

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 3 (84)

март

2008

Редакционный совет:

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

Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

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

Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

РОБОТОТЕХНИКА

- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Кадочников М. В.** Алгоритмы управления движением многозвенных мехатронно-модульных роботов с адаптивной кинематической структурой 2
- Большаков А. А., Голик М. С.** Интеллектуальная система поиска неисправностей в робототехническом комплексе 10
- Скрябин А. М., Кардаш Д. И., Фрид А. И.** Модернизация управляющих программ систем автоматического управления автономными мобильными объектами 14

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Гранкин Б. К., Козлов В. В., Лысенко И. В., Петров Г. Д.** Метод контроля технического состояния уникальных механических объектов при длительной их эксплуатации . . 20
- Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Барулина М. А.** Датчик температур для мониторинга и диагностики ракетно-космической техники в условиях тепловых ударов . . 24
- Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Принципы построения систем сбора, преобразования и обработки информации для экспериментальных исследований винтовентиляторов 28

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Малюгин В. Д., Иванов Е. Б.** Экспертная система управления технологическими процессами на примере шлакоперерабатывающей установки 34
- Бондарчук А. А., Матвеев М. Г.** Анализ моделей управления твердостью стали в процессе плавки 37
- Атланов А. В.** Оценивание эксплуатационных характеристик смазочно-охлаждающей жидкости в ходе технологического процесса 40

МЕХАТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

- Морозов В. В., Жданов А. В., Костерин А. Б.** Биомеханические тренажеры на базе мехатронных модулей для разработки посттравматических контрактур 43
- Черняев А. В., Ясюкевич Д. О.** Моделирование процесса насыщения потока крови кислородом в мехатронных медицинских устройствах массообменного типа . . . 47
- Ковшов Е. Е., Мутин Д. И.** Управление гетерогенными данными в корпоративной информационной системе медицинского учреждения путем применения XML-технологий . 51
- Козырев В. В., Новожилов А. И., Федотов О. В., Паринов С. М.** Шарнирно-стержневая конструкция автоматизированного аппарата остеосинтеза и ее исследование 54
- Копыльцов А. В., Сенкевич Ю. И., Крыленков Л. В., Альжасем Х. И.** Моделирование капиллярного кровотока с использованием алгоритма распределенных вычислений . 54
- Филатов И. А., Розинов А. В.** Портативный комплекс экспресс-диагностики смерти мозга 55
- Моисеев В. Б., Бурлюкина Е. В., Павлов А. Ю., Истомина Е. В.** Рынок медицинской техники (на примере КВЧ-аппарата "АИСТ") 55
- Ковшов Е. Е., Мутина Е. И.** Повышение эффективности функционирования распределенной медицинской информационной системы на основе интеллектуального анализа информации 55
- Истомина Т. В., Козлова Н. В., Назарова Н. В.** Применение модели выпускника при профориентации студентов медико-технического профиля 55
- Зубков А. Ф., Назарова Н. В., Колгушкина Г. С.** Моделирование интеллектуальной деятельности в системе медико-технического образования 55
- Contents** 56

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

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

УДК 62-5:621.865.8

И. М. Макаров, акад. РАН,

В. М. Лохин, д-р техн. наук, проф.,

С. В. Манько, д-р техн. наук, проф.,

М. П. Романов, д-р техн. наук, проф.,

М. В. Кадочников,

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

Алгоритмы управления движением многозвенных мехатронно-модульных роботов с адаптивной кинематической структурой*

Рассматриваются вопросы разработки алгоритмов управления движением для различных конфигураций многозвенных мехатронно-модульных роботов с адаптивной кинематической структурой.

Введение

Развитие теории автоматического управления, методов искусственного интеллекта, информационных, телекоммуникационных и сетевых технологий, достижения в микросистемной технике, мехатронике и других научно-технических направлениях на рубеже 90-х годов XX века вызвали резкую активизацию поисковых исследований и опытно-конструкторских работ по созданию многозвенных мехатронно-модульных роботов с адаптивной кинематической структурой. При этом модульность построения этого типа устройств является той принципиальной особенностью, которая потенциально позволяет говорить об обеспечении адаптивности кинематической структуры, ее наращиваемости, реконфигурируемости и т. д. в соответствии со спецификой решаемых задач. Реализация подобных свойств в конкретных образцах автономных мехатронно-модульных роботов, которые представляют значительный интерес с точки зрения целого ряда практических приложений, обуславливает необходимость разработки интеллектуальных систем управления, обладающих широким набором функциональных возможностей. Концепция построения мехатронных роботов с адаптивной кинематической структурой предполагает наличие однотипных модулей, объединяемых в единую многозвенную конструкцию.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 05-08-33551).

Типовые мехатронные модули включают в свой состав один или несколько двигателей с поворотными шарнирами или простейшими механическими передачами, интерфейсные площадки для обеспечения взаимного механического, электрического и информационного сопряжения, управляющий контроллер, различные виды датчиков и автономный источник питания. Последовательное соединение таких модулей тем или иным образом позволяет создавать различные по структуре механизмы, обладающие целым рядом преимуществ, к числу которых следует отнести:

- многофункциональность, обеспечиваемую реконфигурацией и наращиваемостью кинематической структуры в соответствии со спецификой решаемой прикладной задачи;
- мобильность, проходимость и реализуемость различных видов движений (в зависимости от выбранной конфигурации) для перемещения по сложным поверхностям и рельефам, в условиях ограниченного пространства и т. д.;
- высокую надежность (за счет идентичности модулей и возможности автономной работы отдельных элементов);
- способность к самовосстановлению за счет автоматической замены отказавших элементов.

Идеология мехатронно-модульного построения многозвенных роботов с адаптивной кинематической структурой допускает множество различных вариантов своего практического воплощения, подтверждением чему служит множество самостоятельно развиваемых программ соответствующей тематики [1]. В ходе их выполнения были предложены оригинальные варианты конструктивного исполнения различных типов многозвенных мехатронно-модульных роботов с адаптивной кинематической структурой и сформулированы ключевые задачи на пути к созданию интеллектуальных реконфигурируемых систем:

- ♦ разработка принципов построения интеллектуальных систем управления на базе распределенных вычислительных структур;
- ♦ разработка моделей и алгоритмов управления движением многозвенных мехатронно-модульных робототехнических систем;
- ♦ разработка методов и алгоритмов самообучения и самоорганизации многозвенных мехатронно-модульных робототехнических систем.

Решение этих задач не только имеет важное прикладное значение, но и представляет самостоятельный научный интерес с позиций фундаментального развития теории искусственного интеллекта.

Принципы построения систем управления многозвенными мехатронно-модульными роботами с адаптивной кинематической структурой

Конструктивные особенности многозвенных мехатронно-модульных роботов с адаптивной кинематической структурой и требования к их функциональным возможностям по обеспечению автономной работы в условиях неопределенности, реконфигурируемости в соответствии с окружающей обстановкой, самовосстанавливаемости в зависимости от состояния собственных подсистем и т. д. по существу предопределяют следующие ключевые принципы построения систем управления такими устройствами:

- система управления роботом должна создаваться на основе распределенного комплекса аппаратных средств, объединяющего в своем составе контроллеры отдельных мехатронных модулей;
- система управления отдельным модулем (или их ограниченным набором) должна обладать степенью интеллектуальности в большом [2], обеспечивая принятие решений по реализации движений на основе обработки знаний и событий;
- система управления роботом должна обладать степенью интеллектуальности в целом [2], обеспечивая возможность планирования поведения, прогноза развития событий, самообучения и самоорганизации.

Таким образом, функциональная структура интеллектуальной системы управления роботом (рис. 1) должна предусматривать наличие иерархической модели представления знаний для решения всей совокупности задач информационно-измеритель-

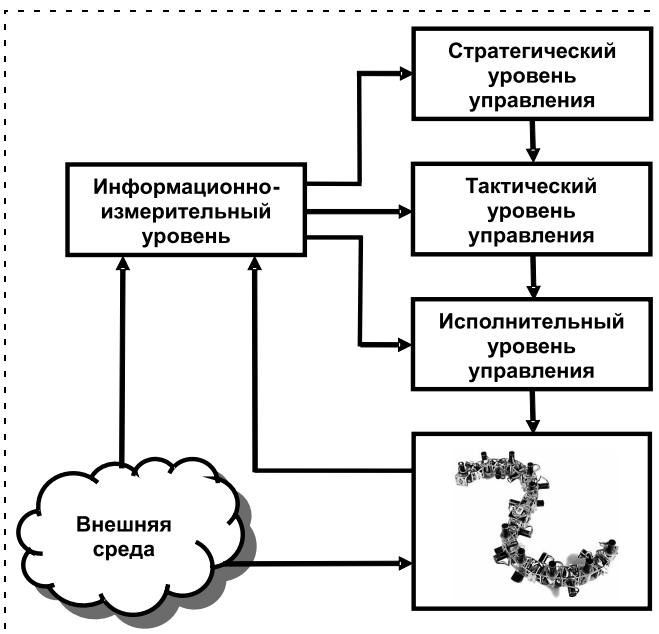


Рис. 1. Функциональная структура интеллектуальной системы управления многозвенным мехатронно-модульным роботом

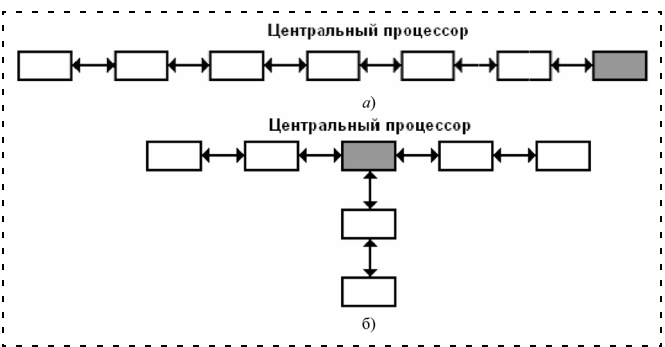


Рис. 2. Перераспределение функций центрального процессора в распределенной системе управления мехатронно-модульным роботом:

a — для линейной конфигурации; *б* — для конфигурации шагающего устройства с тремя конечностями

ного, стратегического, тактического и приводного уровней по анализу и распознаванию обстановки, формированию последовательности целесообразных действий и отвечающих им движений, а также синтезу исполнительных законов, удовлетворяющих заданным показателям качества.

При этом, как показано на рис. 2, роль центрального процессора, основные функции которого связаны с обработкой сенсорной информации и навигационных данных, планированием поведения, расчетом параметров движения, синхронизацией работы отдельных узлов и т. д., должна возлагаться на один из контроллеров, выбираемый из распределенного состава аппаратных средств интеллектуальной системы управления в зависимости от задаваемой конфигурации многозвенного мехатронно-модульного робота.

Следует отметить, что перспективы создания интеллектуальных систем управления, способных обеспечить высокую эффективность и надежность функционирования автономных мобильных роботов различных типов и назначения в условиях неопределенности на основе комплексного применения современных технологий обработки знаний, имеет не только теоретические обоснования, но и целый ряд практических подтверждений [3–7].

Ключевые вопросы создания интеллектуальных систем управления многозвенными мехатронно-модульными роботами с адаптивной кинематической структурой определяются двумя основными факторами: сложностью самого объекта и необходимостью реализации создаваемых алгоритмов на базе распределенной структуры вычислительных средств.

Алгоритмы управления движением многозвенных мехатронно-модульных робототехнических систем

Специфика и разнообразие алгоритмов управления движением мехатронно-модульных роботов в каждом конкретном случае будет во многом определяться особенностями построения конструк-

тивных элементов роботов. Тем не менее, однотипность этих элементов и однородность вычислительной структуры, образуемой встроенными в них контроллерами, обуславливают целесообразность попытки создания алгоритмов управления, обеспечивающих регулярную повторяемость движений модулей в составе единой кинематической цепи для ее целенаправленного перемещения. Привлекательность такого подхода связана с простотой его программного воплощения, предполагающего организацию последовательной передачи управляющих параметров от модуля к модулю и не требующего больших вычислительных ресурсов.

Возможности разработки и применения подобных алгоритмов для управления движением многозвенных робототехнических систем могут быть рассмотрены на примере различных кинематических структур, формируемых на основе типовых мехатронных модулей с двухстепенными шарнирами вращения (рис. 3). Принципиальная конструкция этих шарниров, допускающая повороты относительно двух ортогональных направлений, перпендикулярных продольной оси модуля, позволяет имитировать строение и способы передвижения позвоночных пресмыкающихся и ряда других биологических прототипов [8].

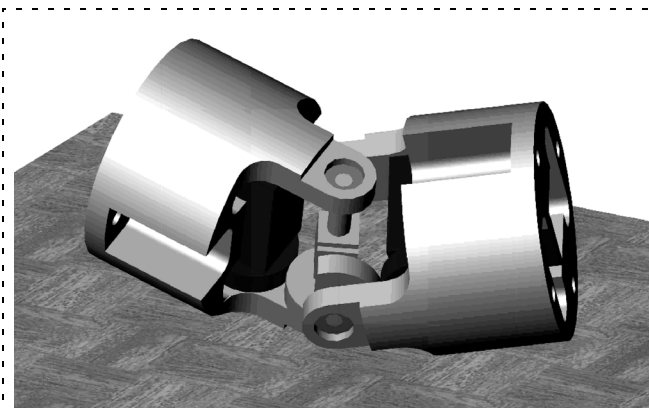


Рис. 3. Принципиальная конструкция модуля с универсальным двухстепенным шарниром вращения

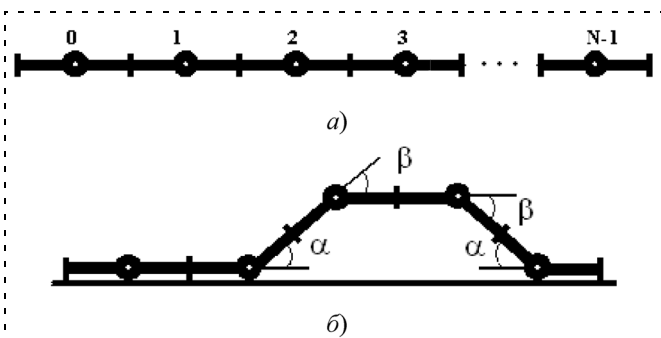


Рис. 4. Многозвенный мобильный робот на базе мехатронных модулей с двухстепенными шарнирами вращения: а — линейная конфигурация кинематической структуры; б — волнообразное движение

Так, для многозвенного мехатронно-модульного робота с линейной конфигурацией кинематической структуры (рис. 4, а) один из возможных вариантов перемещения по плоской поверхности сводится к реализации волнообразных движений (рис. 4, б) по аналогии с движениями, совершаемыми гусеницей.

Как показано на рис. 4, б, при условии своей симметричности проходящая вдоль кинематической цепи волна будет определяться взаимосвязью углов в шарнирах соответствующих модулей:

$$(N_B - 2)\beta - 2\alpha = 0, \quad (1)$$

где $3 \leq N_B \leq N - 1$, $N \geq 4$; N — число модулей в составе кинематической цепи; N_B — число модулей в волне; β — угол отклонения шарниров от их нулевого положения в вертикальной плоскости для всех промежуточных модулей в волне (за исключением крайних); α — угол отклонения шарниров от их нулевого положения в вертикальной плоскости для крайних модулей в волне; $\alpha \leq \frac{\pi}{2}$.

Задавая значение угла α для крайних модулей, а также их общее число N_B в волне исходя из соотношений о ее высоте и требуемой скорости перемещения, можно определить отклонение β для шарниров промежуточных модулей:

$$\beta = \frac{-2\alpha}{N_B - 2}. \quad (2)$$

Формирование и прохождение волны, предполагающей последовательное воспроизведение повторяемых движений отдельных элементов кинематической цепи, может обеспечиваться за счет организации межмодульной передачи данных с обработкой соответствующих углов поворота.

Программно-алгоритмическая реализация этого процесса сводится к установке счетчика, позволяющего контролировать пошаговое распространение волнообразного движения от модуля к модулю вдоль всей кинематической цепи. При этом на контроллер каждого мехатронного модуля возлагается ряд элементарных проверок по сопоставлению собственного порядкового номера n ($n = 0, 1, \dots, N - 1$) с текущим показанием счетчика *count* для выбора требуемого значения угла поворота *Angle*:

- ЕСЛИ ($n = \text{count} + 1$), ТО *Angle* = 0;
- ЕСЛИ ($n = \text{count}$), ТО *Angle* = α ;
- ЕСЛИ ($(\text{count} - (N_B - 2)) \leq n \leq \text{count} - 1$), ТО *Angle* = β ;
- ЕСЛИ ($n = \text{count} - N_B + 1$), ТО *Angle* = α ;
- ЕСЛИ ($n = \text{count} - N_B$), ТО *Angle* = 0.

Следует отметить, что значение счетчика *count*, изменяемое с единичным шагом, задается центральным процессором в диапазонах $[0; N + N_B]$ или $[N + N_B; 0]$ в соответствии с необходимостью

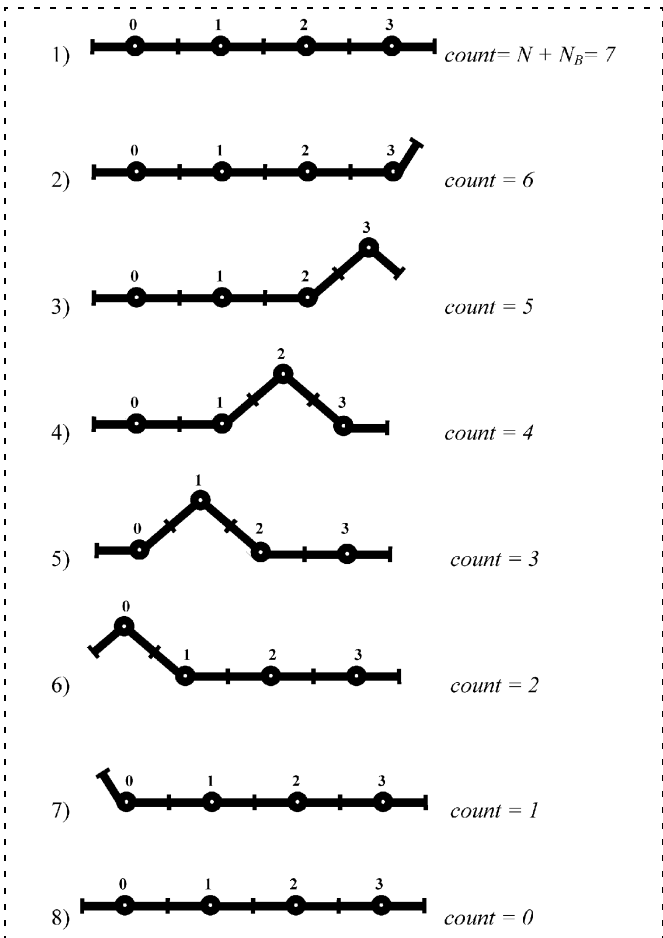


Рис. 5. Прямолинейное перемещение многозвенного мехатронно-модульного робота при реализации волнообразного движения

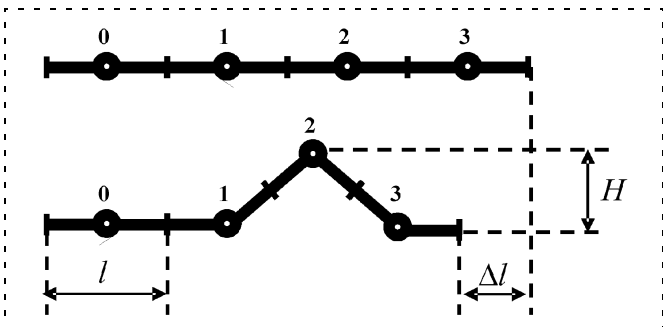


Рис. 6. Определение характеристик волнообразного движения многозвенного мехатронно-модульного робота

продвижения волны в прямом или обратном направлении.

В качестве примера на рис. 5 показано пошаговое распространение трехзвенной волны ($N_B = 3$), регламентируемое в зависимости от значений счетчика $count$ и обеспечивающее прямолинейное перемещение кинематической цепи из четырех мехатронно-модульных элементов ($N = 4$).

Как показано на рис. 6, важнейшими характеристиками, которые определяют подобный способ

передвижения многозвенных мехатронно-модульных роботов, являются высота волны, проходящей вдоль кинематической цепи, а также протяженность результирующего прямолинейного перемещения:

$$H = l \sum_{i=0}^{\text{Int}(\frac{N_B-1}{2})-1} |\sin(\alpha + i\beta)|; \quad (3)$$

$$\Delta l = l(N_B - \sum_{n=0}^{N_B-2} |\cos(\alpha + n\beta)| - 1), \quad (4)$$

где H — высота волны; Δl — прямолинейное перемещение многозвенного мехатронно-модульного робота при реализации волнообразного движения; l — длина мехатронного модуля; Int — функция взятия целого числа.

Зависимости изменения этих характеристик от числа элементов в волне, проходящей вдоль кинематической цепи многозвенного мехатронно-модульного робота, представлены на рис. 7, 8.

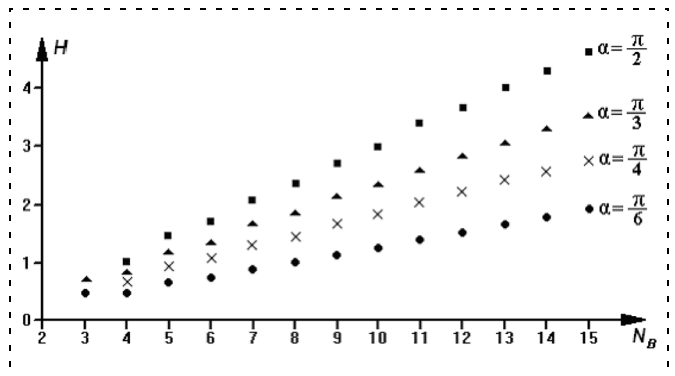


Рис. 7. Зависимость изменения высоты проходящей вдоль кинематической цепи мехатронно-модульного робота волны от числа образующих ее элементов

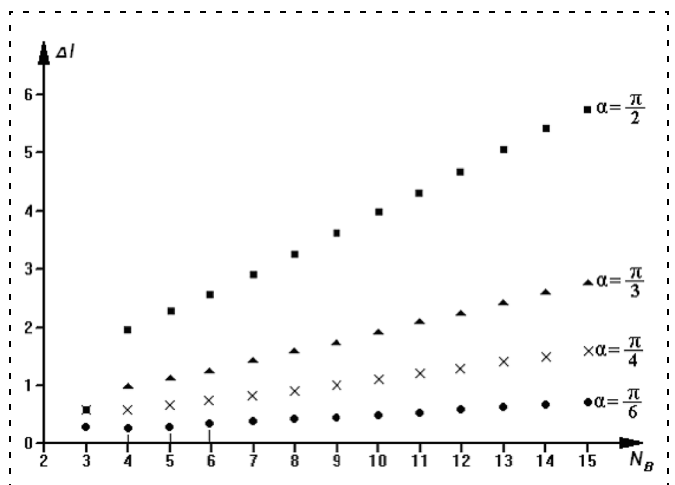


Рис. 8. Зависимость изменения прямолинейного перемещения многозвенного мехатронно-модульного робота от числа элементов в волне, проходящей вдоль кинематической цепи

Если выражение (3) позволяет оценить выполнимость волнообразного движения мехатронно-модульного робота при выбранных параметрах в условиях ограниченного пространства, то соотношение (4) позволяет рассчитать среднюю скорость соответствующего перемещения:

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta l}{t}, \quad (5)$$

где $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость перемещения многозвенного мехатронно-модульного робота при волнообразном движении; t — время прохождения волнообразного движения вдоль кинематической цепи.

