Это направление — разработка многоядерных систем на кристалле и полужаказных контроллеров периферийных интерфейсов, отказ от использования дорогостоящих ПЛИС и сокращение номенклатуры комплектующих элементов импортного производства.

Список литературы

1. SPARCengine 10 OEM Technical Manual. Sun Microsystems Computer Corporation. 1993.
2. Hennessy J. L., Patterson D. Computer architecture: a quantitative approach. Fourth edition. Morgan Kaufman publishers, 2006. С. 208—218.
3. Фельдман В. М. Вычислительные комплексы "Эльбрус-90микро" // Информационные технологии. 2005. № 1. С. 17—26.
4. Фельдман В. М. Микропроцессорные вычислительные комплексы отечественной разработки // Сб. науч. тр. ИМВС РАН. Высокопроизводительные вычислительные системы и микропроцессоры. 2003. С. 3—15.
5. Бабаян Б. А., Ким А. К. и др. ОКР Эльбрус-3М: Дополнение к эскизно-техническому проекту. Кн. 3. М., 1996. С. 1—137.
6. Ким А. К., Фельдман В. М. СуперЭВМ на основе архитектурной платформы "Эльбрус" // Электроника. 2009. № 2. С. 15—22.

В. И. Глухов, нач. отделения,
А. В. Глухов, канд. техн. наук, нач. отдела,
В. А. Прилипко, канд. техн. наук, нач. отдела,
 ОАО "ИНЭУМ им. И. С. Брука"
 safronova_t@ineum.ru

Построение систем радиационного контроля на базе УВК СМ1820М

Рассматриваются особенности архитектуры и характеристики оборудования, выполняющего функции коммуникационных процессоров, создающих большое число информационных каналов для работы с интеллектуальными датчиками.

Ключевые слова: радиационный контроль, радиационный мониторинг, коммуникационный процессор, интеллектуальный датчик, СМ1820М, RS-485, Ethernet

Практически любые объекты, связанные с использованием ядерной энергии, такие как АЭС, экспериментальные установки, хранилища радиоактивных отходов, являются потенциально опасными для жизни и здоровья населения [1].

В условиях участвовавших аварий и катастроф техногенного характера особую важность приобретают системы радиационного мониторинга, которые, как показывает опыт аварий на Чернобыльской АЭС, на АЭС "Фукусима-1", становятся инструментом, выполняющим критически важную роль в обеспечении безопасности населения [2].

В Российской Федерации накоплен значительный опыт создания систем радиационного контроля, являющихся важным элементом обеспечения безопасности АЭС и других объектов использования ядерной энергии [3]. В КБ "Проминжиниринг" разработан ряд систем радиационного контроля для АЭС "Бушер" (Иран), "Куданкулам" (Индия), 2-го блока Ростовской АЭС [4]. ОАО "СНИИП" разработал и поставил системы радиационного контроля на Тяньваньскую АЭС (Китай) и на Калининскую АЭС [5].

Технические и программные средства систем радиационного контроля

Системы радиационного контроля представляют собой пример систем сбора данных, в которых многочисленные источники информации распределены на обширной территории и находятся на большом удалении друг от друга, а также от центра обработки информации. Системы радиационного контроля строятся как многоуровневые, иерархические системы, на верхнем уровне которых находятся серверы и автоматизированные рабочие места, связанные с концентраторами информации, к которым подключены средства сбора и предварительной обработки информации. Системы радиационного контроля

относятся к техническим средствам, важным для безопасности, в которых предъявляются повышенные требования к надежности и живучести оборудования и программного обеспечения, входящего в их состав. Выход из строя какой-либо единицы оборудования не должен приводить к выходу из строя системы в целом.

Семейство технических и программных средств СМ1820М предоставляет разработчикам систем радиационного контроля и других систем, работающих на атомных станциях и объектах использования ядерной энергии, функционально полный набор оборудования, позволяющий создавать многоканальные резервированные системы сбора данных и управления, оснащенные как датчиками, выдающими информацию в виде аналоговых, дискретных или импульсных сигналов, так и интеллектуальными датчиками.