Скорость прямолинейного перемещения многозвенного мехатронно-модульного робота может быть существенно повышена за счет реализации нескольких волнообразных движений, параллельно проходящих вдоль кинематической цепи. В этом случае значение средней скорости в установившемся режиме будет определяться обратно пропорциональной зависимостью от значения временного интервала между завершением одной волны и началом другой.

Изменение направления перемещения мехатронно-модульного робота обеспечивается одновременным сочетанием волнообразного движения, совершаемого в вертикальной плоскости, с поворотами звеньев в горизонтальной плоскости.

Важнейшее достоинство многозвенных мехатронно-модульных роботов связано с возможностью изменения своей кинематической структуры, например, с переходом от линейной конфигурации к конфигурации колеса.

Перемещение многозвенного мехатронно-модульного робота по плоской поверхности в конфигурации колеса может быть организовано по аналогии с реализацией волнообразных движений.

Как показано на рис. 9, при условии своей симметричности конфигурация кинематической цепи, замкнутой в виде сплюснутого колеса, будет опре-

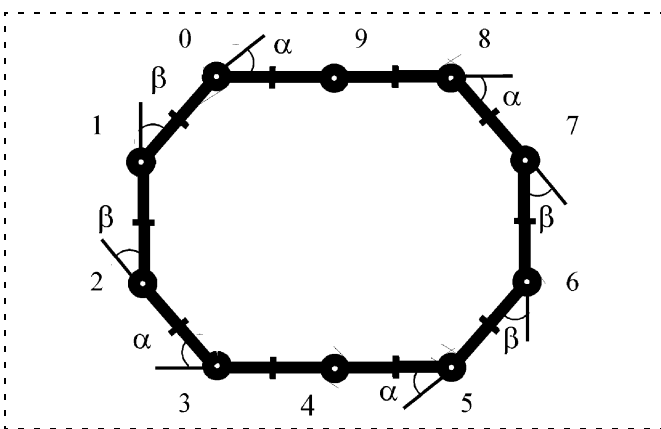


Рис. 9. Многозвенный мобильный робот на базе мехатронных модулей с двухстепенными шарнирами вращения: конфигурация "сплюснутое колесо"

деляться взаимосвязью углов в шарнирах соответствующих модулей:

$$\beta = \frac{\pi - 2\alpha}{(N_B - 2)}, \quad (6)$$

где $4 \leq N_B \leq \frac{N}{2}$, $N \geq 8$; N — число модулей в составе

кинематической цепи (должно быть четным для обеспечения симметричности конструкции); N_B — число модулей, образующих боковой скат многозвенного колеса; β — угол отклонения шарниров от их нулевого положения в вертикальной плоскости для всех промежуточных модулей бокового ската многозвенного колеса (за исключением крайних); α — угол отклонения шарниров от их нулевого положения в вертикальной плоскости для крайних модулей бокового ската многозвенного колеса.

Программно-алгоритмическая реализация процесса поступательного перемещения многозвенного мехатронного робота в конфигурации сплюснутого колеса сводится к установке счетчика, позволяющего контролировать пошаговое выполнение повторяемых движений отдельных элементов кинематической цепи по отработке соответствующих углов поворота. При этом на контроллер каждого мехатронного модуля возлагается ряд элементарных проверок по сопоставлению собственного порядкового номера n ($n = 0, 1, \dots, N - 1$) с текущим показанием счетчика *count* для выбора требуемого значения угла поворота *Angle*:

- ЕСЛИ ((*count* < -*n*) ИЛИ (*count* > $N - 1 - n$)),
ТО *count* = *count* + $N \cdot dir$; *Angle* = 0;
- ЕСЛИ (($n + count = 0$) ИЛИ ($n + count = N_B - 1$)),
ТО *Angle* = α ;
- ЕСЛИ (($n + count = N/2$) ИЛИ ($n + count = N/2 + N_B - 1$)), ТО *Angle* = α ;
- ЕСЛИ (($n + count > 0$) И ($n + count < N_B - 1$)),
ТО *Angle* = β ;
- ЕСЛИ (($n + count > N/2$) И ($n + count < N/2 + N_B - 1$)), ТО *Angle* = β ,

где $dir = \pm 1$ — переменная, определяющая выбор прямого или обратного направления движения колеса.

Следует отметить, что первое правило в приведенном списке регламентирует периодическое тактовое обновление значения всех счетчиков в диапазоне $[-n; N - 1 - n]$, обеспечивая цикличность движения колеса. Синхронизация работы счетчиков осуществляется центральным процессором, роль которого может выполнять контроллер любого мехатронного модуля.

Таким образом, относительная скорость перемещения мехатронно-модульного робота в конфигурации сплюснутого колеса будет определяться величиной, равной длине модуля в отношении к продолжительности такта.

В свою очередь, вертикальные размеры мехатронно-модульного робота в конфигурации сплюснутого колеса, характеризующие возможность его перемещения в условиях ограниченного пространства, будут определяться следующим образом:

$$H = l \sum_{i=0}^{N_B-2} |\cos(\alpha + i\beta)|. \quad (7)$$

Главным недостатком рассматриваемого способа перемещения мехатронно-модульного робота в конфигурации колеса является низкая маневренность, что является существенным ограничением при движении по сложным траекториям, при обходе препятствий и т. д.

Значительно более высокой маневренностью многозвенный мехатронно-модульный робот будет обладать в конфигурации шагающего устройства.

На рис. 10 в качестве примера показан процесс поэтапного преобразования линейной мехатронно-модульной структуры (включающей в свой состав универсальный узловой модуль) в конфигурацию шагающего устройства с четырьмя конечностями.

Перемещение многозвенного мехатронно-модульного робота по плоской поверхности в конфигурации шагающего устройства также может быть организовано по принципу циклических изменений состояния конечностей.

Так, например, один из простейших вариантов походки мехатронно-модульного шагающего робота, соответствующего приведенной схеме (рис. 10), будет определяться следующими допущениями:

- прямоугольная система координат робота связана с его узловым модулем;
- точки крепления конечностей к узловому модулю совпадают с осями системы координат робота;
- движение каждой конечности в вертикальной плоскости определяется углами поворота в шарнирах первого и второго модулей (в порядке следования от узлового) (рис. 11, а);
- движение каждой конечности в горизонтальной плоскости определяется углом поворота в шарнире первого модуля (по отношению к узловому) (рис. 11, а);
- перемещение робота может осуществляться вдоль четырех взаимно перпендикулярных направлений за счет попеременного движения двух пар противоположных конечностей;

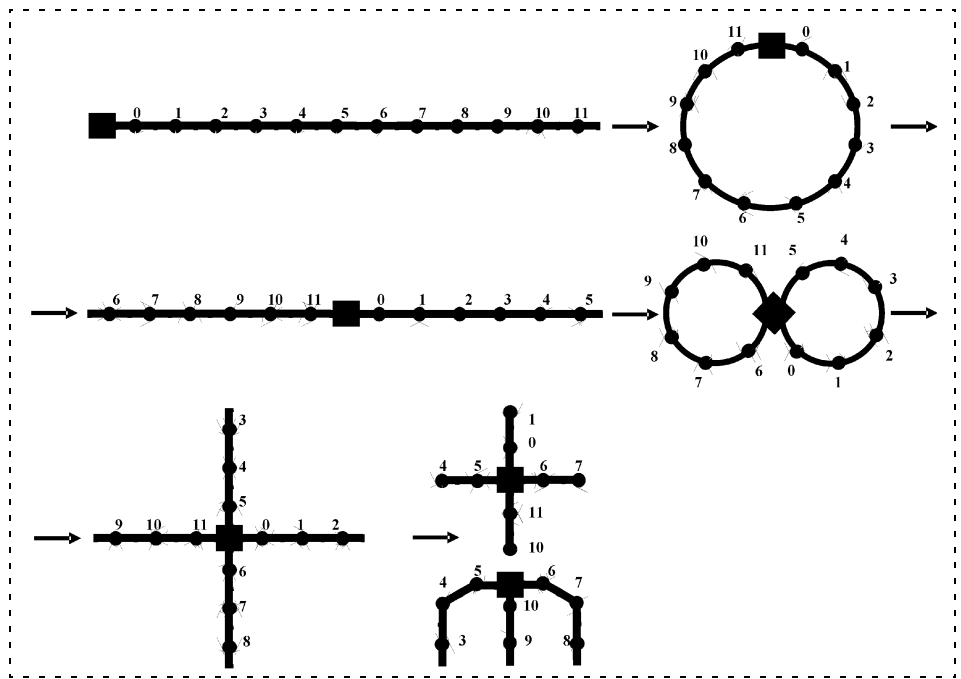


Рис. 10. Поэтапное преобразование мехатронно-модульного робота с линейной структурой в конфигурацию шагающего устройства с четырьмя конечностями

- направления возможных перемещений робота будут определяться векторами суммы ортов смежных осей системы координат робота (рис. 11, б).

Программно-алгоритмическая реализация процесса поступательного перемещения многозвенного мехатронно-модульного робота в конфигурации шагающего устройства сводится к установке счетчика, позволяющего контролировать потактовое выполнение повторяемых движений отдельных элементов конечностей. При этом на контроллер каждого мехатронного модуля возлагается ряд элементарных проверок по выбору требуемого значения угла поворота в зависимости от текущих пока-

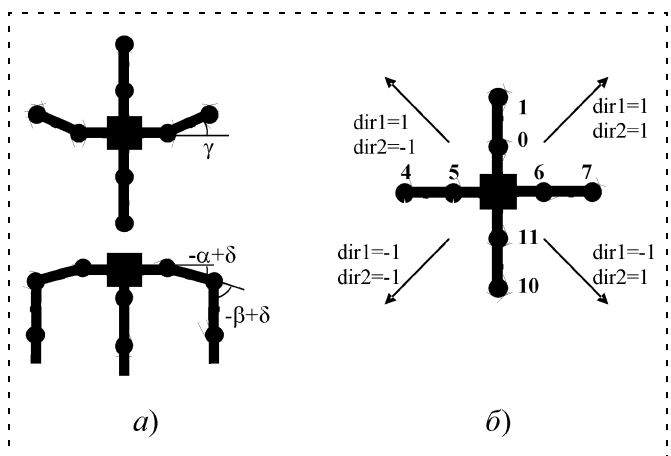


Рис. 11. Движения конечностей (а) и направления возможных перемещений (б) мехатронно-модульного шагающего робота с четырьмя конечностями

заний счетчика тактов, которые циклически задаются центральным процессором в интервале [0; 5]:

ЕСЛИ $count = 0$ И $((n = 0)$ ИЛИ $(n = 11))$,
 ТО $Angle1 = -\alpha + \delta$, $Angle2 = -dir1 \cdot \gamma$;
 ЕСЛИ $count = 0$ И $((n = 1)$ ИЛИ $(n = 10))$,
 ТО $Angle1 = -\beta - \delta$, $Angle2 = 0$;
 ЕСЛИ $count = 1$ И $((n = 5)$ ИЛИ $(n = 6))$,
 ТО $Angle2 = -dir2 \cdot \gamma$;
 ЕСЛИ $count = 2$ И $((n = 0)$ ИЛИ $(n = 11))$,
 ТО $Angle1 = -\alpha$;
 ЕСЛИ $count = 2$ И $((n = 1)$ ИЛИ $(n = 10))$,
 ТО $Angle1 = -\beta$;
 ЕСЛИ $count = 3$ И $((n = 5)$ ИЛИ $(n = 6))$,
 ТО $Angle1 = -\alpha + \delta$, $Angle2 = dir2 \cdot \gamma$;
 ЕСЛИ $count = 3$ И $((n = 4)$ ИЛИ $(n = 7))$,
 ТО $Angle1 = -\beta - \delta$, $Angle2 = 0$;
 ЕСЛИ $count = 4$ И $((n = 0)$ ИЛИ $(n = 11))$,
 ТО $Angle2 = dir1 \cdot \gamma$;
 ЕСЛИ $count = 5$ И $((n = 5)$ ИЛИ $(n = 6))$,
 ТО $Angle1 = -\alpha$;
 ЕСЛИ $count = 5$ И $((n = 4)$ ИЛИ $(n = 7))$,
 ТО $Angle1 = -\beta$.

Здесь $Angle1$ — угол поворота первого и второго модулей конечности (в порядке следования от узлового) вокруг горизонтальной оси; $Angle2$ — угол поворота первого модуля конечности (в порядке следования от узлового) вокруг вертикальной оси; α — исходное (задаваемое) значение угла поворота первого модуля конечности (в порядке следования

от узлового) вокруг горизонтальной оси; β — исходное значение угла поворота второго модуля конечности (в порядке следования от узлового) вокруг горизонтальной оси; $\beta = \pi/2 - \alpha$; γ — значение угла поворота первого модуля конечности (в порядке следования от узлового) при ее движении в горизонтальной плоскости; δ — приращение углов поворота первого и второго модулей конечности (в порядке следования от узлового) при ее движении в вертикальной плоскости; $0 < \delta \leq |\alpha|$; $dir1, dir2$ — направляющие орты осей системы координат, связанной с узловым модулем робота; $dir1, 2 = \pm 1$; $count$ — переменная счетчика тактов; n — порядковый номер модуля.

Приведенный набор правил регламентирует один из видов управляемой походки мехатронно-модульного шагающего робота, задавая потактовое выполнение следующей последовательности движений его конечностей (рис. 12):

- подъем первой пары противоположных конечностей и их поворот в горизонтальной плоскости на угол $|2\gamma|$ (с точностью до знака) ($count = 0$);
- поворот второй пары противоположных конечностей на угол $|2\gamma|$ (с точностью до знака) с переносом узлового модуля в соответствующем направлении ($count = 1$);
- опускание первой пары противоположных конечностей ($count = 2$);
- подъем второй пары противоположных конечностей и их поворот в горизонтальной плоскости на угол γ ($count = 3$);
- поворот первой пары противоположных конечностей на угол $|2\gamma|$ (с точностью до знака) с переносом узлового модуля в соответствующем направлении ($count = 4$);
- опускание второй пары противоположных конечностей ($count = 5$).

Как показано на рис. 13, поворот противоположных конечностей на угол $|2\gamma|$ (при условии, что их местоположение остается неизменным, а вторая пара находится в поднятом состоянии) может обеспечить перемещение узлового модуля в горизонтальной плоскости только при одновременной реализации его вертикального перемещения. Выполнение этого движения достигается за счет одновременного изменения углов поворота первого и второго модулей опорных конечностей вокруг горизонтальных осей в диапазонах $((-\alpha, -\alpha')$, $(-\alpha', -\alpha)$) и $((-\beta, -\beta')$, $(-\beta', -\beta))$

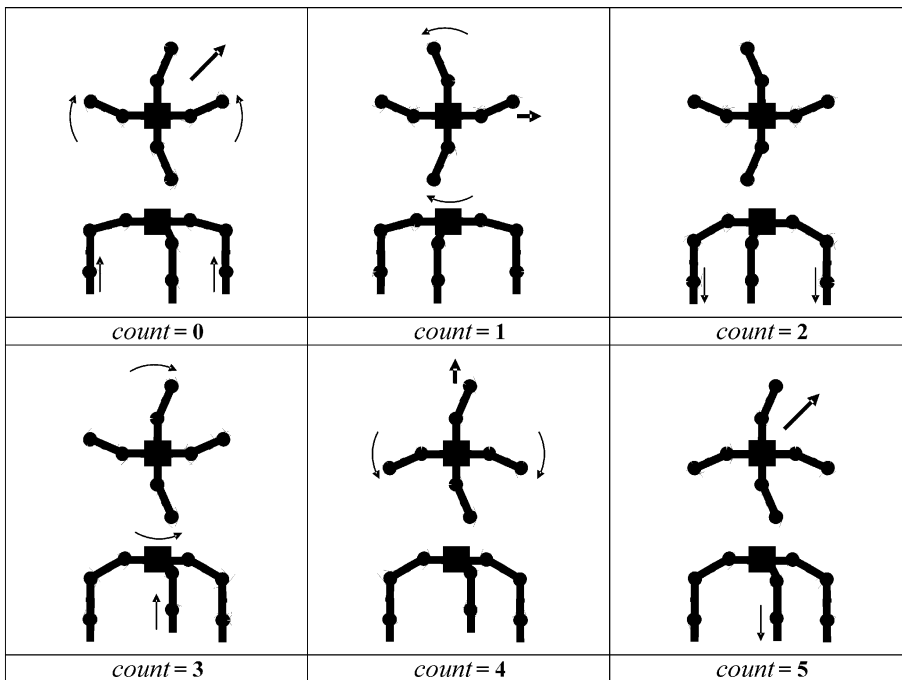


Рис. 12. Потактовая последовательность движений конечностей многозвенного мехатронно-модульного робота, определяющих его походку при целенаправленном перемещении в заданном направлении

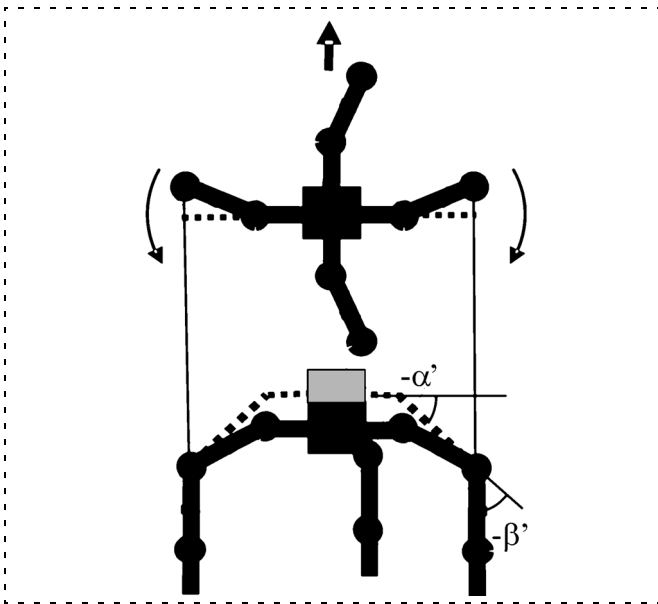


Рис. 13. Перемещение узлового модуля в вертикальной плоскости при повороте опорных конечностей

соответственно, где $\alpha' = \arccos(\cos \alpha \cos \gamma)$; $\beta' = \pi/2 - \alpha'$. При этом изменения всех шарнирных углов должно осуществляться со взаимно пропорциональными скоростями.

Следует отметить, что введенное уточнение также легко формализуется в виде продукционных правил.

Широкая серия модельных экспериментов, фрагменты которых представлены на рис. 14 (см. вторую сторону обложки), подтвердила эффективность разработанных алгоритмов управления, обеспечивающих перемещение многозвенного мехатронно-модульного робота по плоской поверхности.

Очевидно, что для реализации перемещений по поверхности произвольного профиля рассмотренные алгоритмы управления должны быть подвергнуты определенным изменениям при сохранении основных принципов своего построения.

Заключение

Многозвенные мехатронно-модульные устройства с адаптивной кинематической структурой представляют собой новый класс робототехнических систем, обладающих широким набором функциональных возможностей. Главное преимущество такого рода устройств связано с потенциальной способностью к изменению своей конфигурации в зависимости от специфики решаемой прикладной задачи и условий ее выполнения.

Основное отличие мехатронно-модульных роботов заключается в наличии распределенной системы управления, объединяющей контроллеры отдельных элементов многозвенного устройства.

Эта архитектурная особенность системы управления накладывает определенные требования на ее программно-алгоритмическое обеспечение, которое должно быть изначально ориентировано для работы на базе распределенных вычислительных средств.

Результаты проведенных исследований со всей убедительностью свидетельствуют о принципиальной возможности разработки алгоритмов управления движением многозвенных мехатронно-модульных устройств с учетом распределенного характера построения их бортового вычислительного комплекса.

Важно отметить, что предложенные принципы иерархической организации распределенных систем интеллектуального управления будут сохранять свою правомочность для множества различных вариантов конструктивного исполнения мехатронно-модульных робототехнических устройств.

Ключевые проблемы дальнейшего развития концепции многозвенных мехатронно-модульных робототехнических систем связаны с разработкой методов и алгоритмов самоорганизации и самообучения, создание которых позволит на практике обеспечить реализацию способностей по автоматической реконфигурации как одного из эффективных способов адаптации при работе в условиях неопределенности.

Список литературы

1. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Кадочников М. В. Многозвенные мехатронно-модульные роботы с адаптивной кинематической структурой // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 11. С. 2—11.
2. Лохин В. М., Захаров В. Н. Интеллектуальные системы управления: понятия, определения, принципы построения / Интеллектуальные системы автоматического управления. Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Физматлит, 2001.
3. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Физматлит, 2001.
4. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Технологии обработки командной информации и управления поведением в интеллектуальных робототехнических системах // Информационные технологии. Приложение. 2005. № 7. С. 1—32.
5. Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Гарцев И. Б. и др. Автономный мобильный мини-робот // Известия ТРТУ. Тематич. Вып. "Перспективные системы и задачи управления". Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. № 3 (58).
6. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Евстигнеев Д. В. Интеллектуальная система управления автоматической посадкой беспилотного летательного аппарата на основе комплексного применения технологии нечеткой логики / Новые методы управления сложными системами. М.: Наука, 2004.
7. Макаров И. М., Лохин В. М., Еремин Д. М. и др. Новое поколение интеллектуальных регуляторов // Приборы и системы управления. 1997. № 3.
8. Иванов А. А. Исследование принципов локомоций гиперизбыточных ползающих роботов // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Экстремальная робототехника: Тр. седьмой Всерос. науч.-практ. конф. Т. 4. СПб: Изд-во НПО Специальных материалов, 2004.

УДК 004.89

А. А. Большаков, д-р техн. наук, проф.,
М. С. Голик,
 Саратовский государственный
 технический университет

Интеллектуальная система поиска неисправностей в робототехническом комплексе

Рассматриваются способы повышения надежности робототехнического комплекса. Предложен метод поиска неисправностей в робототехническом комплексе, основанный на использовании искусственных нейронных сетей. Проведено сравнение эффективности решения поставленной задачи искусственными нейронными сетями различной структуры.

Введение

Современные робототехнические комплексы (РТК) являются мощным техническим средством автоматизации технологических процессов. Такие комплексы являются сложными системами, состоящими из разнообразных функциональных подсистем: промышленных роботов, управления, осязательства, искусственного интеллекта [1, 2]. Функционирующие в составе одного РТК подсистемы определяют его эксплуатационные характеристики (быстродействие, точность, надежность, стоимость и т. д.), оказывая при этом взаимное влияние.

По материалам японской Ассоциации роботостроения (JARA), одним из основных направлений перспективных исследований в робототехнике является повышение надежности РТК. Достижение этой цели позволит существенно повысить технико-экономические показатели предприятия, применяющего робототехнические комплексы.

Постановка задачи

Рассматриваемый в статье робототехнический комплекс предназначен для сборки различных автомобильных компонентов и состоит из трех параллельных линий сборки (ЛС), каждая из которых включает два промышленных робота (ПР), расположенных последовательно относительно линии сборки, и систему искусственного интеллекта (СИИ), осуществляющую управление комплексом (рис. 1).

Для повышения надежности технических систем существует несколько подходов [3]. Один из наиболее эффективных способов связан с увеличением ремонтпригодности, т. е. с уменьшением времени поиска и устранения неисправности. В статье предлагается метод, позволяющий уменьшить время поиска неисправностей в РТК.

При использовании традиционных методов поиска неисправностей в сложной системе лицо, принимающее решение, (ЛПР) не всегда может оперативно определить причину отказа РТК, так как большая часть отказов является зависимыми. Поэтому ЛПР не в состоянии выполнить точный анализ всех параметров и условий и ограничивается лишь рассмотрением некоторых характеристик, отобранных на основе имеющегося опыта, который определяет время поиска неисправности. Анализ существующей базы данных об отказах и восстановления рассматриваемого РТК, содержащей информацию о более чем 500 отказах, показывает, что время поиска неисправности составляет в среднем 26 % от общего времени восстановления работоспособности РТК.

Таким образом, решение данной задачи базируется на опыте, интуиции и образном мышлении ЛПР.

Перспективным путем решения подобных слабо структурированных и трудноформализуемых задач является непосредственное обеспечение взаимодействия ЛПР и программно-математического обеспечения. В качестве ЛПР в данной задаче выступает специалист по техническому обслуживанию РТК.

Задачу поиска неисправности в РТК можно рассматривать как нахождение зависимости между признаками неисправности в момент отказа РТК (входными данными) и видом неисправности РТК (выходными данными). Для реализации эффективной интеллектуальной системы поиска неисправностей целесообразно использовать методы искусственного интеллекта.

Использование интеллектуальной системы, основанной на знаниях, позволяет учитывать трудно формализуемые факторы и условия, применять эвристические методы для решения задач, не поддающихся решению точными методами или требующих слишком большого времени их решения.

Интеллектуальная система должна осуществлять интерпретацию информации, поступающей от ЛПР, и выдавать рекомендации о возможных видах неисправностей РТК. Моменты обращения к системе определяются по инициативе ЛПР. При получении решений и рекомендаций ЛПР необходимо иметь обоснование их взвешенности и адекватности реакции на возникшие ситуации.

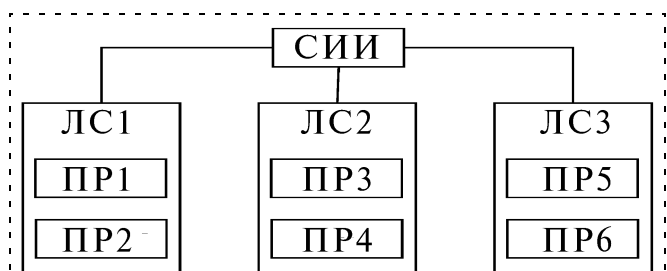


Рис. 1. Схема робототехнического комплекса

Метод решения

Поиск неисправностей в РТК может рассматриваться как задача классификации, когда необходимо сделать выбор одного варианта из заранее известного набора неисправностей. Для решения этой задачи предлагается использовать искусственные нейронные сети (ИНС) прямого распространения, которые являются универсальным средством аппроксимации функций [4, 5]. Также ИНС характеризуются надежностью, высоким быстродействием, возможностью решения плохо формализуемых задач, способны обучаться на экспериментальных данных, что делает возможным учет факторов, влияние которых очень трудно или вообще невозможно выразить аналитически из-за сложности математической модели. Выделим этапы решения задачи на основе ИНС:

- определение входных и выходных данных (предварительный анализ данных, многомерный статистический анализ, выявление значимых факторов);
- построение ИНС (выбор структуры: число входов, выходов, скрытых слоев и нейронов в них, функция активации, метод обучения; обучение ИНС);
- функционирование ИНС.

Определение входных и выходных данных. При обработке информации из базы данных об отказах и восстановлениях РТК выявлено 36 признаков неисправностей и 27 видов неисправностей. Эксперты по техническому обслуживанию РТК предложили еще 41 признак для выявленных видов неисправностей РТК. Таким образом, общее число признаков неисправностей РТК составило 77. Далее качественные данные подверглись обработке на основе шкалы наименований. Для уменьшения числа рассматриваемых переменных и снижения требований по числу наблюдений для обучения ИНС использован дискриминантный анализ с итерационной процедурой включения или исключения переменных [6]. В результате число признаков неисправностей сократилось до 53. Для обучения ИНС взято 463 примера неисправности РТК. Остальные 50 примеров неисправности РТК оставлены для тестирования обученной ИНС.

Построение ИНС. В настоящее время не существует универсальных ИНС, способных решать широкий круг задач. Для частных задач разрабатываются специализированные ИНС, функционирующие по различным алгоритмам. Вопрос об оптимальной структуре нейронной сети до сих пор остается открытым. Множество разновидностей ИНС обусловлено различными способами соединения нейронов. Для решения поставленной задачи нами использованы наиболее распространенные ИНС — ИНС прямого распространения, в которых нейроны одного слоя могут быть соединены только с нейронами приле-

гающих слоев без обратных и рекуррентных связей. Обычно такие сети состоят из входного слоя, одного или более скрытых слоев и выходного слоя. С помощью такой сети данные преобразуются из n -мерного входного пространства в m -мерное выходное.

При разработке ИНС проводили сравнение двух структур: обычной и блочной (рис. 2, 3).

При использовании блочной структуры, состоящей из 27 ИНС, каждая из них является бинарным классификатором, предназначенным для идентификации вида неисправностей. Число ИНС, работающих параллельно, определяется числом видов неисправностей РТК. Каждая ИНС имеет 53 нейрона на входе с заданными допустимыми граничными значениями [0; 1] и один нейрон на выходе, имеющий аналогичные граничные значения [0; 1]. Число скрытых слоев — один. Функция активации нейронов скрытого слоя логистическая ("сигмоидальная"), а нейронов выходного слоя — линейная.

При использовании обычной структуры ИНС имеет 53 нейрона на входе и 27 на выходе. Допустимые граничные значения и функции активации нейронов такие же, как при использовании блочной ИНС.

Выбор логистической активационной функции обусловлен обучением ИНС с использованием алгоритма обратного распространения, что накладывает ряд ограничений. Так, для алгоритма обратного распространения требуется, чтобы функция активации была всюду дифференцируема. Преиму-

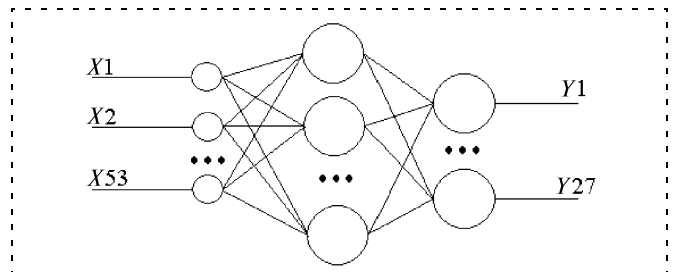


Рис. 2. Схема обычной структуры ИНС

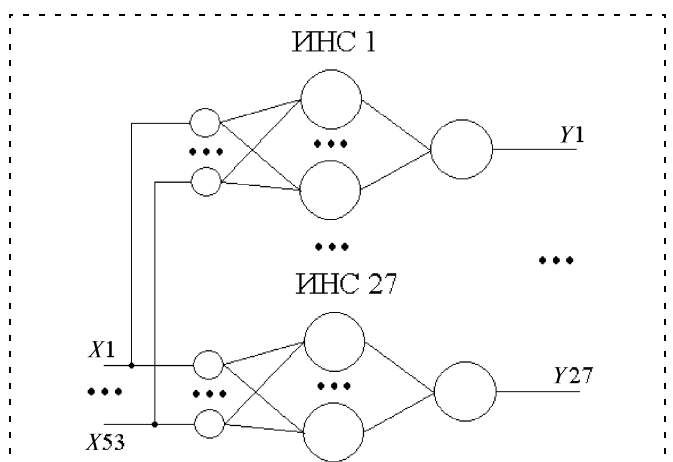


Рис. 3. Схема блочной структуры ИНС

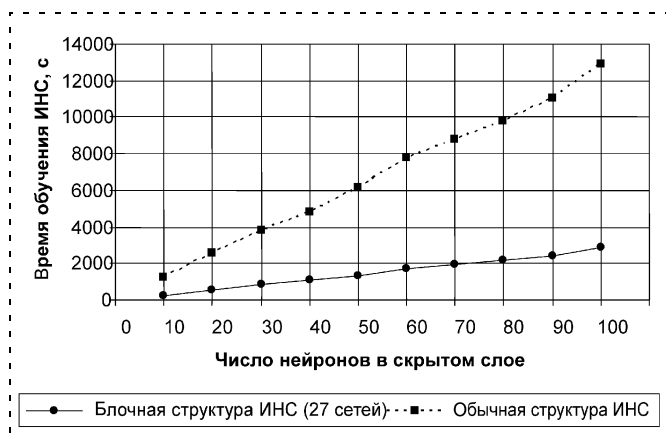


Рис. 4. Зависимость времени обучения ИНС от числа нейронов в скрытом слое (для обычной и блочной структур ИНС)

щества логической функции активации заключаются в простоте нахождения производной и в автоматическом контроле степени усиления. Для слабых сигналов кривая вход—выход имеет сильный наклон, что обеспечивает большое усиление. Когда значение сигнала становится больше, усиление падает. Таким образом, большие сигналы воспринимаются сетью без насыщения, а слабые сигналы проходят по сети без чрезмерного ослабления.

При разработке интеллектуальной системы было проведено исследование зависимости точности определения неисправности РТК от структуры ИНС. В качестве варьируемого параметра выступало число нейронов, составляющих скрытый слой, изменяемое от 10 до 100. При этом фиксировали время обучения ИНС и точность определения вида неисправности РТК.

Исследования показывают, что обученные ИНС способны решать задачу поиска неисправности в РТК при изменении входных значений в тех пределах, которые заданы при обучении. В результате выявлен ряд зависимостей, отображающих связь числа нейронов в скрытом слое с ошибкой определения вида неисправности РТК и временем обучения ИНС для обычной и блочной структур (рис. 4, 5).

Из рис. 4 следует, что время обучения ИНС практически линейно возрастает при увеличении числа нейронов в скрытом слое. Также из графика следует, что время обучения ИНС с блочной структурой меньше времени обучения ИНС с обычной структурой в среднем в 4,5 раза. Однако при использовании блочной структуры число ИНС увеличивается (27 вместо 1), при этом значительно упрощается структура вычислительного процесса, что приводит к существенному уменьшению времени обучения.

Время, затрачиваемое на обучение, существенно зависит от конфигурации используемого компьютера: процессора, оперативной памяти. Поэто-

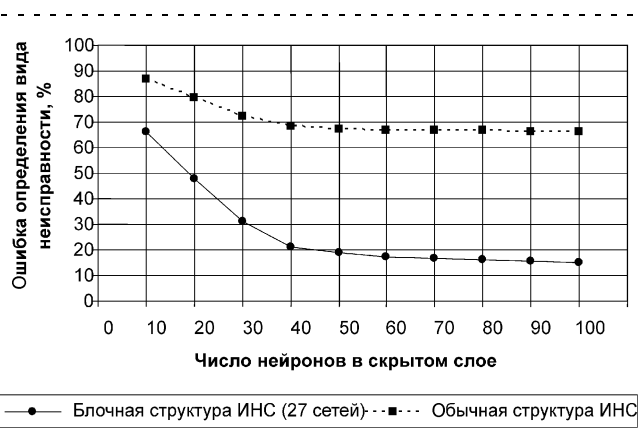


Рис. 5. Зависимость ошибки определения вида неисправности РТК от числа нейронов в скрытом слое (для обычной и блочной структур ИНС)

му время обучения одной и той же нейронной сети на различных по показателям компьютерах может существенно различаться, но характер изменения останется неизменным.

На рис. 5 видно, что точность определения вида неисправности РТК выше при использовании ИНС с блочной структурой примерно в три раза. Более высокая точность ИНС с блочной структурой объясняется уменьшением числа связей между нейронами в каждой из 27 ИНС, что при ограниченном объеме экспериментальных данных оказывается существенным, так как меньшее число связей между нейронами требует для обучения меньшее число примеров.

Графики показывают, что с увеличением числа нейронов в скрытом слое точность определения вида неисправности в РТК возрастает. Кроме того, существенное снижение ошибки происходит при увеличении числа нейронов в скрытом слое до 40...50. При дальнейшем увеличении числа нейронов уменьшение ошибки незначительно, а время обучения ИНС, напротив, существенно возрастает.

При решении задачи поиска неисправностей в РТК время обучения ИНС не имеет принципиального значения, поскольку обученная нейронная сеть прямого распространения способна решать поставленную задачу многократно.

Таким образом, сравнительные характеристики двух структур демонстрируют преимущество применения блочной структуры ИНС с точки зрения как точности решения задачи, так и времени, необходимого для обучения ИНС. Поэтому для построения ИНС целесообразно использовать блочную структуру с 60 нейронами в скрытом слое. Это позволило достигнуть точность определения вида неисправности в РТК около 83 % при приемлемом времени обучения.

Функционирование ИНС. Обученная ИНС для определения вида неисправностей РТК состоит из

27 ИНС. Каждая ИНС имеет 53 входа, соответствующих числу признаков неисправностей, и один выход, предназначенный для определения одного из 27 видов неисправностей РТК. Для использования обученной ИНС на ее входы подаются сигналы, содержащие информацию о наличии или отсутствии признаков неисправности (0 или 1). На выходе каждой ИНС формируется сигнал о наличии или отсутствии данного вида неисправности в РТК (0 или 1).

Также следует отметить, что для построения ИНС и подготовки данных для ее обучения целесообразно использовать имеющиеся пакеты прикладных программ, в частности STATISTICA и MATLAB (NNT) [7–9].

Интеллектуальная система для поиска неисправностей в РТК

Программный комплекс интеллектуальной системы поиска неисправностей в РТК предназначен для ввода, хранения и анализа информации о техническом обслуживании РТК (рис. 6).

Основу программного комплекса составляет искусственная нейронная сеть, описанная выше.

Ввод данных при каждом отказе РТК осуществляется ЛПР на основе заполнения анкеты. Анкета содержит список из 53 признаков неисправностей РТК, в ней ЛПР указывает наличие одного или нескольких признаков, а также сопоставляет их с одной или несколькими частями РТК (ЛС1...3, ПР1...6, СИИ). Затем информация из блока ввода данных поступает на искусственную нейронную сеть, которая их обрабатывает и передает информацию в блок вывода данных. После этого ЛПР получает сведения о возможных видах неисправностей в РТК и принимает решение о необходимом техническом обслуживании для восстановления работоспособности РТК.

Информация из блоков ввода и вывода данных также заносится в базу данных об отказах и восстановлении РТК. После восстановления работоспособности РТК, если это необходимо, вносятся корректировки в базу данных. Ведение базы данных, содержащей информацию о техническом обслуживании РТК, способствует накоплению дополнитель-

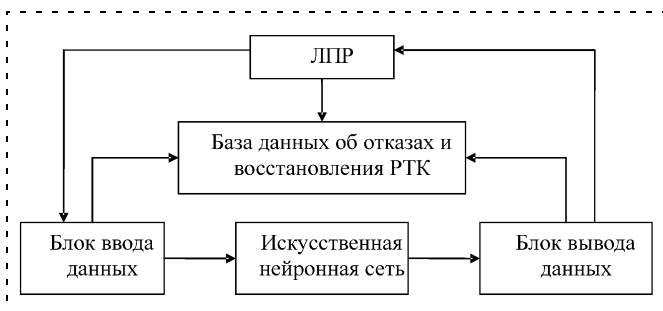


Рис. 6. Схема интеллектуальной системы поиска неисправностей в РТК

ных данных об отказах РТК. Это позволит в дальнейшем адаптировать интеллектуальную систему для поиска различных неисправностей в РТК.

Разработанный программно-технический комплекс интеллектуальной системы поиска неисправностей в РТК обладает точностью определения вида неисправности и ее местонахождения 83 %. Это позволило сократить время обнаружения неисправности на 10...12 % от общего времени восстановления работоспособности РТК, что способствует увеличению ремонтпригодности комплекса и, как следствие, повышению его надежности.

Заключение

В рамках проведенных исследований показано повышение надежности РТК на основе метода увеличения его ремонтпригодности. Для этого создана интеллектуальная автоматизированная система поиска неисправностей в РТК, на базе использования искусственных нейронных сетей.

Проведено сравнение различных структур ИНС для выбора оптимальной для решения поставленной задачи. В результате для создания интеллектуальной системы выбрана ИНС блочной структуры, состоящая из 27 ИНС, каждая из которых имеет 53 входа, 1 выход и 60 нейронов в скрытом слое. После стартового обучения ИНС показала точность определения вида неисправности 83 %.

Применение программного комплекса интеллектуальной системы поиска неисправностей позволило снизить время обнаружения неисправности до 10...12 % от общего времени восстановления работоспособности РТК.

В дальнейшем предполагается совершенствование интеллектуальной системы на основе повышения точности поиска неисправности в РТК и оптимизации распределения функций между ЛПР и ЭВМ.

Список литературы

1. Юревич Е. И. Основы робототехники. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ — Петербург, 2005. 401 с.
2. Тимофеев А. В. Адаптивные робототехнические комплексы. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 332 с.
3. Надежность и эффективность в технике: Справ. В 10 т. / Ред. совет: В. С. Авдеевский (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1986. Т. 1. 224 с.
4. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. М.: Мир, 1992. 302 с.
5. Горбань А. Н., Дунин—Барковский В. Л., Кирдин А. Н. и др. Нейроинформатика. Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. 296 с.
6. Большаков А. А., Каримов Р. Н. Методы обработки многомерных данных и временных рядов. М.: Горячая линия—Телеком, 2007. 522 с.
7. Дьяконов В. MATLAB: учебный курс. СПб: Питер, 2001. 560 с.
8. Прикладной статистический анализ данных / Под ред. В. В. Кириной. М.: ПРИОР, 1998. Кн. 1. 1336 с.
9. Прикладной статистический анализ данных / Под ред. В. В. Кириной. М.: Издательство ПРИОР, 1998. Кн. 2. 352 с.

УДК 681.3.07

А. М. Скрябин,**Д. И. Кардаш,** канд. техн. наук, доц.,**А. И. Фрид,** д-р техн. наук, проф.,Уфимский государственный авиационный
технический университет

Модернизация управляющих программ систем автоматического управления автономными мобильными объектами

Предлагается способ реинжиниринга управляющего программного обеспечения систем управления автономными мобильными объектами в контексте улучшения их отказоустойчивости. Приводится структура адаптируемого специализированного вычислителя, а также алгоритм контроля и диагностики процесса модернизации программного обеспечения.

Введение

Основными особенностями современных систем управления мобильными объектами являются: функционирование в реальном масштабе времени; функционирование в условиях нестационарности; затруднительный доступ к ним.

Современные системы управления реализованы, как правило, в виде специализированных вычислителей. Специализированные вычислители призваны выполнять набор функций, определенный при проектировании системы управления (СУ). Однако со временем условия, а также задачи функционирования СУ могут меняться. Это приводит к возникновению вопроса о замене существующего специализированного вычислителя или о его модернизации. На практике усовершенствование чаще всего оказывается предпочтительней новых разработок. Такой подход можно назвать реинжиниринговым [1].

Под реинжинирингом понимается процесс исследования и перестройки исходной системы в целях ее воссоздания в новой форме и последующей ее реализации [2—4].

В практическом плане этот процесс можно рассматривать как модернизацию вычислителя, при которой новое программное обеспечение (ПО) дополняет или приходит на смену уже существующему, улучшая его функциональность. Системы, предусматривающие подобные процессы модернизации, относятся к классу адаптируемых систем [5].

Анализ существующих подходов к реинжинирингу программного обеспечения СУ показывает, что в настоящее время существуют методы и сред-

ства обеспечения его гибкости и адаптируемости, однако вопросы контроля и диагностики процесса адаптации, обоснования необходимости реинжиниринга, обеспечения надежности и отказоустойчивости в них решены недостаточно полно. Поэтому актуальной задачей при реализации адаптируемых СУ является создание методики реинжиниринга их программного обеспечения.

При построении адаптируемых СУ должны быть выполнены следующие требования:

- специализированный вычислитель, входящий в состав СУ, должен реализовывать возможность программной адаптации, осуществлять мониторинг состояния объекта управления и обладать средствами самодиагностики;
- вычислитель должен обладать устойчивостью к программно-аппаратным отказам;
- СУ должна предусматривать обеспечение защиты вычислителя и объекта управления от возможных ошибок в модифицируемом программном обеспечении;
- модифицированная управляющая программа (МУП) не должна иметь возможности непосредственного воздействия на объект управления (ОУ) без предварительной проверки на модели объекта.