В состав технических средств семейства СМ1820М входят:

- управляющие вычислительные комплексы в различных исполнениях;
- контроллеры, обеспечивающие сбор и предварительную обработку информации, формирование управляющих воздействий.

Программные средства СМ1820М включают в себя системное программное обеспечение с использованием операционных систем Windows, Linux, QNX, программный пакет SCADA—WinCC, программное обеспечение автоматизированных рабочих мест, средства межмашинного обмена, средства дистанционного управления, тесты.

Технические средства СМ1820М сертифицированы Госстандартом России как средства измерения и рекомендованы Госатомнадзором России для использования на объектах использования атомной энергии в системах, важных для безопасности.

Управляющие вычислительные комплексы (УВК) СМ1820М выпускаются в различных конструктивных исполнениях и комплектации, в зависимости от специфики использования. УВК СМ1820М используются как сетевые серверы, как автоматизированные рабочие места, как необслуживаемые устройства сбора и обработки данных. Все исполнения УВК СМ1820М имеют встроенные источники бесперебойного питания и могут по желанию пользователей иметь двухфидерные вводы электропитания. По устойчивости к сейсмическим воздействиям, устойчивости к воздействию электромагнитных помех, пожароустойчивости УВК СМ1820М соответствуют требованиям применения на атомных станциях.

Для использования в качестве сетевых серверов УВК СМ1820М собираются в шкафах-стойках с принудительной вентиляцией, могут иметь один или два системных блока, имеющих в своем составе серверную материнскую плату с набором периферийных устройств. Возможно использование системных блоков, выполненных на основе модулей на базе интерфейса CompactPCI. В качестве

средства визуализации серверные исполнения УВК СМ1820М комплектуются встроенным монитором, клавиатурой с трекболом и коммутатором KVM. Устройства сопряжения с сетями на основе оптического или проводного Ethernet или RS-485 включаются в состав сервера по спецификации заказчика.

Автоматизированные рабочие места на основе УВК СМ1820М собираются в одной или двух тумбах с металлической столешницей, на которой размещены монитор, клавиатура, мышь. В тумбе размещены системный блок, источник бесперебойного питания, сетевое оборудование.

Возможно непосредственное включение в состав УВК СМ1820М средств связи с объектом контроля и управления. В этом случае УВК превращается, фактически, в контроллер в шкафном исполнении и может эксплуатироваться в необслуживаемом режиме. При необходимости оператор может подключить к такому УВК ноутбук и выполнить требуемые действия.

Контроллеры семейства СМ1820М конструктивно выполняются в виде настенного шкафа, обеспечивающего уровень защищенности не ниже IP54, и не имеют средств принудительной вентиляции. В зависимости от функций, выполняемых в конкретном случае, контроллеры могут иметь модульное или моноблочное исполнение. Для контроллеров семейства СМ1820М разработана широкая гамма модулей, выполняющих функции процессора, устройств сопряжения с интерфейсами RS-232C/RS-422/RS-485, Ethernet, устройств ввода и вывода аналоговых, цифровых, импульсных сигналов.

Коммуникационные процессоры — средство повышения эффективности систем радиационного контроля

Для систем радиационного контроля характерно широкое применение интеллектуальных датчиков, выходящих на стандартные телекоммуникационные интерфейсы.

Интеллектуальный датчик — конструктивно обособленный первичный измерительный преобразователь, воспринимающий внешнее воздействие и преобразующий его в электрический сигнал, выполняющий оцифровку этого сигнала, предварительную обработку полученной информации (усреднение, нормализацию, масштабирование, преобразование единиц измерения и т. п.) и передачу ее в устройство обработки (контроллер, компьютер) с помощью цифровых интерфейсов связи (RS-232, RS-485, Ethernet и т. д.) с применением различных логических связных протоколов [6].