Для выполнения описанных требований предлагаются соответствующие структура адаптируемого специализированного вычислителя, а также способ тестирования модифицируемого управляющего программного обеспечения.

Структура адаптируемого специализированного вычислителя

Для организации контроля и диагностики ПО адаптируемого вычислителя, мониторинга состояния объекта управления вычислительное ядро управляющей системы предлагается реализовывать в виде структуры, представленной на рис. 1. В структуре используются три микроконтроллера (МК), в функции одного из которых входят организация процесса тестирования программного обеспечения, мониторинг состояния ОУ, моделирование ОУ, выбор управляющего микроконтроллера для осуществления резервирования. Этот МК является выделенным диагностическим ядром [6].

Другими элементами вычислителя выступают два идентичных МК, один из которых является основным и выполняет программу управления объектом, а второй — резервный, который служит двум целям. Во-первых, резервный микроконтроллер (РМК) в случае отказа основного осуществляет его "горячее" или же "холодное" резервирование. Во-вторых, участвует в процессе тестирования программного обеспечения, обновляющего систему управления. Отказ МК определяется как встроенными средствами самодиагностики, обычно входящими в со-

став современных МК, так и на основании анализа их функционирования диагностическим ядром системы. Задача выбора управляющего МК также возлагается на диагностическое ядро (ДЯ). Подключение выбранного МК к системной магистрали осуществляется посредством шинных формирователей ШФ2 и ШФ3, которые управляются ДЯ с помощью сигналов блокировки Бл2, Бл3. Изначально ШФ2 настраивается таким образом, чтобы РМК мог только получать данные с системной магистрали (СМ). Управляющие же воздействия, вырабатываемые в обоих МК, попадают на СМ только с одного из них, выбранного ДЯ.

В режиме тестирования ПО РМК не может воздействовать на исполнительные механизмы, поскольку должна обеспечиваться защита от воздействия возможных программных ошибок. Таким образом, для организации процесса тестирования ПО возникает потребность в модели управляемого объекта. Решением этой проблемы может стать построение модели объекта в виде искусственной нейронной сети (НС) [7]. Нейросетевые модели позволяют воспроизводить сложные зависимости, а также могут подвергаться динамической корректровке и дообучению, что является наиболее ценным в условиях тестирования программного обеспечения на целевой платформе.

Задачи оценки управляющей программы, дообучения НС, моделирующей отклик ОУ на управляющее воздействие, а также накопления базы тестов для тестирования МУП возлагаются на ДЯ.

Информационная модель и мониторинг процесса управления

Как показано выше, для организации процесса динамического тестирования необходимо наличие информационной модели, прогнозирующей отклик ОУ на управляющие воздействия. Модель предлагается строить следующим образом.

Проводится ряд экспериментов, в ходе которых определяются значения переменных y_1, y_2, \dots, y_n как отклик ОУ на управляющие воздействия x_1, x_2, \dots, x_m с интервалом времени Δt . Затем строится таблица, в строках которой содержатся значения переменных воздействий и откликов. Число строк соответствует числу измерений z . Данные таблицы используются как задачник для обучения НС, в качестве которой в [6] был предложен двухслойный перцептрон.

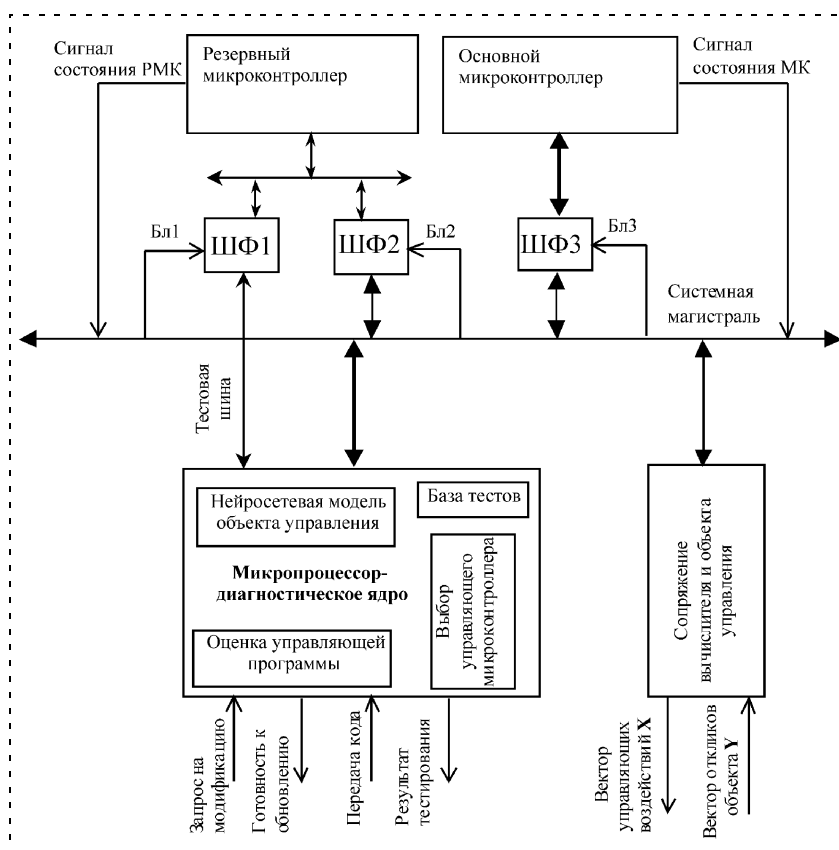


Рис. 1. Интеллектуальный адаптируемый вычислитель

Для полученной модели можно предложить следующую методику проведения мониторинга процесса управления.

1. Выбираются значимые для процесса управления параметры состояния объекта.
2. На основании выбранных параметров состояния объекта вычисляются показатели эффективности P_1, P_2, \dots, P_k использования объектов данного класса (например, для двигателя внутреннего сгорания это мощность, расход топлива, уровень детонаций и т. д.).
3. Определяются эталонные (требуемые) значения показателей эффективности, а также критические значения переменных состояния ОУ.
4. Текущее состояние осуществляется путем вычисления приведенного показателя эффективности, определяемого требованиями предметной области, и сравнения его с эталонным. При этом переменные состояния не должны достигать критических значений.

В качестве примера приведенного показателя можно указать функцию взвешенной суммы Q :

$$Q = w_1 \hat{P}_1 + w_2 \hat{P}_2 + \dots + w_k \hat{P}_k,$$

где \hat{P}_i ($i = 1, 2, \dots, k$) — нормированное значение i -го показателя эффективности; w_k — весовые коэффициенты, назначаемые параметрам; k — число параметров, входящих в функцию.

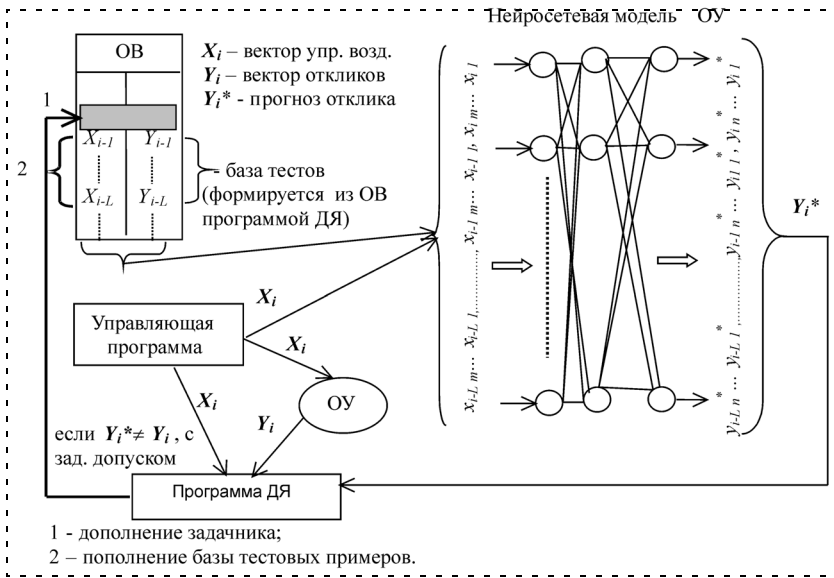


Рис. 2. Автоматическая генерация базы тестовых примеров

Приведенный подход к оценке состояния применяется как к самому ОУ, так и к его модели при контроле процесса адаптации МУП.

На рис. 2 показан процесс автоматической генерации базы тестовых примеров, использующий дообучение нейросетевой модели ОУ в режиме штатного функционирования СУ. В качестве информационной модели ОУ используется двухслойный персептрон, на входы которого подаются векторы управляющих воздействий за L интервалов времени, что позволяет учесть динамику функционирования ОУ. На рис. 2 показано, что база тестов формируется на основе откликов объекта в обучающей выборке. На основании каждого такого отклика РМК формирует управляющее воздействие и получает отклики уже с модели ОУ.

Таким образом, реперные точки становятся тестами для проверки МУП. В этом состоит идея автоматического построения базы тестовых примеров, подробно представленная в [8].

Диагностика и адаптация управляющего программного обеспечения

Для проведения адаптации МУП вычислителя предлагается следующая последовательность действий, полученная с учетом технологий быстрого тестирования [9].

1. Написание встраиваемого модуля, модифицирующего управляющую программу, в соответствии с изменившимися требованиями системной спецификации.

2. Этап статического тестирования. На этом этапе предусмотрена тестовая деятельность, связанная с проверкой программы без ее запуска на объекте (в системах программирования и в эмуляторах).

3. Этап динамического тестирования, представляющий собой деятельность, предусматривающую эксплуатацию программного продукта.

4. Анализ результатов работы модуля. Алгоритм функционирования ДЯ опирается на следующие положения.

1. По событию от таймера ДЯ считывает из интерфейсного блока вектор откликов и вектор управляющих воздействий. Предполагается, что ОУ характеризуется вектором физических величин Y размерности n , а управление может быть описано вектором количественных свойств воздействий X размерности m .

2. Нейронная сеть прогнозирует отклик объекта на управляющее воздействие через интервал времени Δt .

3. В системе учитываются векторы X_b, X_r , представляющие собой количественные оценки управляющих воздействий основного и резервного МК соответственно, а также вектор Y^* , характеризующий отклик модели. Также рассматривается вектор X_{b-1} , представляющий собой набор управляющих воздействий предыдущего шага в момент $t - \Delta t$. Y^* вычисляется как отклик модели на воздействие X_{b-1} . Аналогично учитывается вектор Y_{-1} как состояние объекта на предыдущем шаге.

4. Для НС определены значения предельных ошибок обучения и обобщения. Когда значения этих ошибок выше предельно допустимых, невозможен реинжиниринг программного обеспечения.

5. В системе предусмотрена процедура исключения некорректно работающего МК.

Для организации диагностики и адаптации МУП предлагается следующий **алгоритм работы ДЯ**.

Шаг 1. Получить X_b, X_r, Y, Y^* . Сравнить между собой X_b и X_r . В случае их неравенства запустить процедуру анализа работоспособности микроконтроллера. Сравнить между собой Y и Y^* . Если они являются близкими в заданной метрике при заданных допущениях, перейти к шагу 3. Иначе сохранить X_{b-1} и Y , дополнить задачник для обучения НС. В базе тестов сохранить Y_{-1} . Запретить адаптацию ПО. Запустить процедуру обучения НС.

Шаг 2. Проверить наличие запроса на модификацию управляющей программы. Если запрос не поступил, то автоматически перейти к шагу 1 по событию от таймера. Иначе перейти к шагу 3.

Шаг 3. Блокировать все прерывания. Принять код обновления. Запустить процедуру модификации управляющей программы резервного микроконтроллера. Запустить процедуру оценки управляющей программы. В случае удовлетворительного результата перейти к шагу 4. Иначе выполнить вос-

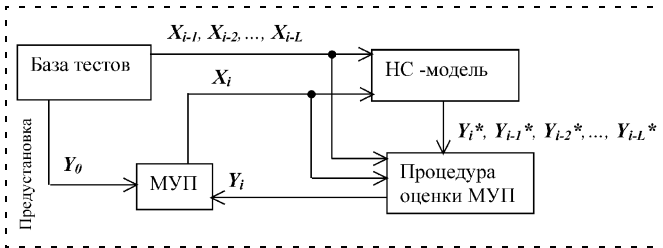


Рис. 3. Тестирование МУП с использованием базы тестов

становление ОС РМК. Отменить блокировку прерываний, перейти к шагу 2.

Шаг 4. Передать управление РМК. Модифицировать словарь ОС основного контроллера. Передать управление основному МК.

На рис. 3. показан процесс тестирования модифицированной управляющей программы. Для выполнения третьего шага алгоритма работы ДЯ необходимо выполнить действия согласно предлагаемому **алгоритму оценки МУП**.

Шаг 1. Из базы тестов взять первое значение Y_{-1} . Предъявить его РМК в качестве отклика ОУ. Получить X_r .

Шаг 2. Подать полученное X_r на нейронную сеть. Получить Y^* и предъявить его РМК. Проанализировать X_r и Y^* ,

Шаг 3. Повторять шаг 2 заданное число раз. Число повторений определяется экспертом-разработчиком. Вычислить показатели эффективности.

Шаг 4. Если необработанных значений не осталось, то выйти из режима тестирования. Иначе взять из базы следующее значение Y_{-1} . Предъявить его РМК в качестве отклика ОУ. Получить X_r . Перейти к шагу 2.

Таким образом, предложен алгоритм функционирования выделенного ДЯ и тестирования управляющей программы с помощью нейросетевой модели ОУ, который позволит осуществлять динамическое тестирование управляющей программы на целевой платформе и модифицировать ее, исключив влияние возможных программных ошибок на ОУ.

Контроль процесса адаптации программного обеспечения электронной системы управления двигателем внутреннего сгорания

Предлагаемую структуру вычислителя и способ контроля процесса модификации управляющей программы можно проиллюстрировать на примере системы управления автомобильным двигателем внутреннего сгорания [10].

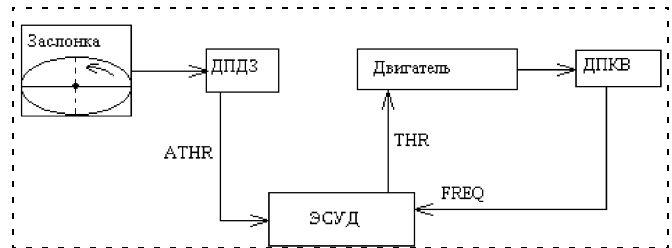


Рис. 4. Упрощенная схема управления двигателем

Рассмотрим упрощенную схему управления двигателем, приведенную на рис. 4, на котором обозначены: ДПДЗ — датчик положения дроссельной заслонки; АТНР — сигнал с датчика; ДПКВ — датчик положения коленчатого вала двигателя; FREQ — сигнал с датчика; ЭСУД — электронная система управления двигателем; ТНР — управляющее воздействие, регулирующее частоту вращения коленчатого вала.

Пусть целью реинжиниринга является ограничение некоторым значением частоты вращения коленчатого вала (КВ) в период обкатки двигателя. Этого можно добиться, изменив, например, процедуру обработки сигнала с ДПДЗ таким образом, чтобы в нужный момент ограничить частоту вращения, как будто дроссельная заслонка находится в фиксированном положении. В период обкатки двигателя предполагается модификация ПО с помощью процедуры, реализующей закон управления, действующий в период обкатки двигателя. При реализации этой процедуры возможно возникновение ошибок, приводящих к недопустимой работе двигателя. Компьютерное моделирование позволило проиллюстрировать воздействие различных законов управления на работу двигателя. При моделировании были реализованы три семантически и синтаксически корректных закона управления: основной (штатный) и два обкаточных (правильный и ошибочный). На рис. 5 показано окно

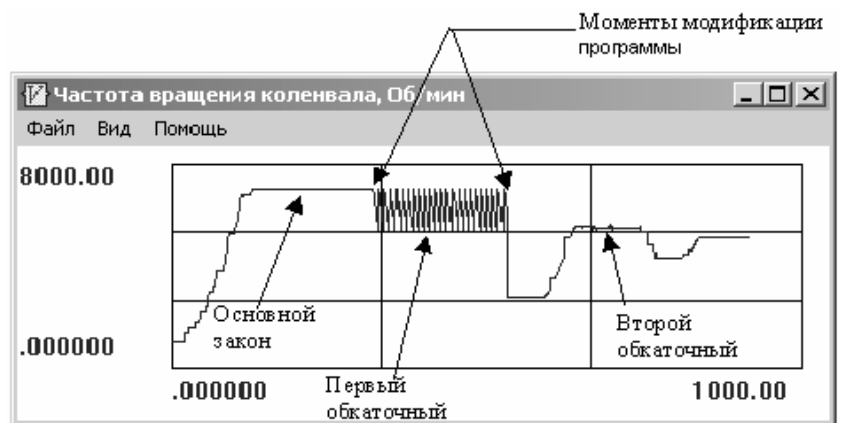


Рис. 5. Воздействие различных законов управления на двигатель

программы, демонстрирующее график изменения частоты вращения КВ двигателя во времени при изменяющемся случайным образом положении дроссельной заслонки. Из рис. 5 видно, что только второй обкаточный закон управления удовлетворяет цели реинжиниринга, а первый обкаточный приводит к нестабильности частоты вращения КВ двигателя, а также не ограничивает ее нужной величиной.

Нейросетевая диагностика различных вариантов управляющих программ была проведена в специально разработанной для этого среде моделирования процессов реинжиниринга программного обеспечения ЭСУД. Модель была построена на основании данных, полученных в результате измерений реакции двигателя на изменение положения дроссельной заслонки [11].

На рис. 6 показаны окна осциллографов для визуальной оценки возможного воздействия МУП на двигатель. НС была обучена таким образом, чтобы ее отклик соответствовал отклику объекта управления с погрешностью $\pm 150 \text{ мин}^{-1}$. Цель реинжиниринга — заменить существующий закон управления новым, позволяющим ограничить частоту вращения КВ значением в $5500 \dots 6500 \text{ мин}^{-1}$, сохранив при этом все достоинства существующего закона управления.

Из рис. 6 видно, что тестируемая программа управления содержит ошибки, приводящие к нестабильной работе двигателя, к самопроизвольным (неуправляемым) изменениям частоты вращения КВ двигателя при постоянных положениях педали акселератора. Очевидно, что тестируемый закон уступает по качеству действующему закону. Кроме этого, использование нового закона управления не ограничивает частоту вращения КВ требуемыми значениями. Воздействие подобной управляющей программы непосредственно на двигатель недопустимо.

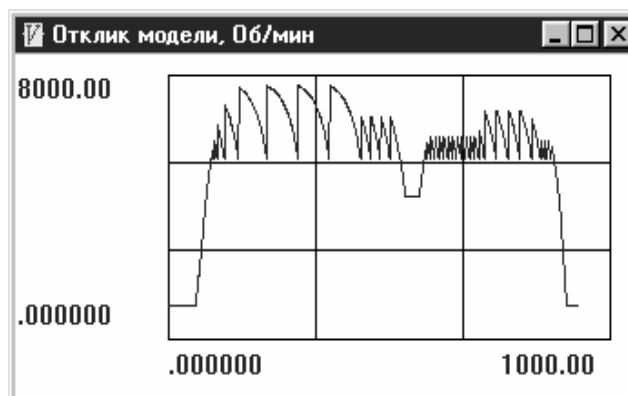
Среда моделирования позволяет проводить автоматическое тестирование МУП согласно предложенной методике. В процессе тестирования происходит анализ характера изменения наблюдаемого параметра (отклики модели) и на его основании принимается решение об использовании или отклонении тестируемого закона для управления реальным двигателем. Результаты тестирования некорректного закона управления (рис. 6.) показаны на рис. 7.

При анализе МУП вычисляют показатели рабочего и тестируемого законов управления и сравнивают показатели. При этом за успешно прошедшую тестирование принимают МУП, комплексный показатель у которой оказывался выше, чем у штатного закона управления [6].

На рис. 8 показано тестирование корректной управляющей программы, а на рис. 9 — результаты анализа МУП и принятое системой решение.



а) реакция двигателя (штатная управляющая программа)



б) реакция нейросетевой модели (тестируемая управляющая программа)

Рис. 6. Тестирование закона, приводящего к нестабильной работе двигателя:

а — реакция двигателя (штатная управляющая программа); б — реакция нейросетевой модели (тестируемая управляющая программа)

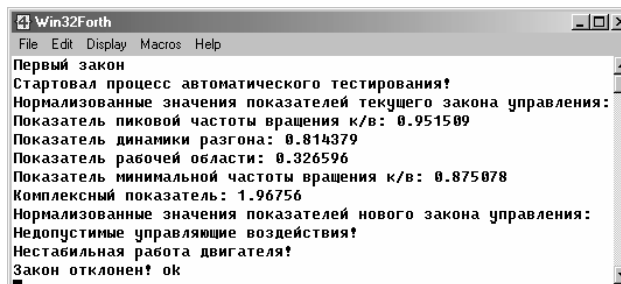
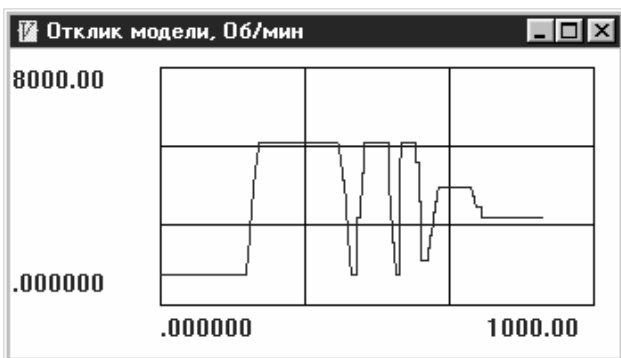


Рис. 7. Результаты автоматического тестирования



а) реакция двигателя (штатная управляющая программа)



б) реакция нейросетевой модели (тестируемая управляющая программа)

Рис. 8. Тестирование корректного закона управления: а — реакция двигателя (штатная управляющая программа); б — реакция нейросетевой модели (тестируемая управляющая программа)

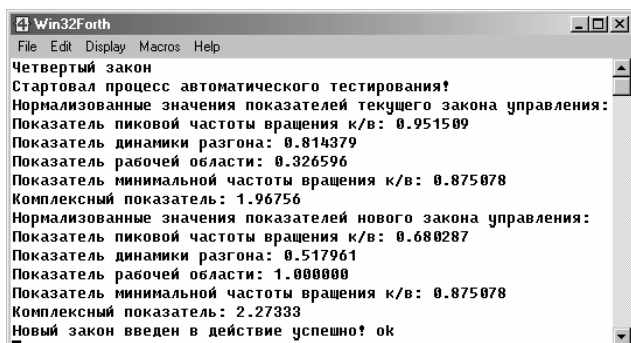


Рис. 9. Результаты тестирования корректного закона управления

Закон управления, реализуемый данной МУП, позволяет достичь цели реинжиниринга управляющей программы в период обкатки двигателя.