Разнообразие связных протоколов и их несовместимость, разнотипность и многочисленность датчиков, разнообразие используемых интерфейсов приводит к тому, что устройство обработки информации должно иметь множество разнородных интерфейсных каналов связи и осуществлять об-

мен информацией по различным протоколам. Это усложняет аппаратуру устройства обработки информации и приводит к неэффективному использованию его вычислительных ресурсов.

Для решения этой проблемы в состав УВК СМ1820М входят специализированные устройства, поддерживающие связь с датчиками по различным интерфейсам, выполняющие преобразование протоколов обмена информацией разных датчиков, концентрирование, промежуточную обработку данных и передачу информации на верхний уровень системы сбора и обработки данных, — коммуникационные процессоры.

Коммуникационный процессор (КП) решает задачи концентрирования информации, поступающей от устройств сбора данных и управления нижнего уровня — контроллеров и интеллектуальных датчиков, а также задачи преобразования протоколов обмена различных устройств, ведения базы данных и передачи информации на верхние уровни системы. КП обеспечивает поддержание связи с устройствами, находящимися на значительном удалении друг от друга (сотни метров, километры и более). При необходимости организации связи на расстоянии больше полутора километров в КП могут использоваться кабельные и радиомодемы. В КП должна обеспечиваться возможность использования проводных, оптоволоконных и беспроводных средств связи. Конструктивное исполнение КП должно обеспечивать повышенную степень защищенности от воздействий окружающей среды [6].

КП могут быть использованы в АСУ ТП, в системах сбора данных, охраны, мониторинга экологической, радиационной, химической и метеорологической обстановки.

Обобщенная структурная схема КП показана на рис. 1.

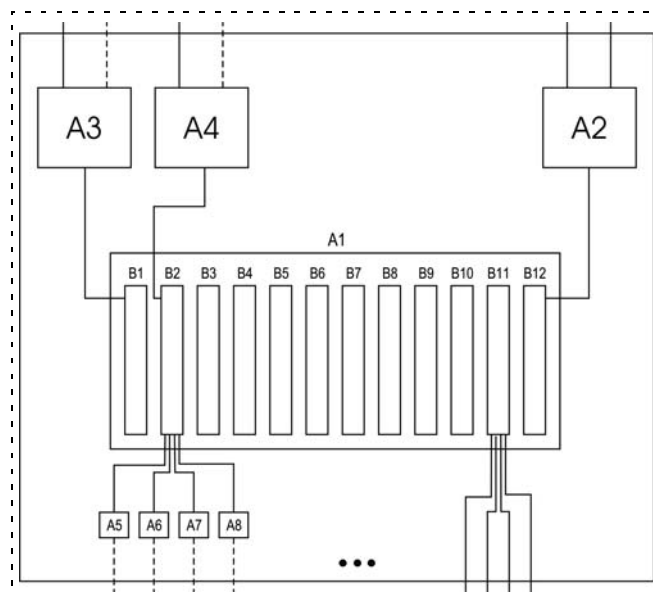


Рис. 1. Обобщенная структурная схема коммуникационного процессора

Основой КП является коммуникационный блок А1. Коммуникационный блок может иметь несколько вариантов исполнения: модульный, моноблочный четырехканальный, моноблочный восьмиканальный и заказной.

Модульный вариант состоит из модуля центрального процессора В1 со встроенным интерфейсом Ethernet 10/100, модуля дополнительного интерфейса Ethernet 10/100 В2 (опция), коммуникационных модулей В3, ..., В11, обеспечивающих связь по протоколам RS-232, RS-485, RS-422 (по выбору) и модуля электропитания В12. Конструктивно блок А1 в модульном исполнении представляет собой монтажный каркас и пассивную объединительную плату формата MicroPC (крейт).

Моноблочные четырех- и восьмиканальные варианты представляют собой многослойную печатную плату, установленную на монтажную панель шкафа, в котором собран КП. На плате установлен производительный процессор архитектуры ARM9, интерфейс Ethernet 10/100 и четыре или восемь каналов интерфейсов RS-422/RS-485 соответственно.