Заключение

Предложена трехпроцессорная структура интеллектуального адаптируемого вычислителя с выделенным ДЯ, защищенного от воздействия возможных программных ошибок, устойчивого к отказам одного из управляющих микроконтроллеров.

Предложен способ динамического тестирования управляющей программы с использованием нейросетевой модели ОУ, включающий в себя алгоритм процесса адаптации модернизируемой программы, способ мониторинга состояния ОУ, алгоритм дообучения нейронной сети в процессе функционирования СУ и алгоритм автоматической генерации базы тестов для проверки модифицированной управляющей программы.

Показана возможность применения предлагаемых решений к электронным системам управления двигателем внутреннего сгорания, при этом процессы тестирования управляющей программы специализированного вычислителя были апробированы с использованием среды моделирования, созданной в адаптируемой программной системе. В ходе моделирования программа управления двигателем была заменена на более эффективную, при этом обеспечивалась защита от некорректных вариантов обновляющего программного обеспечения.

Список литературы

1. Громов А. И., Каменнова М. С. Особенности реализации больших проектов // Computerworld. 1996. № 22. <http://www.osp.ru/cw/1996/22/12260>
2. IEEE Computer Society TCSE, 1990. <http://tcse.org/>
3. Bergey J., Hefley W., Lamia W., Smith D. A Reengineering Process Framework // Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1995.
4. Ахтырченко К. В., Сорокваша Т. П. Методы и технологии реинжиниринга // Тр. института системного программирования РАН, 2003. <http://www.citforum.ru/SE/project/isr>
5. Скрябин А. М., Кардаш Д. И. Способ организации процесса динамического тестирования программного обеспечения специализированного вычислителя // Матер. Второй Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием "Мехатроника, автоматизация, управление" (МАУ'2005): Сб. тр. Т. 2. Уфа: УГАТУ, 2005. С. 281—287.
6. Скрябин А. М., Кардаш Д. И., Фрид А. И. Патент РФ № 2300795 от 10.06.2007, "Устройство и способ контроля управляющей программы вычислителя".
7. Горбань А. Н., Россиев Д. А. Нейронные сети на персональном компьютере. Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 1996. 276 с.
8. Skryabin A. M., Kardash D. I. Autonomous Soft-hardware Computing Complexes Reengineering Methods // Proc. of 7th International Workshop on Computer Science and Information Technologies. 2005. Vol. 2. USATU, Ufa, Russia. pp. 5—10.
9. Калбертсон Р., Кобб Г. Быстрое тестирование: Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2002. 384 с.
10. Гирявец А. К. Теория управления автомобильным бензиновым двигателем. М.: Стройиздат, 1997, 173 с.
11. Скрябин А. М. Интеллектуальная среда моделирования реинжиниринга программного обеспечения специализированного вычислителя // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005611955 от 5 августа 2005 г.

УДК 62.001.63

Б. К. Гранкин, д-р техн. наук, проф.,
В. В. Козлов, д-р техн. наук, проф.,
И. В. Лысенко, д-р техн. наук, проф.,
Г. Д. Петров, д-р техн. наук, проф.,
СПИИРАН, Санкт-Петербург

Метод контроля технического состояния уникальных механических объектов при длительной их эксплуатации¹

Рассмотрен метод контроля технического состояния уникальных механических объектов, свойства которых изменяются в процессе эксплуатации. Оценка проводится на основе предварительного математического моделирования рабочих процессов с учетом деградации свойств конструкционных материалов и деформации элементов. Предложенный подход реализуется в рамках концепции длительной эксплуатации рассматриваемых объектов с использованием систем "функционального мониторинга".

Введение. Особенности эксплуатации уникальных механических объектов

Уникальные механические объекты (УМО), под которыми понимаются агрегаты сложных энергетических, технологических и других (в том числе ракетно-космических) комплексов, имеют особенности в обеспечении работоспособности при их длительной эксплуатации. Основной из них является отсутствие статистической информации о параметрах технического состояния при их длительной эксплуатации, поэтому традиционный статистический подход оказывается неприемлемым, что вызывает необходимость моделирования физических свойств объектов и контроля физических параметров процессов их функционирования.

Как правило, в объектах подобного рода средства дистанционного контроля создаются для наблюдения функционального состояния в целях управления функционированием, а техническое состояние оценивается в процессе специальных обследований, при техническом обслуживании и восстановлении. При этом эволюция деградационных изменений свойств конструкционных материалов, накопление остаточных деформаций и физико-химические преобразования при функционировании

¹ Статья выполнена в рамках проекта № 05 08 65412 а: "Методология и методы системных исследований при проектировании и эксплуатации ракетно-космических комплексов в интересах экономики страны", поддержанного грантом РФФИ.

УМО остаются бесконтрольными [1—4]. Кроме того, даже при специальных обследованиях многие элементы недоступны для контроля без разборки агрегатов. Обычно такие обследования заканчиваются проверкой функционирования и испытаниями агрегатов на рабочих режимах. Ясно, что эти режимы выявляют ценную информацию о техническом состоянии объектов. К сожалению, эта информация должным образом не регистрируется и не используется для оценивания уровня работоспособности агрегатов.

Поэтому возникают следующие актуальные задачи обеспечения работоспособности УМО при длительной их эксплуатации:

- формирование и обоснование показателей работоспособности на основе доступных для контроля физических параметров объектов и рабочих процессов их функционирования;
- моделирование объектов и процессов их функционирования с учетом влияния деградационных факторов длительной эксплуатации;
- обоснование информативности и достоверности информации о техническом состоянии УМО по результатам контроля;
- разработка рекомендаций для создания средств контроля технического состояния при функционировании УМО.

Ниже рассмотрены подходы к решению перечисленных задач и приведены обобщенные результаты их решения применительно к типовым механическим объектам наземного оборудования ракетно-космической техники.

Оценивание работоспособности уникальных механических объектов

Известно [5—7], что состояние объекта задано, если известны значения параметров $\mu^1, \mu^2, \mu^3, \dots, \mu^n$, которыми определяются выходные и входные характеристики объекта. При микроскопическом подходе для описания состояния кубического сантиметра покоящейся сплошной среды (элемента конструкции) приходится задавать $3 \cdot 27 \cdot 10^{19}$ функций от времени координат молекул, содержащихся в этом объеме. С макроскопической точки зрения во многих случаях состояние покоя (например, газа) определяется заданием давления P и плотности ρ . Переход от микропараметров, определяющих состояние объекта, к макропараметрам является одной из сложных проблем физики сплошных сред. Ее решение связано с дополнительными гипотезами, которые должны обосновываться результатами наблюдений и практикой.

В поисках доступной информации о техническом состоянии УМО авторами проанализировано предположение о том, что физико-химическая деградация на субмикроскопическом уровне механических объектов должна проявляться и на макроскопическом уровне, т. е. в изменениях параметров рабочих процессов, доступных для контроля. Мощность множества таких параметров (будем далее называть их параметрами технического состояния) чаще всего превышает мощность множества параметров, используемых для управления процессами функционирования (параметров функционального состояния). Поэтому в настоящее время не представляется возможным использовать обычные средства контроля для оценивания технического состояния, если предельное состояние не наступило.

Для оценивания работоспособности на всех этапах жизненного цикла УМО параметры технического состояния (ПТС) должны быть агрегированы в соответствующий показатель работоспособности, вид которого также следует обосновать.

На первом этапе формирования показателя работоспособности нами выполнен анализ физики отказа в механических технических объектах. Анализ показал, что причины деградационных процессов износа, старения, коррозии и накопления остаточных деформаций в исследуемых объектах соответствуют микро- и субмикроскопическому уровням описания конструкционных материалов, а параметры процессов деградации на этих уровнях могут быть описаны экспоненциальными зависимостями, представленными в таблице,

Процессы деградации	Зависимость
Коррозия	$t = k_1 Ra \exp\left(-\frac{k_2 ANf}{Ra}\right)$
Старение	$\sigma = \sigma_0 \exp(-k_3 t)$
Износ	$t = t_0 \exp\left(\frac{U_0 - Tds}{kT}\right)$
Деформация	$v = v_0 \exp\left[-\frac{H(\Delta\sigma)}{kT}\right]$

где t — время экспозиции; k_1, k_2, k_3 — эмпирические коэффициенты; Ra — отклонение профиля; A — амплитуда относительного смещения; N — число циклов; f — частота вибрации; t_0 — длительность разрушения моля вещества трибосистемы при отсутствии внешнего механического поля; U_0 — энергия активации процесса разрушения вещества; T — абсолютная температура; s — термодинамическая энтропия; k — постоянная Больцмана; σ — остаточная прочность; σ_0 — начальная прочность; k_σ — коэффициент скорости изменения прочности; v —

параметр деформации; v_0 — предэкспоненциальный множитель; H — энергия активации; $\Delta\sigma$ — градиент напряжений.

Для экстраполяции этих зависимостей на более высокие уровни описания использованы положения Онзагера [8] из общей теории деградации. В соответствии с ними известные соотношения деградации на микроскопическом уровне также могут быть описаны экспоненциальными зависимостями рассеяния активных ресурсов.

Для макроскопического уровня описания механических систем известны соотношения Лагранжа [9]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} = \frac{\partial L}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i}; \Phi = \frac{1}{2} \sum_{i,k} \alpha_{ik} \dot{x}_i \dot{x}_k,$$

здесь L — функция Лагранжа; Φ — функция Рэлея; \dot{x}_i, \dot{x}_k — обобщенные координаты; α_{ik} — соответствующий коэффициент.

Отсюда следуют известные соотношения

$$m\ddot{x} = -kx - \alpha\dot{x}; x = C_1 e^{-\lambda t} \cos(\omega t + C_2);$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \lambda^2}; \lambda = \frac{\alpha}{2m},$$

позволяющие описать характер падения запасенной энергии экспоненциальной зависимостью деградации активной энергии

$$E(t) = E_0 \exp\left(-\frac{\alpha}{m} t\right).$$

Из этого делается предположение о том, что обьективная природа деградации подчиняется физически оправданной экспоненциальной зависимости, что может быть использовано для формирования ПТС УМО. Это предположение позволяет представить общую закономерность для оценивания параметра Π_R работоспособности УМО в виде

$$\Pi_R = \frac{t_{ост}}{t_r} = \exp(\text{определяющие макропараметры}).$$

Здесь t_r — время от начала эксплуатации до наступления предельного состояния; $t_{ост}$ — время, оставшееся до наступления предельного состояния от момента оценивания технического состояния. При этом предельное состояние может быть оценено по значению показателя эффективности функционирования объекта, а скорость изменения работоспособности — по уравнению

$$\frac{d\Pi_R}{dt} = -(\text{функция параметров})\Pi_R.$$

Если ввести функцию повреждаемости (деградации) как $D(\Pi_R) = 1 - \Pi_R$, то соотношение (1) соответствует предположению о том, что повреждаемость объекта растет пропорционально уровню повреждения, т. е. лавинообразно.

Определение параметров технического состояния уникальных механических объектов

Для выявления множества доступных для контроля ПТС используют процедуры морфологического анализа [10]. На этой основе путем анализа нормативно-технических документов, общетехнической и специальной литературы для типовых УМО с последующим исключением зависимых показателей получены следующие определяющие параметры [11]: W — показатель эффективности (энергетический КПД); $HВ$ — показатель твердости конструкционного материала; ΔP — показатель уровня акустического излучения, сопровождающего процесс эксплуатации; δ — фактическое значение толщин (силовых) конструкций; t_{Φ} — фактическое время работы; v — характерные скорости рабочих процессов; T_r — температура фактическая; T_0 — температура окружающей среды.

Переход к выражению для функции работоспособности был выполнен с применением методов анализа размерности [12], что позволило выразить функцию работоспособности в виде

$$f = \frac{1}{W} \frac{\Delta P}{HВ} \frac{T_r}{T_0} \frac{t_{\Phi} v}{\delta},$$

откуда показатель работоспособности в рамках принятой концепции "экспоненциального закона деградации" определится соотношением

$$\Pi_R = \exp\left(-\text{const} \frac{1}{W} \frac{\Delta P}{HВ} \frac{T_r}{T_0} \frac{t_{\Phi} v}{\delta}\right).$$

Общий показатель позволяет сформировать и частные показатели технического состояния, если возможно выделить доминирующий процесс изменения технического состояния и соответствующий параметр. В качестве примеров частных показателей могут служить показатели для известных акустических, тепловых и других процессов деградации.

Теоретико-экспериментальное обоснование концепции "экспоненциального закона деградации"

Обоснование принятых предположений было проведено по двум направлениям: теоретическому и экспериментальному.

Теоретическое обоснование проводилось путем имитационного моделирования технического состояния типовых объектов механического оборудования.

В качестве примера был рассмотрен объект, имеющий кинематическую схему, показанную на рис. 1, и выполняющий функции стрелового крана.

В объекте учтены следующие факторы деградации: износ втулок шарниров $\lambda(t)$, изменение меха-

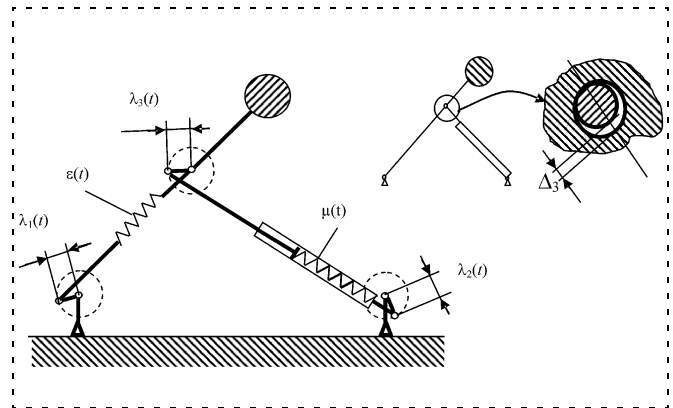


Рис. 1. Кинематическая схема функционального механического объекта, включающего подъемную стрелу с двумя шарнирами и грузом и шарнирно закрепленный на стреле и в опоре силовой гидроцилиндр

нических характеристик конструкционных материалов $\varepsilon(t)$, износ уплотнений в гидравлическом приводе подъема $\mu(t)$. Это заставило при моделировании вводить в проектные схемы и модели дополнительно виртуальные элементы с неголономными связями (люфты в шарнирах), заменять постоянные коэффициенты переменными величинами, изменяющимися в соответствии с принятой концепцией деградации. Анализ известных аналитических соотношений для механизмов свидетельствует, что учет неголономности механических связей существенно меняет классические уравнения динамики движения механизмов и приводит к колебательному характеру движения.

Расчеты такого механизма с учетом деградирующих узлов показали, что кинематика движения этой модели отличается от проектной, кинематические параметры различимо отражают уровень деградации объекта по каждому из факторов.

Такие результаты позволили выявить новые, до этого не используемые в системе управления механизмом, макропараметры для оценивания степени деградации объекта (скорость и время подъема, частоту изменения скорости равномерного участка подъема и др.). Некоторые сравнительные данные для объекта, показанного на рис. 1, приведены на рис. 2.

Экспериментальное обоснование выполнялось путем обработки доступной информации о динамике процессов в объектах со специальным введением факторов деградации в отдельных узлах и звеньях. Для демонстрации этого подхода к обоснованию был выбран насос, работающий в гидравлической системе управления силовым приводом. В качестве исследуемого сигнала выбрана осциллограмма давления, которая обычно не контролируется с такой степенью подробности в системах управления.

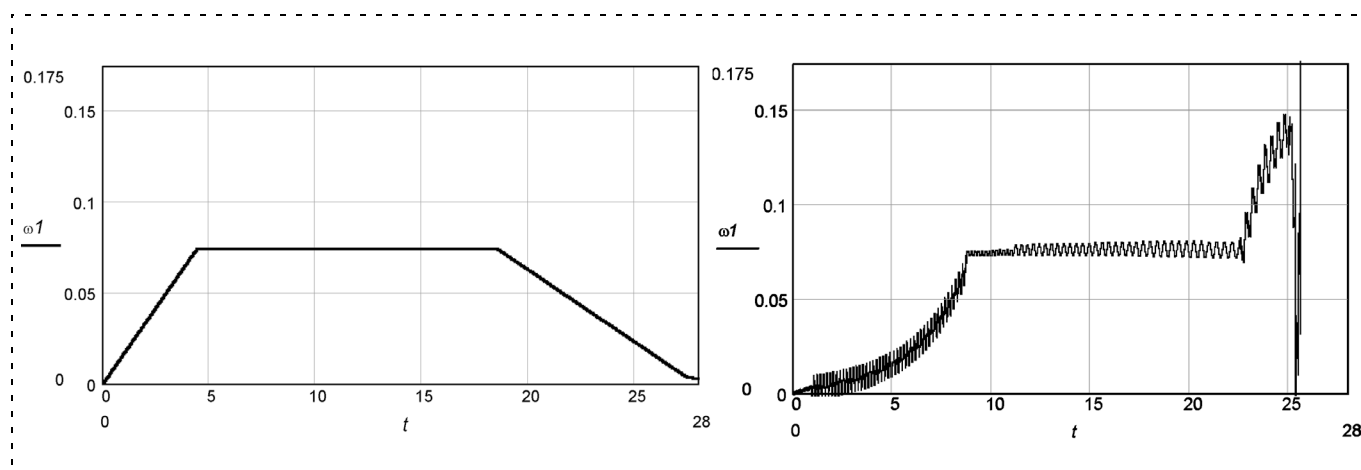


Рис. 2. Сравнительные временные характеристики изменения скорости подъема стрелы для проектных (слева) и "деградационных" (справа) моделей

Полученная таким образом осциллограмма считалась базовой для дальнейших расчетов при искусственном введении факторов деградации (изменения жесткости пружин выпускных клапанов, эксцентриситета коленчатого вала, зазора в плунжерных парах насоса) [13].

Для расшифровки влияния деградации по исследуемым факторам использовался метод вейвлет-преобразований [14], который успешно применялся в условиях нестационарных сигналов. Как показал анализ информации, предложенный подход позволяет одновременно различать снижение работоспособности по нескольким факторам на основе анализа характеристик динамических процессов.

Заключение

Показана возможность оценивания работоспособности машин и механизмов по имеющимся в процессе эксплуатации макропараметрам рабочих процессов, а также намечено направление прогнозирования технического состояния. Как показали результаты моделирования рабочих процессов типовых механических объектов с учетом влияния факторов деградации конструкционных материалов, элементов и их соединений, полученные динамические портреты содержат различные отклонения от проектных аналогов, имеют богатый для идентификации процессов деградации спектр характеристик и дают возможность выделить выгод-

ные для идентификации технических состояний объектов режимы функционирования и факторы деградации (износ, негерметичность, изменение свойств конструкционных материалов).

Список литературы

1. **Елизаветин М. А.** Повышение надежности машин. М.: Машиностроение, 1973. 430 с.
2. **Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. З.** Надежность машин. М: Высшая школа, 1988. 432 с.
3. **Проников А. С.** Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
4. **Канарчук В. Е.** Основы надежности машин. Киев: Наукова думка, 1982. 245 с.
5. **Дмитриев А. К.** Основы контроля и технической диагностики. М.: Б. и., 1978. 206 с.
6. **Дмитриев А. К., Юсупов Р. М.** Идентификация и техническая диагностика. М.: Б. и., 1987. 521 с.
7. **Седов Л. И.** Механика сплошных сред. М.: Наука, 1970. 492 с.
8. **Исаев С. И.** Курс химической термодинамики: Учеб. пос. для вузов. М.: Машиностроение, 1975. 156 с.
9. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теоретическая физика: Учеб. пос. в 10 т. М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1988.
10. **Назаров А. А.** Морфологическое прогнозирование развития военной техники. М.: Б. и., 1986. 248 с.
11. **Бирюков Г. П., Гранкин Б. К., Козлов В. В., Соловьев В. Н.** Основы проектирования ракетно-космических комплексов. СПб.: Алфавит, 2002. 393 с.
12. **Гленсдорф П., Пригожин И.** Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации: Пер. с англ. / Под ред. Ю. А. Чизмадзе. М.: Мир, 1973. 280 с.
13. **Башта Т. М.** Машиностроительная гидравлика. М.: Машиностроение, 1971. 672 с.
14. **Воробьев В. И., Грибунин В. Г.** Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб.: Изд-во ВУС, 1999. 204 с.

УДК 629.7.054

В. Э. Джашитов, д-р техн. наук, проф.,
В. М. Панкратов, д-р техн. наук, проф.,
М. А. Барулина, канд. техн. наук,
 ИПТМУ РАН, г. Саратов

Датчик температур для мониторинга и диагностики ракетно-космической техники в условиях тепловых ударов

Построены связанные математические модели нестационарных тепловых процессов, термоупругого напряженно-деформированного состояния и прочности датчика температур, применяемого для мониторинга и диагностики состояния ракетно-космической техники и функционирующего в условиях тепловых ударов. Разработаны алгоритмы и подерживающее программное обеспечение, позволяющие на этапе проектирования автоматизированно решать задачи расчета и анализа нестационарных температурных полей датчика и его термоупругого напряженно-деформированного состояния, а также проводить оценки прочности датчика при резких перепадах температур. Проведены компьютерные эксперименты, подтверждающие работоспособность математического, алгоритмического и программного обеспечения, получены количественные оценки и выработаны рекомендации по обеспечению эффективного функционирования датчика.

Введение и постановка задачи

Современные высоконадежные датчики температуры (ДТ) как чувствительные элементы мехатронных систем широко применяются [1] для измерения температуры в автомобильной и аэрокосмической промышленности, электротехнике, медицинской технике и т. д.

Одним из актуальных применений датчиков температуры в аэрокосмической области является измерение температур сред в камерах сгорания двигателей ракет для контроля процесса запуска двигателя и сжигания топлива. Исследование тепловых процессов, термоупругого напряженно-деформированного состояния и прочности такого ДТ — важная задача, так как температуры в камере сгорания изменяются в широком диапазоне от -200 до $+800$ °С за достаточно малое время (единицы секунд). Превышение допустимого предела температур приводит к выходу датчика из строя. Такие отказы резко снижают надежность изделий аэрокосмического приборостроения.

Объектом исследования являются датчик температуры [1] термоэлектрического типа (рис. 1, см. вторую сторону обложки) и физические процессы, в нем протекающие.

Датчик состоит из стального (ХН67МВТЮ-ВД) корпуса V. С помощью накидной стальной (12Х18Н10Т) гайки III датчик устанавливается в ка-

меру сгорания. Внутри датчика устанавливаются чувствительные элементы из специального кабеля I для термопар. Эти чувствительные элементы находятся в стальном (12Х18Н10Т) вкладыше VI и кожухе VII. В стальном (12Х18Н10Т) хвостовике II устанавливаются уплотнения VIII для препятствия выброса пламени при разгерметизации датчика. Датчик крепится к стенке камеры IV абсолютно жестко или через уплотнения IX.

Температура окружающей среды в районе хвостовика датчика температуры может принимать значения от -40 до $+50$ °С. Внутренние источники тепловыделения в датчике отсутствуют. Диапазон воздействия температуры на рабочую часть датчика в камере сгорания двигателя — от -200 до $+800$ °С (температура измеряемой среды), время воздействия — не более 750 с. Очевидно, что температурные воздействия в таком диапазоне могут привести к сложному изменению геометрических размеров датчика и появлению деформаций и напряжений, недопустимой температуре в местах пайки элементов и, в конечном итоге, к разрушению датчика.

Цель работы — обеспечение эффективного функционирования датчика температур, работающего в сложных условиях тепловых ударов.

Для достижения поставленной цели *ставятся и решаются следующие задачи*.

1. Создание и исследование математической модели нестационарных тепловых процессов, протекающих в датчике.

2. Построение и исследование конечно-элементной математической модели нестационарного термоупругого напряженно-деформированного состояния датчика.

3. Оценка прочности датчика при тепловых ударах и выработка рекомендаций.

Математическая модель тепловых процессов в датчике температуры

Для решения поставленной задачи применим накопленный опыт и методы [2, 3] решения задач расчета, анализа и визуализации нестационарных температурных полей изделий авиакосмического приборостроения.

Основу построенной математической модели составляет модифицированный метод элементарных тепловых балансов [2—4]. В соответствии с этим методом датчик температуры разбивается (рис. 1, см. вторую сторону обложки) на конечные элементарные объемы (твердотельные элементы), имеющие каноническую форму колец или сплошных цилиндров и усеченных конусов.

Число основных элементарных объемов (опорных расчетных точек, в каждой из которых определяется температурное поле с течением времени) равно 22. Общее число расчетных точек, включая разбиение по окружной координате и интерполя-

цию, задается, и их число составляет от нескольких сотен до тысяч.

Основной алгоритм расчета температурного поля датчика температуры в соответствии с обобщенным методом расчета и анализа трехмерных, нестационарных, неоднородных температурных полей систем авиакосмического приборостроения [2–4] имеет следующий вид:

$$T_i(t + \Delta t) = \left[1 - \frac{\Delta t}{c_i} \left(\sum_{j=1}^N q_{ij} + q_{ic} \right) \right] T_i + \frac{\Delta t}{c_i} \left(\sum_{j=1}^N q_{ij} T_j + q_{ic} T_{ci} + Q_i \right), \quad (1)$$

где $T_i(t)$, $T_i(t + \Delta t)$, c_i ($i = 1, \dots, M$) — температуры i -го элемента в настоящей и последующий моменты времени и его теплоемкость соответственно; q_{ij} — теплопроводности между элементами i, j ($j = 1, \dots, N$); q_{ic} — теплопроводность между i -м элементом и окружающей средой; T_{ci} — температура окружающей или измеряемой среды; Q_i — мощность источника тепла в i -м элементе; M — число элементов; N — число элементов, имеющих тепловой контакт с i -м элементом; Δt — шаг расчета.

Реализованный на компьютере в виде программного комплекса основной алгоритм (1) составляет основу математической модели тепловых процессов в рассматриваемом объекте исследования и позволяет определять температурное поле в каждой расчетной точке с течением времени.

По исходным данным (геометрическим, теплофизическим и другим параметрам элементов ДТ и среды) согласно методике и формулам [2, 4] в программном комплексе выполняется автоматизированный расчет масс и теплоемкостей элементарных объемов, теплопроводностей с учетом различных видов теплообмена (кондукции, свободной вынужденной конвекции и излучения), задаются температуры среды и другие необходимые данные аналогично тому, как это было сделано в [3].

Построенная математическая модель тепловых процессов имеет важную особенность, характерную для рассматриваемого датчика температур. Эта особенность заключается в том, что датчик работает в широком диапазоне изменения температур окружающей ($T_c = -40 \dots +50$ °C) и измеряемой сред ($T_{и} = -200 \dots +800$ °C) при возможном высоком давлении в измеряемой среде. Эти факторы обуславливают необходимость учета в математической модели зависимости теплопроводности материалов и коэффициентов теплоотдачи от температуры. Зависимости [5] от температуры коэффициентов теплопроводности основных материалов элементов ДТ и их линейная аппроксимация показаны на рис. 2.

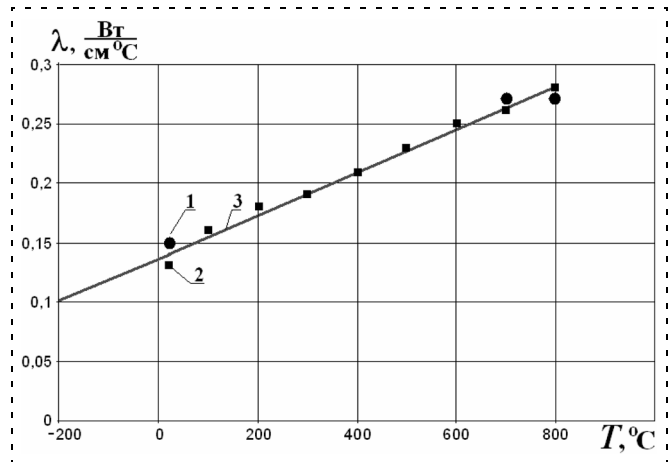


Рис. 2. Зависимость коэффициентов теплопроводности сталей 12Х18Н10Т (1), ХН67МВТЮ-ВД (2) датчика температуры и их линейная аппроксимация

Точность расчетов с помощью построенной математической модели тепловых процессов определяется точностью задания исходных данных и числом элементарных объемов в тепловой модели. Как показали проведенные исследования [2–4], среднеквадратические погрешности расчетных и экспериментальных данных по тепловым процессам в изделиях авиакосмического приборостроения не превышают 10...20 % в нестационарных температурных режимах и единиц процентов — в установившихся режимах при числе расчетных точек порядка нескольких десятков и сотен, что представляется вполне приемлемым для рассматриваемого ДТ.

Математическая конечно-элементная модель термоупругого напряженно-деформированного состояния и прочности датчика температуры

Для исследования полного термоупругого напряженно-деформированного состояния (НДС) датчика, имеющего сложную геометрию и испытывающего нестационарные температурные воздействия, предлагается использовать многофункциональную систему конечно-элементного анализа ANSYS 11.0. В качестве конечного элемента выбран объемный 20-узловой элемент SOLID95, предназначенный для моделирования тел сложной формы. При моделировании НДС полагалось, что соединения всех элементов датчика между собой абсолютно жесткие.

Конечно-элементная модель (с адаптивной сеткой) датчика в продольном сечении представлена на рис. 3 (см. вторую сторону обложки).

Выходными характеристиками системы конечно-элементного анализа ANSYS являются поля напряжений, деформаций и перемещений элементов ДТ как функций тепловых воздействий, геометрических и теплофизических параметров датчика.

По рассчитанным полям напряжений с помощью системы конечно-элементного анализа ANSYS автоматически определяются главные напряжения и эквивалентное напряжение:

$$\sigma_{\text{э}} = \sqrt{\frac{(\sigma_{\text{I}} - \sigma_{\text{II}})^2 + (\sigma_{\text{II}} - \sigma_{\text{III}})^2 + (\sigma_{\text{III}} - \sigma_{\text{I}})^2}{2}}, \quad (2)$$

где σ_{I} , σ_{II} , σ_{III} — главные напряжения.

Эквивалентное напряжение является важной величиной при оценке прочности в соответствии с различными условиями и теориями прочности [6]. Так, например, по условию прочности Губера разрушение не происходит, если эквивалентное напряжение не превышает предел прочности:

$$\sigma_{\text{э}} < \sigma_{\text{R}}. \quad (3)$$

Таким образом, построенные связанные математические модели тепловых процессов, термоупругого напряженно-деформированного состояния и прочности датчика температур включают в себя алгоритм (1), формулы и соотношения модифицированного метода элементарных тепловых балансов [2, 4] и зависимости вида, показанного на рис. 2, а также алгоритмы метода конечных элементов и формулы вида (2), (3).

Компьютерные эксперименты и анализ полученных результатов

Для реализации разработанных алгоритмов численного определения температурного поля датчика температур, обработки полученных числовых данных, включая их визуализацию, разработан программный комплекс "TDT2".

Нестационарные тепловые процессы в датчике температур моделировали в следующем базовом режиме.

Отношения давления в измеряемой и окружающей среде к нормальному атмосферному давлению приняты равными соответственно $D_{\text{и}} = 100$, $D_{\text{с}} = 1$. Температура окружающей среды вне камеры сгорания двигателя полагается заданной, постоянной и равной $T_{\text{с}} = +20$ °С. В начальный момент датчик температур прогрев до температуры окружающей среды $T_0 = T_{\text{с}} = +20$ °С.

Температура измеряемой среды $T_{\text{и}}$ в камере сгорания двигателя изменяется по следующему заданному закону:

$$T_{\text{и}} = \begin{cases} -200 \text{ °С} & \text{при } 0 \leq t \leq t_1; \\ +800 \text{ °С} & \text{при } t_1 < t \leq t_k, \end{cases}$$

где $t_1 = 750$ с — характерный момент времени скачкообразного изменения температуры измеряемой среды; $t_k = 1500$ с — характерный момент времени окончания расчета.

Графики текущих температур и температурных перепадов для основных элементов ДТ, построенные по результатам математического моделирования принятого базового режима работы датчика, приведены на рис. 4 (см. третью сторону обложки).

Пространственные топограммы температурных полей в осевом сечении датчика по всем расчетным точкам для базового режима в характерные моменты времени $t_1 = 750$ с и $t_k = 1500$ с приведены на рис. 5 (а и б, соответственно, см. третью сторону обложки).

Представленные результаты расчета, построенные графики и топограммы подтверждают работоспособность разработанного математического, алгоритмического и программного обеспечения.

Как видно из рис. 4, 5, при выбранных значениях параметров датчика температур в условиях действия экстремальных температурных возмущений измеряемой среды температурное поле внутри датчика существенно нестационарно и неоднородно.

При этом максимальные динамические температурные перепады между элементами датчика достигают значения 684 °С. Температура в датчике за характерное время 750 с "не успевает" полностью установиться.

При температуре измеряемой среды $T_{\text{и}} = +800$ °С максимальные температуры имеют место в концевых элементах датчика, контактирующих с измеряемой средой (объемы 19, 20, 22, соответствующие кабелю, вкладышу и кожуху, рис. 1, см. вторую сторону обложки), и достигают значения $\approx +782$ °С.

При этом минимальные температуры имеют место в элементах на противоположной стороне ДТ, контактирующих с окружающей средой (объем 2, соответствующий наполнителю, рис. 1, см. вторую сторону обложки), и достигают $\approx +488$ °С.

Проведем анализ рассчитанного термоупругого напряженно-деформированного состояния датчика температур, которое обусловлено полученными температурными воздействиями.

На рис. 6 (см. третью сторону обложки) показана деформация датчика (теневые области) при температуре измеряемой среды $T_{\text{и}} = -200$ °С в момент времени $t = 100$ с.

Зависимости от времени максимальных эквивалентных напряжений при абсолютно жестком креплении датчика к стенке камеры и при креплении с использованием уплотнителя показаны на рис. 7.

Как видно из рис. 7, эквивалентные напряжения возрастают на протяжении всего периода измерения и достигают своего максимума при $t = 1500$ с.

При $t \approx 800$ с имеет место кратковременное уменьшение эквивалентного напряжения, если датчик соединен со стенкой камеры через уплотнитель.

Это уменьшение связано с тем, что теплопроводность и коэффициент теплового расширения уплотнителя мал по сравнению с этими же параметрами стали, и тепловой удар, произошедший в момент

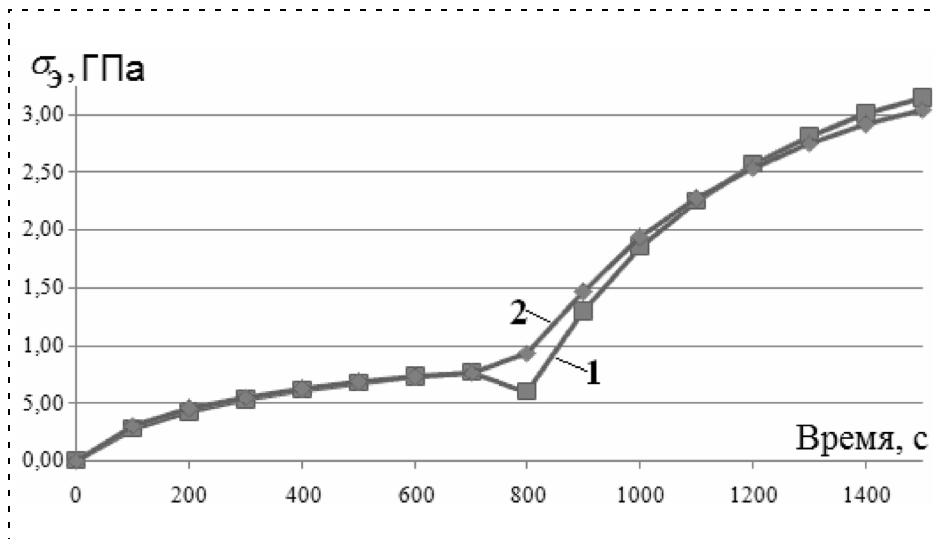


Рис. 7. Максимальные эквивалентные напряжения при креплении через уплотнитель (1) и при абсолютно жестком закреплении (2)

времени $t = 750$ с, оказывает влияние на НДС уплотнителя и материала датчика только через $\Delta t \approx 50$ с.

На рис. 8 (см. третью сторону обложки) приведена цветовая топограмма распределения в конечный момент времени $t = 1500$ с эквивалентных напряжений в датчике при его креплении к стенке камеры с помощью уплотнителя и при жестком креплении.

Максимальные напряжения, при различных способах крепления ДТ, различаются незначительно (см. рис. 7) и достигают значения $\approx 3,14$ ГПа.

Однако при применении уплотнителя максимальные напряжения сконцентрированы в уплотнителе и стенке камеры (рис. 8, а, см. третью сторону обложки). Напряжения же в самом датчике при применении уплотнителя существенно меньше и не превышают 0,7 ГПа. При этом температуры в зоне крепления ДТ к стенке камеры изменяются в диапазоне от -120 до $+573$ °С.

Если же используется абсолютно жесткое крепление, то максимальная концентрация напряжений (рис. 8, б) имеет место в датчике температур.

Заключение

1. Предпочтительным вариантом крепления датчика к стенке камеры является крепление через уплотнитель, материал уплотнителя должен выдерживать перепады температуры в диапазоне от -120 до $+573$ °С.

2. Предел прочности материалов датчика должен превышать 3,14 ГПа.

3. В концевых элементах датчика, контактирующих с измеряемой средой, материалы для пайки кабеля должны выдерживать предельно возможные температуры измеряемой среды от -200 до $+800$ °С. В элементах датчика на противоположном его крае,

контактирующем с окружающей средой, материалы для пайки кабеля должны выдерживать менее "жесткие" температуры в диапазоне от -83 до $+488$ °С (при температуре окружающей среды $T_c = +20$ °С и отношении давления в измеряемой среде к нормальному атмосферному давлению $D_{и} = 100$).

Таким образом, созданная математическая модель, проведенные компьютерные эксперименты позволяют проводить анализ и получать качественные и количественные оценки нестационарных тепловых процессов, термоупругого напряженно-деформированного состояния, прочности и надежности датчика температур и вырабатывать

обоснованные рекомендации по выбору параметров, обеспечивающих его надежную и эффективную работу.

Построенная математическая модель и поддерживающее алгоритмическое и программное обеспечение могут быть использованы как при проектировании и создании высоконадежных датчиков температуры для ракетной техники, так и при анализе функционирования этих датчиков в реальных условиях температурных возмущений.

Список литературы

1. Датчики и преобразующая аппаратура. Каталог. Российское авиационно-космическое агентство. Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-исследовательский институт физических измерений". Пенза. 2002. 157 с.
2. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / Под общ. ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. СПб.: Изд. НЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2005. 404 с.
3. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Математическое моделирование нестационарных тепловых процессов в колесе летательного аппарата при посадке // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 4. С. 101–108.
4. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.
5. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. / Под общ. ред. В. Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
6. Прочность. Устойчивость. Колебания. Справочник: 3 т. Т. 1 / Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. 835 с.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) по проекту 05-08-01168а и Фонда поддержки Отечественной науки, за что им особая благодарность от авторов.

УДК 681.518

С. Ю. Боровик, канд. техн. наук,**Ю. Н. Секисов**, д-р техн. наук,**О. П. Скобелев**, д-р техн. наук,

Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Принципы построения систем сбора, преобразования и обработки информации для экспериментальных исследований винтовентиляторов¹

Обсуждаются принципы построения систем сбора и обработки измерительной информации о координатах смещений торцов лопастей винтовентилятора. Разработанные принципы рассматриваются на уровне обобщенной структурно-функциональной схемы, приводится описание типовой структуры технических средств и типовых алгоритмов, предназначенных для систем, решающих различные задачи экспериментальных исследований винтовентилятора.

Введение

Известны методы получения измерительной информации о координатах смещений торцов лопаток компрессора и турбины, а также лопастей винтовентилятора в газотурбинных двигателях (ГТД) [1–4]. В работе [5] рассматривается обобщенное представление всех возможных методов с использованием кластерных одновитковых вихретоковых датчиков (КОВТД), а также моделирования неизмеряемых координат и мешающих факторов (МФ). В той же работе в качестве примера для заданных ограничений в отношении числа чувствительных элементов (ЧЭ) КОВТД, координат смещения и МФ определяется соответствующее множество рассматриваемых методов. Однако это множество отражает не только известные по публикациям методы, привязанные к решению конкретных задач экспериментальных исследований ГТД, но и методы, которые на сегодняшний день следует признать гипотетическими, что, с одной стороны, связано с продолжением поиска значимых для практики конкретных задач, решаемых этими методами, а с другой стороны — с ограничениями в области применения существующих КОВТД. Действительно, рассматриваемые в работах [6–8] КОВТД в основном ориентированы на винтовентиляторы авиационных ГТД (имеют сравнительно большие габаритные размеры и работают в диапазоне температур ± 50 °С).

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-08-50185а).

Создание же КОВТД, предназначенных для применения на высоких ступенях компрессоров и в турбинах, требует серьезных дополнительных затрат на разработку конструкций и технологии изготовления кластерных датчиков, имеющих значительно меньшие габаритные размеры и работающих в особо тяжелых и даже экстремальных условиях (например, при температурах до $+1500$ °С)².

Вместе с тем необходимо отметить, что в классе лопаточных силовых установок применение винтовентиляторов не ограничивается авиастроением. Винтовентиляторы широко используются в силовых установках судов на воздушной подушке различного назначения и грузоподъемности [9, 10]. Нетрудно представить себе и мощные винтовентиляторные силовые установки не транспортного назначения, которые вместе с вышеперечисленными образуют вполне самостоятельную и развивающуюся ветвь силовых установок.

Новые разработки требуют проведения экспериментальных исследований, а следовательно, и создания систем, в которых реализуются методы сбора и обработки измерительной информации о координатах смещения торцов лопастей винтовентилятора. Разработке принципов построения таких систем и посвящена настоящая статья. Принципы построения рассматриваются на уровне обобщенной структурно-функциональной схемы, а также типовой структуры технических средств, предназначенных для систем, решающих различные задачи экспериментальных исследований винтовентилятора. Кроме того, на их основе кратко изложены типовые алгоритмы функционирования систем различного назначения³.

Обобщенная структурно-функциональная схема

Обобщенная структурно-функциональная схема систем сбора и обработки информации о координатах смещений торцов лопастей винтовентилятора изображена на рис. 1. Винтовентиляторная установка представлена некоторым множеством параметров, среди которых выделяются искомые смещения торцов лопастей (СТЛ), а также параметры, характеризующие режим работы силовой установки, внешнюю среду и МФ. К параметрам, характеризующим режим работы установки (ПР), относятся скорости вращения винтов, углы поворота лопастей, тяговые усилия. Параметры внешней среды и МФ — это, как правило, температуры, давления, скорости потока наружного воздуха и др.

² Разумеется, все вышеизложенное относится и к тем методам, которые не связаны с указанными ограничениями, а потому не попали в пример множества методов, рассмотренный в работе [5].

³ При этом в статье использованы материалы, опубликованные авторами и коллегами по работе в сравнительно малодоступных сборниках трудов конференций [11, 12] и диссертации [13].

В состав схемы на рис. 1 входят два укрупненных блока — "Сбор и преобразование" и "Обработка данных". В блоке "Сбор и преобразование" выполняется первичное преобразование СТЛ с помощью КОВТД, нормализация их выходных параметров, коммутация и аналого-цифровое преобразование.

Основная особенность нормализации состоит в том, что в каналах КОВТД используются индивидуальные для каждого ЧЭ и его согласующего трансформатора в составе датчика [7] процедуры, предусматривающие импульсное питание и реализующие так называемый метод первой производной (производная тока в момент подачи импульса питания является выходным сигналом и определяется изменениями индуктивностей КОВТД). Питание подается одновременно на все ЧЭ КОВТД, а выходные сигналы (напряжения) усиливаются и запоминаются до момента появления следующего импульса питания [1].

Коммутация и аналого-цифровое преобразование должны обеспечивать такое быстродействие, чтобы полный цикл получения цифровых кодов в каналах КОВТД оставался в пределах одного периода импульса питания. Это позволяет получить информацию со всех ЧЭ в одном временном сечении, что гарантирует достоверную информацию о координатах СТЛ и других параметрах.