Заказной вариант коммуникационного блока строится на основе моноблочного варианта и может содержать различное число последовательных интерфейсов RS-232C/RS-422/RS-485 или других по требованию заказчика.

Блок А2 — блок двухфидерного питания, который обеспечивает питание КП по двум независимым линиям и автоматическое переключение в случае пропадания напряжения на одном из фидеров. Также блок обеспечивает фильтрацию питающего напряжения и защиту КП от импульсных помех в сети питания. Может поставляться в упрощенной конфигурации с питанием от одного фидера.

Блоки А3 и А4 — оптические коммутаторы Ethernet. Предназначены для подключения КП к оптоволоконным линиям связи с сервером верхнего уровня. Блоки опциональные и могут не устанавливаться, когда нет нужды в оптоволоконных каналах Ethernet. Могут быть установлены коммутаторы WiFi стандартов IEEE 802.11b (g).

Блоки А5, ..., А8 — оптические трансиверы. Преобразуют интерфейсы RS-232/RS-485/RS-422 в оптоволоконные линии. Показано четыре трансивера, но их число определяется проектом системы и может быть иным. Возможно подключение радиомодемов или GSM/GPRS-модемов для организации беспроводной связи.

Всего в одном КП модульного типа может быть реализовано до 40 каналов интерфейса RS-485 или 20 каналов RS-232/RS-422 или комбинации из каналов RS-485 и RS-232/RS-422 и до двух каналов интерфейса Ethernet 10/100.

Структура систем радиационного контроля

Структурная схема системы мониторинга радиационной обстановки показана на рис. 2, где обозначено: ИД — интеллектуальные датчики (радиационного фона, содержания активных элементов в атмосфере и т. д.); КП — коммуникационный процессор; МВУ — машина верхнего уровня, сервер сбора, обработки и архивирования данных; АРМ — автоматизированные рабочие места операторов системы. АРМ работают под управлением SCADA-системы WinCC 5.1. Они позволяют следить за радиационной обстановкой в зоне действия датчиков в реальном масштабе времени и обеспечивают сигнализацию превышения допустимых уровней.

Связь КП с ИД происходит по каналам RS-485, а с МВУ — по дублированному каналу RS-485.

Программное обеспечение КП обеспечивает:

- периодический сбор данных с набора интеллектуальных датчиков, имеющих различные протоколы обмена (нестандартные модификации известного протокола Modbus, не совместимые между собой);
- ведение архива данных, полученных от датчиков, за последние сутки;