Для преобразования одного из наиболее значимых ПР — скорости вращения — используются, как правило, датчики промышленного изготовления, например ДЧВ (датчик частоты вращения). Нормализация сигналов ДЧВ связана с формированием на его выходе одиночного импульса прямоугольной формы на один оборот винта. Период сформированных импульсов преобразуется в цифровой код, с учетом которого ведется управление в блоке "Сбор и преобразование".

Несмотря на то, что угол поворота лопасти является одной из координат смещений, этот параметр рассматривается как ПР и контролируется штатным потенциометрическим датчиком с нормализованным выходным сигналом. В качестве ПР в процессе стендовых испытаний винтовентиляторного авиационного ГТД может использоваться и тяговое усилие, преобразуемое с помощью тензорезисторного датчика (также промышленного изготовления) с усилителем-нормализатором на выходе.

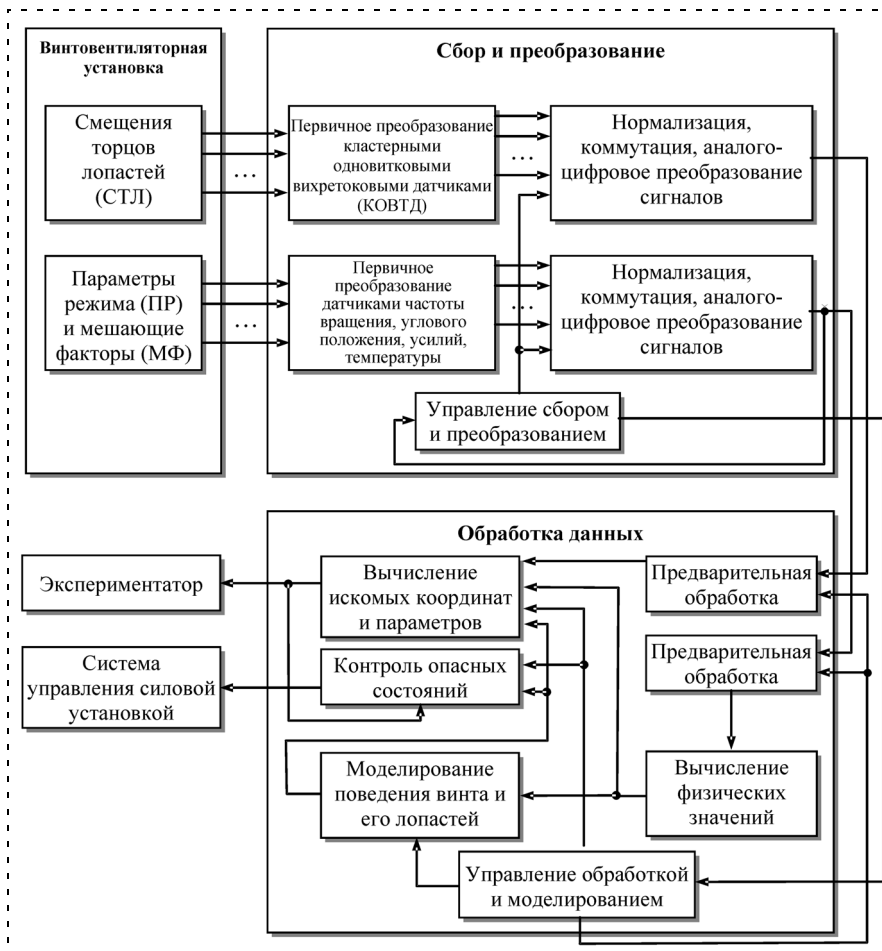


Рис. 1. Обобщенная структурно-функциональная схема

Температура внешней среды рассматривается как МФ по отношению к КОВТД. Для преобразования температуры могут использоваться термопары, терморезисторы и полупроводниковые датчики температуры [14, 15]. Датчики температуры могут быть встроены в КОВТД и для термокоррекции [1].

В аналоговых каналах датчиков ПР и МФ к коммутации и аналого-цифровому преобразованию не предъявляется каких-либо повышенных требований в отношении быстродействия.

Цифровые коды, полученные в блоке "Сбор и преобразование" и соответствующие сигналам в каналах КОВТД, в блоке "Обработка данных" проходят предварительную обработку, которая включает отбраковку и фильтрацию.

Аналогичную предварительную обработку проходят и цифровые коды, соответствующие ПР и МФ, которые после вычисления физических значений используются при моделировании поведения винта и его лопастей.

Цифровые коды в каналах КОВТД после предварительной обработки, физические значения ПР и МФ, а также результаты моделирования передаются для выполнения заключительных операций —

вычисления координат смещений и каких-либо дополнительных параметров (см. ниже), а также для контроля опасных состояний (критических зазоров между торцами лопасти и статорной оболочкой) объекта.

Контроль опасных состояний предусматривает сравнение вычисленных координат и параметров с их допустимыми значениями.

Типовая структура технических средств

На рис. 2 представлена типовая структура технических средств системы сбора и обработки измерительной информации, способной решать ряд задач экспериментальных исследований винтовентиляторных установок.

В состав технических средств входит датчиковая аппаратура, устройство ввода/вывода аналоговых и дискретных сигналов (УВВАДС), например платы фирмы L-Card (L-783, E14-440, E20-10 и т. д.), и ПЭВМ.

Преобразование СТЛ выполняется группой нестандартных кластерных датчиков (КОВТД₁, ..., КОВТД_n) с устройствами нормализации (УН₁, ..., УН_n), причем в состав каждого УН входят индивидуальные мостовые схемы с импульсным питанием, дифференцирующие усилители и устройства выборки-хранения [1, 15], число которых определяется числом ЧЭ и согласующих трансформаторов в каждом датчике. УН₁, ..., УН_n выполняются в виде отдельных блоков, "встроенных" в линию связи (КОВТД устанавливаются на статорной оболочке винтовентилятора и соединяются с УН отрезками линий не более 0,3 м).

Преобразование ПР и МФ осуществляется группой датчиков Д₁, ..., Д_m, и соответствующими устройствами нормализации УН₁, ..., УН_m. В составе группы предусмотрено использование как минимум одного датчика типа ДЧВ с частотным выходным сигналом, который подается на дискретные входы (ДВх) УВВАДС.

Предусмотрены средства, обеспечивающие вывод протокола экспериментов и сопутствующей гра-

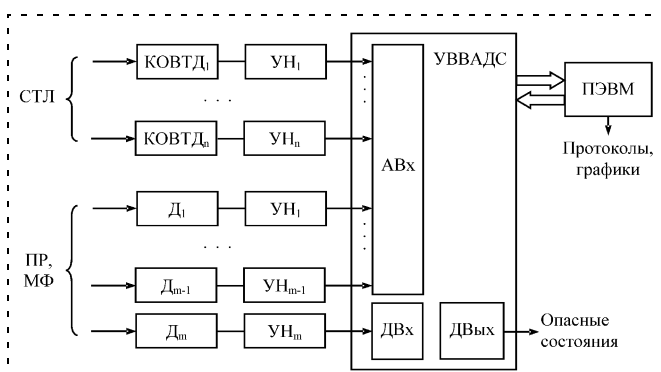


Рис. 2. Типовая структура технических средств

фической информации, а также сигнала опасных состояний (дискретный выход, ДВых).

Типовая структура технических средств, представленная на рис. 2, может быть реализована как в системе, предназначенной для стендовых экспериментов, так и в системе, ориентированной на бортовые испытания винтовентиляторного ГТД.

Основная задача использования подобного рода систем в ходе стендовых экспериментов — получение информации об изменениях радиальных зазоров (РЗ) между статорной оболочкой и торцами лопастей, т. е. получение информации об *Y*-координате смещений в системе *OXYZ*, жестко связанной со статорной оболочкой. С этой целью на статорной оболочке размещают первую группу датчиков, сдвинутых относительно друг друга на 90° [15, 16]. Начало отсчета (точка 0) находится в центре торцевой части каждого датчика. Особенность применяемых конструкций датчиков состоит в том, что число ЧЭ в каждом датчике равно одному (в работах [4, 5] такой кластерный датчик авторы называют "вырожденным"). Поэтому в системе используются индивидуальные УН, число которых также равно числу датчиков.

Вторая группа, преобразующая ПР и МФ, содержит штатный потенциометрический датчик угла поворота (φ_y — координата смещений), датчик тяговых усилий с соответствующим устройством нормализации, датчик скорости вращения винта — ДЧВ, четыре полупроводниковых датчика температуры (МФ) со встроенными УН [15], т. е. $m = 7$.

В качестве УВВАДС в системе используется плата L-783, размещенная в РС1-слоте ПЭВМ.

На основе полученной информации о тяговых усилиях проводится моделирование изгиба лопастей, по данным об угле поворота лопастей определяются *X*, *Z*-координаты смещений и в конечном счете находятся искомые *Y*-координаты (РЗ).

Основная задача систем при бортовых испытаниях остается прежней — это получение информации о РЗ (*Y*-координатах СТЛ). Однако для решения этой задачи в системе предусматривается применение новых разработок КОВТД с тремя ЧЭ [7], которые обеспечивают определение трех координат смещения (*X*, *Y*, *Z*) без использования моделирования неизмеряемых координат. Вместе с тем, ранее разработанные модели изгиба лопастей могут быть использованы для оценки тяговых усилий винта (лопасть винта рассматривается как упругий элемент силоизмерительного устройства).

Расположение и число КОВТД на статорной оболочке аналогично рассмотренной выше системе. При этом число блоков УН соответствует числу КОВТД ($n = 4$), однако каждый блок содержит индивидуальные мостовые схемы, дифференцирующие усилители и устройства выборки-хранения, число которых соответствует числу ЧЭ ($3n$).

В группе датчиков, преобразующих ПР и МФ, сохраняются те же датчики и соответствующие УН, за исключением канала с датчиком тяговых усилий ($m = 6$).

По суммарному числу аналоговых и дискретных каналов в такой системе также может быть использована плата L-783.

Обобщенные алгоритмы функционирования

К типовым алгоритмам функционирования систем могут быть отнесены алгоритм управления квазипараллельными преобразованиями и вычислениями, алгоритм вычисления координат смещений торцов лопастей, алгоритмы моделирования поведения винта и изгиба лопасти.

- *Алгоритм управления квазипараллельными преобразованиями и вычислениями.* В работах [12, 13] приведено описание алгоритма управления преобразованиями, предусматривающего квазипараллельное выполнение нескольких операций, в том числе преобразование периода вращения винта и СТЛ в цифровые коды, вычисление моментов времени прохождения основаниями лопастей геометрического центра торцевой части датчика, закрепленного на статорной оболочке, и выборка кодов в указанные моменты времени для последующего вычисления координат. При этом предполагается, что вычислительные средства обладают необходимым быстродействием и имеется буферная память достаточного объема. Следует отметить, что в указанных работах [12, 13] речь идет об использовании традиционных ОВТД. Однако их замена на КОВТД сути рассматриваемого алгоритма не изменяет.

Алгоритм (рис. 3) предусматривает преобразование периода вращения ротора в цифровой код на каждом обороте винта и преобразования изменений индуктивностей КОВТД в код с постоянной максимально возможной частотой (минимальным периодом ~ 1 мкс). Код, соответствующий периоду вращения ротора и полученный на первом обороте ротора, используется для вычисления периода и моментов времени прохождения основаниями лопастей геометрического центра (ГЦ) между ЧЭ в торцевой части КОВТД ($t_{ГЦ}$), причем перечисленные вычислительные операции осуществляются в течение следующего (второго) оборота ротора. В предположении, что скорость вращения ротора сохраняется неизменной в течение трех оборотов, на третьем обороте осуществляется выбор кодов, соответствующих индуктивностям КОВТД по каждой лопасти в рассчитанные на предыдущем периоде моменты, и только эти значения кодов фиксируются в буферной памяти.

Каждый последующий период данные, занесенные в буферную память, обновляются. При этом задержка между преобразованием скорости вращения

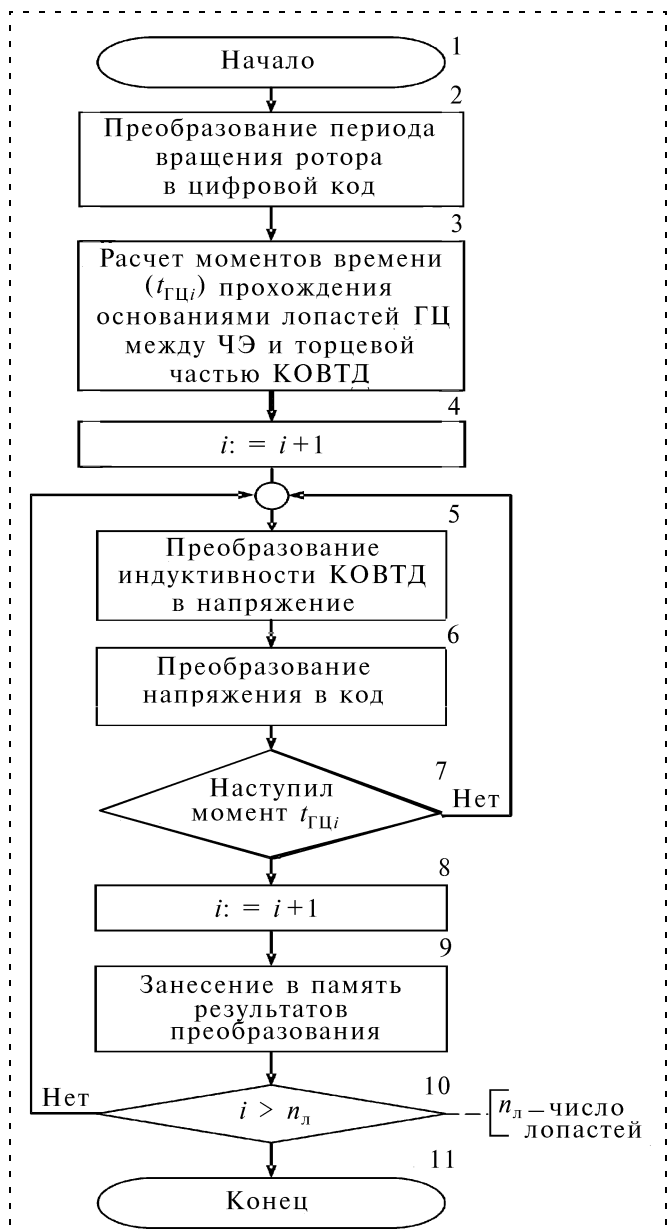


Рис. 3. Схема алгоритма квазипараллельных преобразований и выборки кодов

в код и выборкой кодов КОВТД составляет один оборот винта. Очевидно, что вычисление периода вращения винта и моментов времени, соответствующих прохождению оснований лопасти ГЦ, не требует времени, равного целому периоду, и если все вычисления заканчиваются до момента времени, соответствующего прохождению ГЦ основанием первой лопасти, то выборку кодов КОВТД можно проводить уже на следующем периоде, т. е. практически без задержки.

- *Алгоритм вычисления координат смещений торцов лопастей* сводится к решению системы уравнений, каждое из которых представляет собой семейство градуировочных характеристик (ГХ) измери-

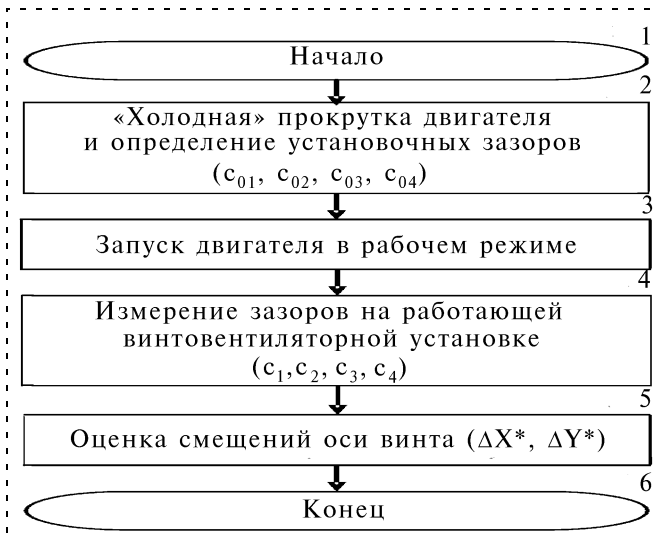


Рис. 4. Схема алгоритма оценки координат смещения оси винта

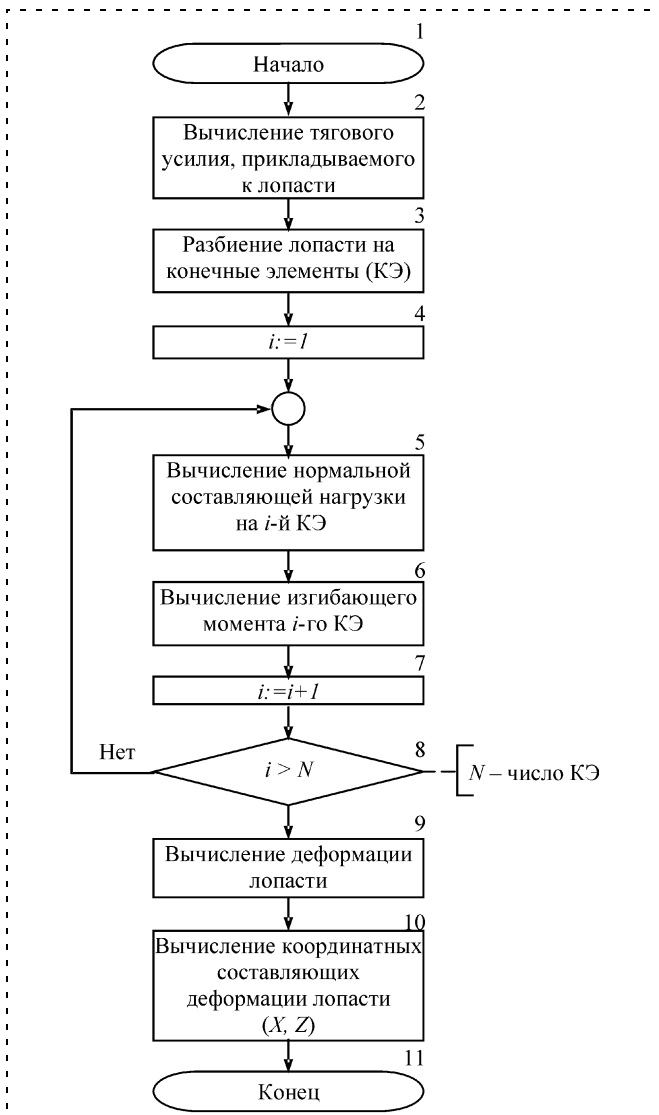


Рис. 5. Схема "прямого" алгоритма моделирования изгиба торцов лопастей винта

тельных каналов КОВТД, полученных экспериментально. Семейства ГХ аппроксимируются функциями нескольких переменных. В работе [13] для аппроксимации используются полиномиальные или кусочно-линейные функции (на основе интерполяционных таблиц). Число уравнений в системе определяется числом ЧЭ в КОВТД и каналов в системе, а также числом искомым координат. Решение системы уравнений проводится методом Ньютона, в котором предусмотрены итерационные процедуры, отличающиеся квадратичной сходимостью и сравнительно малыми вычислительными затратами. При ограничениях на габаритные размеры КОВТД, что приводит к ограничению числа ЧЭ, осуществляется моделирование неизмеряемых координат, и число уравнений в системе также уменьшается. В пределе, когда в датчике только один ЧЭ ($n = 1$), для вычисления искомой Y -координаты ($P3$) достаточно одного уравнения (обратной ГХ) [13].

Если предположить, что из четырех кластерных датчиков пара КОВТД₁, КОВТД₃ расположена на вертикальной оси (Y^*), а другая пара (КОВТД₂, КОВТД₄) — на горизонтальной оси (X^*), а также допустить отсутствие деформации статорной оболочки, то можно оценить координаты смещения оси винта (ΔX^* , ΔY^*), которые наблюдаются в рабочем режиме двигателя (рис. 4)⁴. Обязательным условием при этом является получение информации о $P3$ в режиме "холодной" прокрутки двигателя, например от стартера (c_{01} , c_{02} , c_{03} , c_{04}). Тогда в рабочем состоянии двигателя $P3$ можно записать в виде системы уравнений

$$\begin{cases} c_1 = c_{01} + \Delta Y^*; \\ c_2 = c_{02} - \Delta X^*; \\ c_3 = c_{03} - \Delta Y^*; \\ c_4 = c_{04} + \Delta X^*. \end{cases}$$

Решение системы уравнений позволяет оценить смещения оси винта:

$$\Delta X^* = \frac{1}{2} (c_4 - c_2); \Delta Y^* = \frac{1}{2} (c_1 - c_3).$$

• *Алгоритмы моделирования.* Следует отметить, что алгоритмы моделирования плохо поддаются типизации, так как существенно зависят от конкретной задачи, решаемой в системе. В то же время, возвращаясь к примерам систем, рассмотренных в предыдущем разделе, а также к другим возможным их модификациям, можно принять как типовые так называемые "прямой" и "обратный" алгоритмы моделирования изгиба торцов лопастей винта под действием тяговых усилий.

"Прямой" алгоритм моделирования (рис. 5) используется в стендовой системе сбора и обработки информации об Y -координатах СТЛ ($P3$). На пер-

⁴ Описание этого алгоритма публикуется впервые.

вом этапе работы алгоритма на основе экспериментальных данных, полученных с датчика тяги, определяется усилие, прикладываемое к каждой лопасти винта, а затем моделируются изгибные деформации лопастей с учетом упрощающих допущений в отношении геометрии лопасти и распределения тягового усилия по ее поверхности. Расчет деформаций для заданных значений сил ведется методом конечных элементов [17]. Для этого лопасть разбивается на N конечных элементов и с учетом принятого допущения о биквадратичном законе распределения силы вдоль оси лопасти для каждого конечного элемента определяются нормальная составляющая силы, действующей на лопасть, и изгибающий момент. Далее вычисляются изгибные деформации каждой лопасти и с учетом известных угловых смещений лопасти определяются искомые координатные составляющие X и Z ⁵.

"Обратный" алгоритм моделирования ориентирован на применение в системе бортовых испытаний винтовентиляторного ГТД. В его основе — та же модель изгиба лопасти под действием тягового усилия. Однако исходные данные для моделирования — это X , Y , Z -координаты смещений торцов лопастей, найденных в каналах кластерного датчика с тремя ЧЭ. Они позволяют определить изгиб торца лопасти в направлении нормали к ее поверхности, а с помощью модели лопасти как упругого элемента дают возможность найти силу, действующую на лопасть.