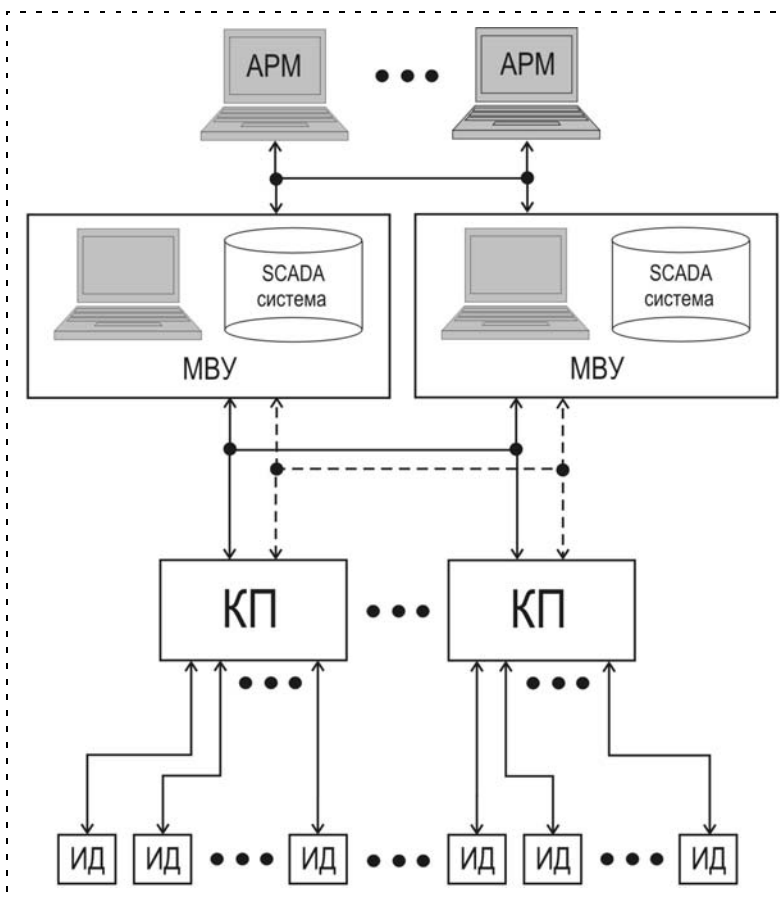


Рис. 2. Структурная схема системы мониторинга радиационной обстановки: ИД — интеллектуальные датчики (радиационного фона, содержания активных элементов в атмосфере и т. д.); КП — коммуникационный процессор; МВУ — машина верхнего уровня, сервер сбора, обработки и архивирования данных; АРМ — автоматизированные рабочие места операторов системы

- привязку событий, регистрируемых датчиками, и всех передаваемых данных к астрономическому времени с точностью 1 с;
- промежуточную обработку (перекодирование) данных, полученных от датчиков;
- трансляцию полученных данных на верхний уровень системы.
- В качестве протокола для связи с верхним уровнем по требованию заказчика используется модифицированная версия протокола Modbus.

Программное обеспечение КП способно определять отказ датчика. При этом в архиве ставится метка об отказе датчика и передается соответствующее сообщение на верхний уровень системы. Машина верхнего уровня может в любой момент затребовать любые данные из архива, хранимого КП.

Разработанные в ОАО "ИНЭУМ им. И. С. Брука" УВК СМ1820М применяются в системах мониторинга радиационной обстановки на Тяньваньской АЭС (Китай), Бушерской АЭС (Иран), АЭС

"Куданкулам" (Индия), а также на ряде объектов использования атомной энергии в России. Системы мониторинга радиационной обстановки прошли все необходимые испытания и проверки, имеют сертификат и акты приемки межведомственной комиссии.

Список литературы

1. **Нормы** радиационной безопасности (НРБ-99) СП 2.6.1.758—99.
2. **Шингарев Н. Э.** Информирование общественности о деятельности предприятий атомной энергетики и промышленности. Сборник докладов международной конференции ЭКОИНФО-2003. М.: МИ, ЭБ Минатома России, 2004.
3. **Рыжов Н. В.** Опыт создания АСКРО АЭС. Сборник докладов международной конференции ЭКОИНФО-2003. М.: МИ, ЭБ Минатома России, 2004.
4. URL: <http://kbpe.ru/info/articles/1>
5. URL: <http://snii.ru/pr/rk.htm>
6. **Глухов В. И., Прилипко В. А., Каневский В. Г.** Коммуникационный процессор СМ1820М КПД // Приборы. 2007. № 6.



Международная молодежная конференция «МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА»

6-8 сентября 2011 года

Государственный научный центр РФ
ЦНИИ РТК

Санкт-Петербург, Тихорецкий пр. 21

ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ



ПРАВИТЕЛЬСТВО
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

ЦЕЛЬ КОНФЕРЕНЦИИ

Привлечение внимания научной и деловой общественности и бизнес сообщества к научным достижениям молодых ученых в области мехатроники и робототехники

ОРГАНИЗАТОР КОНФЕРЕНЦИИ

Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

- Минобрнауки России
- РАН
- Правительства Санкт-Петербурга

ФИНАНСОВЫЕ УСЛОВИЯ

Участие в конференции бесплатное

СЕКРЕТАРИАТ КОНФЕРЕНЦИИ

тел.: (812) 5524162; e-mail: mrspsb@rtc.ru

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- **Тенденции и перспективы развития мехатроники и робототехники**
Миниатюризация. Интеллектуализация. Интеграция. Бионический подход. Проблемы "человеческого" фактора
- **Интеллектуальные системы управления движением**
Методы искусственного интеллекта. Когнитивные и креативные системы. Человеко-машинные системы
- **Мини- и микроробототехника**
Особенности построения. Микроманипулирование. Наноразмерные компоненты
- **Системы осязания и обработка сенсорной информации**
Сенсорные системы общего и специального назначения. Комплексирование сенсорных систем. Распознавание образов. Формирование моделей внешней среды на основе сенсорной информации
- **Реконфигурируемые системы**
Модульные системы переменной структуры. Самоорганизация и самосовершенствование
- **Вопросы метрологии в мехатронике и робототехнике**
Измерения и испытания. Тестирование. Метрологическое обеспечение проектов

Подробная информация о конференции на сайте: <http://www.rtc.ru/>

CONTENTS

Sergeev S. F. Artificial Intelligence: A Psychological Point of View	2
---	---

The problem of a "true" intelligence in artificial systems has been both thoroughly discussed and, paradoxically, neglected throughout the history of the field. The definition of intelligence in engineering has a purposely folk flavour, which while useful in certain situations can hinder the development of the whole field. The present article contains a number of psychological considerations on the problem as well as a brief practical overview of possible post-non classical psychology (as defined by V. S. Stepin) applications in AI design.

Keywords: intelligence, artificial intelligence, re-entry, post-non classical psychology, environment

Kudinov Yu. I., Kudinov I. Yu. Stability of Fuzzy Productive Dynamic Systems	6
---	---

Fuzzy productive dynamic models and systems, and also methods of the analysis of stability of fuzzy control systems are considered.

Keywords: fuzzy productive dynamic models and systems control systems, methods of the analysis of stability

Gorodetsky V. I., Bukhvalov O. L. Multi-Agent Self-Organized GRID Resource Management	20
--	----

Real time GRID resource management intended for providing, for its clients, with high level of Quality of Service is a topmost and in some aspects challenging problem. Indeed, GRID can comprise huge number of heterogeneous computers of various performances. Its nodes can leave the GRID at any time and join again. Input task flow can be of unpredictable dynamics and incoming tasks are of unknown complexity. It is common opinion that a centralized model of real time management of such GRID resources is hopeless due to its computational complexity.

The paper proposes a model for distributed GRID resource real time self-organized management implemented using P2P multi-agent architecture. In this model, management task is solved using only simple local interactions of neighbor agents set up on top of FIPA compliant distributed P2P agent platform. The paper describes self-organization mechanism, GRID resource management system architecture and developed software prototype. The software prototyping uses several software tools developed in Intelligent System Lab. of SPIIRAN. In particular, it uses distributed P2P agent platform, tool for emulation of distributed P2P communication environment, generator of networks of a predefined topology and some others. The developed software prototype includes also model of external environment simulating Poisson task flows incoming to GRID nodes. Experimental results proved that the proposed self-organized multi-agent GRID management system provides the satisfactory load balancing among the GRID nodes as well as balanced quality of service measured in terms of averaged task waiting times for each particular GRID node.

Keywords: self-organization, multi-agent systems, GRID, resource management, P2P agent platform

Morozov V. V., Zhdanov A. V., Trefilov M. A. Technical System Presentation Using Petri Nets is Described in this Article	26
---	----

An example of a mathematical model for a forward motion electromechanical drive system is given. A failure probability is counted using Petri net based method.

Keywords: mathematical model, Petri nets, reliability technical system

Sochnev A. N. Methods of Reducing the Size of the Robotic Technology Systems Net Models	31
--	----

This article presents the results of well-known compression techniques to minimize the information that describes the structure of Petri nets. The efficiency of compression of the incidence matrix of Petri nets in various ways. The methods can be applied to any software products using the apparatus of Petri nets.

Keywords: Petri net, the incidence matrix, compression factor

Vilver P. Yu., Protasov A. V. Imitating Modeling of Complex Dynamic Systems with Use of Networks of Petri. .	35
---	----

Article is devoted to development of imitating model on the basis of the expanded formalism of networks of Petri for research of complex dynamic systems and maintenance of their safe operation.

Keywords: imitating model, a network of Petri, a network formalism, difficult dynamic system, safety

Belenki L. B., Borovik S. Yu., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P., Tulupova V. V. Shortcut Method for Data Requisition about Compressors and Turbines Blade Tips Displacements	40
---	----

A description of the new shortcut method for data acquisition about three-coordinates displacements of compressors and turbines blade tips by means of cluster of single-coil eddy-current sensors distributed over the stator is considered. Features of sensors commutation in differential measuring circuit and sensor's compensation function are given too.

Keywords: shortcut method for data acquisition, coordinates of blade tips displacements, wheel with blades, realizability of the method, cluster distributed over the stator, single-coil eddy current sensors, sensitive elements made as a piece of conductor

Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Solovyov N. G. Investigation of the Impact of Air Leakage into the Gas Volume on the Laser Power 46

In this paper, the impact of air leakage into the gas volume of the laser with a non-self-sustained glow discharge is studied. The method that expands the diagnostic capabilities of the laser control systems is proposed. It allows controlling the leakage of air into the laser gas volume.

Keywords: laser technological complex, non-self-sustained glow discharge, gas volume, diagnostics, laser power, control system

Prokhorov N. L., Shvein A. A., Znaiko G. G., Krasovsky V. E. Problems of Information Processing Control in Medical Equipment Design and Implementation 51

In this article, experience, problems and information processing models used within several interdisciplinary projects targeted at development of medical diagnostic equipment are considered. Future prospects for imported component substitution as well as national healthcare telemedicine infrastructure growth are discussed. To analyze the problems of management efficiency in these areas, evolutionary engineering model is proposed which enables formal description of knowledge transformation in various application branches into a set of interconnected technological and evolutionary cycles.

Keywords: information processing, development, technology, medical diagnostics application area, evolution, model, healthcare infrastructure, telemedicine

Egorov G. A., Belonogov A. D., Ostrovsky M. A., Rejzman J. A. Human Machine Interface Implementation in the Integrated Technology of Designing Automated Systems of Monitoring and Control 56

The object of the investigation is one of the components of the integrated technology for designing of the distributed automated systems of monitoring and control, which is considered to be the basis for the operator stations' software development. The general principles of implementation of the operator interface, methods for creating mnemonic algoblocks (special kind of functional blocks) of various types, including those with the projected image, are being considered. Possibilities of reusing already developed mnemonic algoblocks — their uploading from earlier projects and formation of the use libraries — are examined.

Keywords: distributed systems design, human machine interface, operator stations

Feldman V. M. Direction of Computing Devices Series Elbrus 62

Presents key directions of improving the structure of computing devices built on domestic series microprocessors MCST-R and Elbrus. Proposed methods for improving the performance of these devices, ways to reduce their cost.

Keywords: computing devices, microprocessors, controllers, system-on-a-chip, bus, switch

Glukhov V. I., Glukhov A. V., Prilipko V. A. Construction of Radiation Control Systems Based on Controlling Computer Complexes SM1820M 67

Radiation control systems are the classic example of hierarchically-structured system of data acquisition where numerous data sources are situated at a great distance from each other and from the processing centre. Wide application of smart sensors connected by standard telecommunication interfaces is typical of radiation control systems. To work with such systems the complex of software and technical means SM1820M has developed communication processors in recent years.

The article deals with the peculiarities of the architecture and characteristics of the equipment which fulfills the functions of communication processors creating a great number of information channels to work with smart sensors.

Keywords: radiation control, radiation monitoring, communication processor, smart sensor, SM1820M, RS-485, Ethernet

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Дизайнер Т. Н. Погорелова.

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор М. Г. Джавадян.

Сдано в набор 26.04.2011. Подписано в печать 17.06.11. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 8,82. Уч.-изд. л. 10,29. Заказ 466. 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