По известной информации о координате φ , полученной со штатного потенциометрического датчика разворота лопастей, вычисляется составляющая тягового усилия, направленная вдоль оси винта.

Аналогичные вычисления проводятся в отношении других лопастей. Полученные тяговые усилия по каждой лопасти складываются, а их сумма характеризует тяговое усилие винта (при этом предполагается, что заметных изменений тягового усилия за время оборота винта не происходит)⁶.

Разумеется, наличие четырех кластерных датчиков и информации об Y -координатах ($P3$) позволяет определить и координаты смещений оси винта (ΔX^* и ΔY^*), а также повысить достоверность оценки тяговых усилий винта за счет усреднения результатов вычислений по данным, полученным в каналах всех четырех датчиков.

Если винтовентиляторный ГТД имеет два винта (например, двигатель НК-93), то установка дополнительного кластерного датчика для получения информации о координатах СТЛ второго винта позволяет оценить его тяговое усилие, а следовательно, и тягу винтовентилятора в целом.

⁵ Координата X направлена вдоль оси винта, а координата Z перпендикулярна плоскости XY и соответствует направлению вращения лопасти.

⁶ Описание "обратного" алгоритма моделирования также публикуется впервые.

Заключение

Разработаны принципы построения систем сбора и обработки измерительной информации о координатах смещений торцов лопастей винтовентиляторных ГТД, которые изложены на уровне обобщенной структурно-функциональной схемы. Рассмотрены также типовая структура технических средств и типовые алгоритмы, в том числе алгоритмы управления квазипараллельными преобразованиями и вычислениями, вычисления координат СТЛ и моделирования. Кроме того, применительно к решению задач экспериментальных исследований винтовентиляторных авиационных ГТД разработаны нетиповые алгоритмы определения координат смещений оси винта в условиях стендовых экспериментов и тяговых усилий при бортовых испытаниях.

Список литературы

1. Методы и средства измерений многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю. Н. Секисова, Скобелева О. П. Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. 188 с.
2. Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулунова В. В. Измерения и вычисление координатных составляющих многомерных перемещений торцов лопаток в процессе вращения ротора // Автометрия, 2001. № 2. С. 103—111.
3. Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Измерение составляющих многокоординатных смещений элементов конструкций силовых установок с моделированием неизмеряемых составляющих (концепция и реализующие ее методы измерения) // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 7. С. 29—35.
4. Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Методы получения информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях // Проблемы управления и моделирования в сложных системах / Труды VIII Международной конференции, Самара, Россия, 24—29 июня 2006. — Самара: Самарский научный центр РАН, 2006. С. 232—239.
5. Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Обобщенное представление методов получения измерительной информации о координатах смещений торцов лопаток и лопастей // Мехатроника, автоматизация, управление / Приложение. 2007. № 3. С. 19—24.
6. Бельный Л. Б., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Одновитковые вихретоковые датчики: от кластерных композиций к кластерным конструкциям // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. VI Междунар. конф., Самара, Россия, 14—17 июня 2004. Самара: Самарский научный центр РАД, 2004. С. 437—443.
7. Райков Б. К. Кластерный вихретоковый датчик для измерения смещений торцов лопастей винтовентилятора по трем координатам // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. VII Междунар. конф., Самара, 27 июня—01 июля 2005. С. 175—180.
8. Райков Б. К. Модульные конструкции кластерных одновитковых вихретоковых датчиков. Особенности работы при последовательном и параллельном опросе модулей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. VII Междунар. конф., Самара, 24—28 июня 2006. С. 240—245.
9. Злобин Д. П., Симонов Ю. А. Суда на воздушной подушке. Л.: Судостроение, 1971. 147 с.
10. Макливи Р. Суда на подводных крыльях и воздушной подушке. Л.: Судостроение, 1981. 208 с.
11. Боровик С. Ю., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулунова В. В. Метод измерения радиальных смещений лопастей винтовентилятора с использованием каналов физической и виртуальной коррекции // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. V Междунар. конф. Самара, 2003. С. 512—520.

12. Боровик С. Ю., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В. Способ квазипараллельных измерений и вычислений координатных составляющих многомерных перемещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. V Междунар. конф. Самара, 2003. С. 506—511.

13. Тулупова В. В. Системы измерения многокоординатных смещений торцов лопаток компрессора и лопастей винтовентилятора. Дисс. канд. техн. наук: 05.11.16. Самара, 2005. 200 с.

14. Суханова Н. Н., Суханов В. И., Юровский А. Я. Полупроводниковые термопреобразователи с расширенным диапазоном рабочих температур // Датчики и системы, 1999. № 7—8.

15. Боровик С. Ю., Райков Б. К., Тулупова В. В. Система измерения радиальных смещений торцов лопастей винтовентилятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 7. С. 35—40.

16. Боровик С. Ю., Игначков С. М., Ильинский С. А., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Тулупова В. В. Система измерения радиальных зазоров на закапотированной винтовентиляторной установке // Известия вузов. Сер. Авиационная техника. 2004. № 3. С. 77—79.

17. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 004.891:669

В. Д. Малюгин, д-р техн. наук, проф., **Е. Б. Иванов**,
Институт проблем управления РАН, Москва

Экспертная система управления технологическими процессами на примере шлакоперерабатывающей установки

Обсуждается экспертная система (тренажер) шлакоперерабатывающей установки, базирующейся на технологии имитационного моделирования, предназначенная для тренинга операторов потенциально опасного технологического объекта, а также для обучения студентов старших курсов вузов технических специальностей. Данная система позволяет исследовать объект изучения в различных режимах функционирования и отработать навыки по оптимальному и безаварийному управлению.

Разработка экспертной системы управления технологическим процессом с использованием нечеткой логики на примере автоматизации шлакоперерабатывающих процессов

Современные промышленные производства характеризуются резким ростом единичных мощностей, интенсификацией процессов. Инструментом для решения сложных задач управления, связанных с целенаправленным развитием крупномасштабных систем, служит программно-целевое управление, представляющее комплекс мероприятий (социально-экономических, производственно-технических, организационно-хозяйственных и др.), направленных на решение определенной крупной проблемы.

Моделирование процессов является мощным инструментом, позволяющим выявлять резервы повышения их эффективности, разрабатывать новые технологические режимы, прогнозировать пути развития технологий. В первую очередь, это касается

выработки навыков диагностики и предотвращения развития аварийных ситуаций, а также оперативного управления инерционными процессами [1, 2].

В настоящее время в Институте проблем управления РАН под руководством В. Д. Малюгина разрабатывается экспертная система (тренажер) мастера шлакоперерабатывающей установки (ШПУ), впервые для данного процесса. Ввиду отсутствия модели процесса грануляции шлака, а также с учетом существующих условий нечеткости работы самой установки создается система, основанная на базе нечеткой логики и искусственного интеллекта с применением технологических инструкций мастеров. Принципиальное отличие от ранее рассмотренных систем для других потенциально опасных процессов заключается в использовании "совмещенных" рулей и показателей неполадок, когда существует возможность воздействия как на входные, так и на выходные параметры работы установки.

Концепция экспертной системы ШПУ на основе нечеткой логики

При логическом моделировании любого процесса, в том числе и шлакоперерабатывающего, каждый элемент схемы модели имеет один или более входов и, по крайней мере, один выход. В логической модели процесса под элементом схемы понимается логическая таблица, входами могут являться значения переменных, характеризующих устройства, с помощью которых человек может управлять процессом (скоростью слива шлака, грануляции и др.), а выходами — значения целевых переменных. Так как цель регулирования — удержание всех наблюдаемых параметров в "норме", следовательно, выходы — значения наблюдаемых переменных. Входы и выходы различных элементов схемы соединены между собой проводниками (связями), по которым распространяются значения сигналов на входах и выходах элементов. Значения сигналов изменяются в дискретные моменты времени.

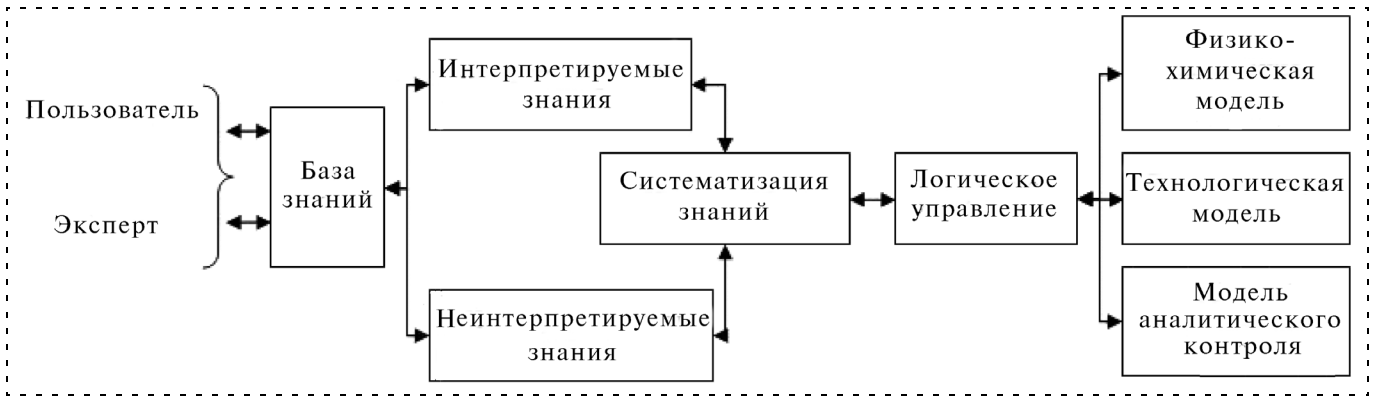


Рис. 1. Схема управления экспертной системой (тренажером) шлакоперерабатывающей установкой доменного производства

На рис. 1 представлена схема экспертной системы управления ШПУ. Знания и опыт работы, накопленные экспертом, составляют единую базу знаний, которая представляет собой набор логических значений (больше нормы ">", норма "=", меньше нормы "<"), сведенных в таблицы в качестве модулей и регуляторов (см. таблицу). Данная база подразделяется на интерпретируемую (штатные показатели работы установки) и неинтерпретируемую (предполагаемые нештатные показатели работы установки) в блоках "интерпретируемые знания" и "неинтерпретируемые знания" соответственно.

В дальнейшем данные значения подвергаются систематизации и создается логическая модель управления с последующим ее воздействием на технологическую и физико-химическую модели аналитического контроля. Моделирование нештатных ситуаций в разработанной системе достигается путем задания соответствующих значений входным переменным и настроечным коэффициентам в заданный момент времени.

Применение экспертной системы в задачах оптимизации шлакоперерабатывающего процесса

Основной задачей экспертной системы ШПУ для мастера (оператора) потенциально опасного производства является создание возможностей для изучения принципов протекания технологического процесса во всех режимах эксплуатации, распознавания нештатных ситуаций, нахождения причинно-следственных связей, принятия решений по управлению процессом. Таким образом, являются актуальными вопросы разработки компьютерных обучающих комплексов, а имитационные модели как часть такого комплекса крайне важны при разработке алгоритмов обучения, так как многие задачи обучения сводятся к исследованию поведения изучаемого объекта во времени и выбору своевременных управляющих воздействий, переводящих объект в "безопасные" состояния.

Шлакоперерабатывающий процесс как процесс управления

Работа шлакоперерабатывающего участка заключается в грануляции доменного шлака и его дальнейшей транспортировке на цементные заводы. Расплавленный шлак сливается в желоб, в зону подачи воды высокого давления. Шлаковые ковши партиями подают к гранустановкам не позднее чем через один час после наполнения. Напротив приемных ванн устанавливаются и в дальнейшем подключаются кантовальные механизмы. Для грануляции используют воду после биохимической установки коксохимического производства и техническую воду. Давление воды должно быть не менее 5 атм (0,5 МПа), объемный расход 2...4 м³ на тонну расплава. Скорость слива шлака регулируют, не допуская появления расплава на выходе из желоба (3...4 т/мин) [3].

Система управления ШПУ написана на языке программирования *Delphi*. Интерфейс модели состоит из динамического протокола с "совмещенными" рулями и показателями неполадок: температурой окружающей среды, углом наклона ковша, давле-

Логический модуль № 1 обработки данных штатного режима работы шлакоперерабатывающей установки

Помехи/Рули (Входы)															
1.	<i>Ts</i>	=	<	>	<	<	=	=	=	<	<	>	>	<	>
2.	<i>U</i>	=	<	>	<	=	<	=	<	=	>	<	>	>	<
3.	<i>Ph</i>	=	<	>	=	<	<	<	=	=	>	>	<	<	<
Наблюдаемые параметры (Выходы)															
4.	<i>V</i>	=	<	>	>	<	<	=	<	<	>	<	>	>	<
5.	<i>TS</i>	=	>	<	<	>	>	=	>	>	<	>	<	<	>
6.	<i>Pr</i>	=	<	>	<	<	<	=	<	>	>	<	>	<	<
7.	<i>ST</i>	=	<	>	<	<	<	=	<	<	<	<	<	<	<
8.	<i>P</i>	=	<	>	<	<	<	=	<	<	<	<	<	<	<

Примечание. *V* — скорость слива шлака, *TS* — время слива шлака; *Pr* — парообразование; *ST* — степень грануляции; *P* — производительность; *Ts* — температура окружающей среды; *U* — угол наклона ковша; *Ph* — давление воды.

нием воды. К наблюдаемым параметрам относятся скорость и время слива шлака, парообразование, грануляция и производительность. Графический протокол представляет работу данной установки. На рис. 2 рассмотрен вариант работы ШПУ при повышенном угле наклона ковша и низком давлении воды. В связи с этим парообразование, скорость и время слива шлака имеют значения ниже нормы, а степень грануляции и производительность — выше нормы. При включении автоматического управления (режим "автомат") тренажер выводит печь на нормальный режим работы за два такта (итерацию) по времени, что существенно сокращает время для принятия мастером правильного решения и вывода установки на безопасный режим работы.

Особенностью работы тренажера является использование технологической модели, которая учитывает технические параметры работы установки. В данной модели учитываются основные значения

переработки шлака, которые обсуждались с экспертами и мастерами шлакоперерабатывающих участков.

Коэффициент качества гранулированного шлака определяют по формуле [3]

$$K = \frac{k_{CaO} + k_{Al_2O_3} + k_{MgO}}{k_{SiO_2} + k_{TiO_2}},$$

где k_{CaO} , $k_{Al_2O_3}$, k_{MgO} , k_{SiO_2} , k_{TiO_2} — массовые доли оксидов Ca, Al, Mg, Si, Ti соответственно, %.

Годовая производительность гранустановки ($Q_{гр}$) определяется по формуле [4]

$$Q_{гр} = P_{шл} \gamma_{о.к} \gamma_{п} \text{ (тыс. т/год)},$$

где $P_{шл}$ — расчетное количество шлака, поступающее в ковшах на установку (тыс. т/год); $\gamma_{о.к}$ — коэффициент опорожнения ковша; $\gamma_{п}$ — коэффициент, учитывающий безвозвратные технологические потери шлака.

Годовое количество шлакового расплава, теряемого в виде ковшевых остатков (скардовин), после слива жидкого шлака на установку грануляции определяется по формуле [4]

$$P_{с.к} = P_{шл}(1 - \gamma_{о.к}) \text{ (тыс. т/год)}.$$

Разрабатываемая в настоящее время физико-химическая модель ШПУ представляет собой систему химических реакций, способствующих более точному соблюдению режима технологического процесса [5].

Конечной, контрольной точкой для получения качественной продукции является модель аналитического контроля. Данный метод основан на том, что рентгеновское излучение дифрактометра, воздействуя на доменный шлак и взаимодействуя с кристаллическими веществами, дает специфические дифракционные картины, обусловленные особенностями атомного строения этих веществ. Относительная интенсивность интерференционных линий, обусловленных некоторой фазой, связана с содержанием этой фазы в пробе.

Рентгеновский фазовый анализ шлака проводился на дифрактометре Philips PW-1710 (рис. 3). Съемка осуществлялась на $Cu\ \alpha$ -излучении с использованием никелевого фильтра. Расшифровка полученной рентгеновской дифрактограммы велась с помощью автоматизированной системы фазового анализа Рапид. Анализ показал,

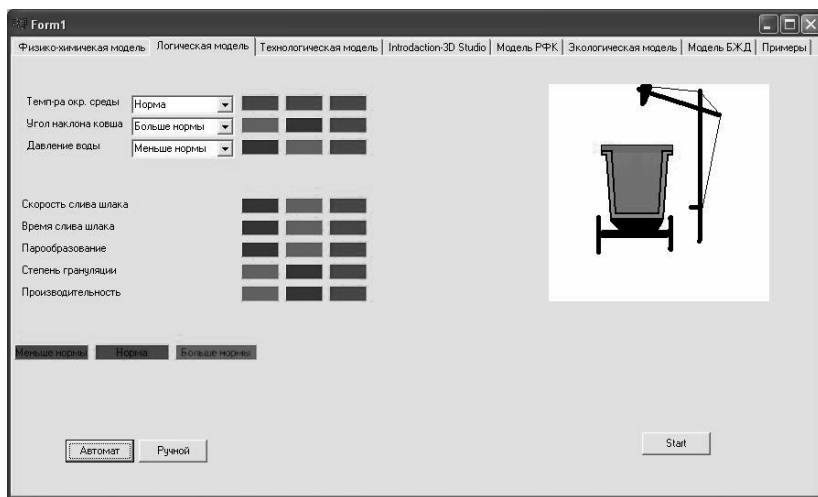


Рис. 2. Интерфейс модели шлакоперерабатывающего участка доменного цеха

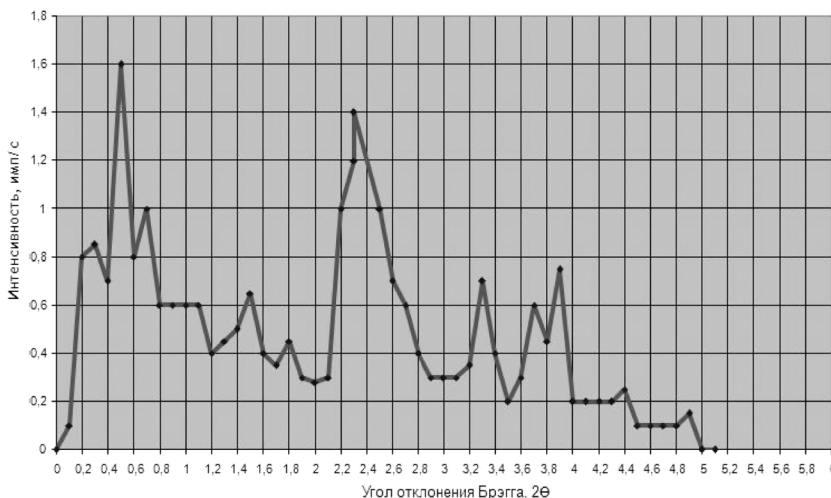


Рис. 3. Рентгенофазовый анализ шлака доменной печи

что основными фазовыми составляющими шлака является алюмосодержащий аугит $\text{Ca}(\text{MgAlFe})\text{Si}_2\text{O}_6$ и силикат кальция Ca_2SiO_5 [6]. Вывод сделан на основании хорошего совпадения рефлексов экспериментальной дифрактограммы и соответствующих табличных данных из картотеки ASTM (американского общества стандартов и материалов).

В перспективе за счет усовершенствования данной системы, планируется создание универсальной экспертной системы (тренажера) высокотемпературных объектов на базе уже существующей системы доменной печи с дополнением новых моделей туннельной печи для обжига высококачественных огнеупоров и шлакоперерабатывающей установки для безотходного производства чугуна и получения строительного щебня из доменного шлака.

Список литературы

1. Чистов В. П. и др. Разработка экспертной системы на основе логического интеллекта для управления доменной печью // Наука и инженерное творчество — 21 веку. 1995. С. 89—92.
2. Беттингер Д. и др. Управление работой доменной печи с помощью экспертной системы — следующий этап развития // Steel Times International. 2005. № 15. С. 10—18.
3. Технологическая инструкция ОАО "Уральская Сталь". "Переработка доменного шлака". Новотроицк, 2004. 12 с.
4. Жеребин Б. Н., Пареньков А. Е., Пыриков А. Н. Конструкция и оборудование доменных печей и цехов // Уч. пособ. (№ 1250) для практических занятий для студентов специальности 0401. Под ред. профессора Е. Ф. Вегмана. М.: МИСиС, 1987, 111 с.
5. Падерин С. Н., Филиппов В. В. Теория и расчеты металлургических систем. М.: МИСИС, 2002. 334 с.
6. Карпов Ю. А., Гиммельфарб Ф. А., Савостин А. П., Сальников В. Д. Аналитический контроль металлургического производства. М.: Металлургия, 1995. 400 с.

УДК 621.3.088:62-5:620.178.12/.15

А. А. Бондарчук,

М. Г. Матвеев, д-р техн. наук, проф.,

Воронежская государственная технологическая академия

Анализ моделей управления твердостью стали в процессе плавки

Рассматривается задача управления твердостью стали в процессе ее выплавки. Анализируются модели и методы выбора необходимого химического состава стали на основе регрессионной зависимости твердости от химического состава стали.

Одной из актуальных задач АСУТП в металлургии является управление прокаливаемостью стали путем выбора в процессе плавки необходимого состава и концентраций химических компонентов $x = (x_1, \dots, x_n)$. Прокаливаемость рассматривается как твердость стали, распределенная по глубине h от поверхности [1]. Для m дискретных значений глубины распределенная твердость представляется вектором $y = (y_1, \dots, y_m)$, где индексы упорядочены от поверхности к глубине металла.

Индивидуальная заказная спецификация плавки содержит требования к твердости стали в виде системы ограничений

$$\bar{y}^{\min} \leq \bar{y} \leq \bar{y}^{\max} \tag{1}$$

и ограничений на допустимое изменение концентраций химических компонентов

$$\bar{x}^{\min} \leq \bar{x} \leq \bar{x}^{\max} \tag{2}$$

Распространенным подходом к построению модели зависимости твердости от химического состава является регрессионный анализ, в рамках которого строятся линейные модели вида

$$\bar{y} = A\bar{x} + \bar{a}_0 \tag{3}$$

Если модель (3) адекватна, т. е. обеспечивает достаточно надежный прогноз распределения твердости \bar{y} при заданных значениях вектора \bar{x} , то возможны два способа решения обратной задачи — выбора вектора \bar{x} при заданных значениях \bar{y} , которыми могут быть середины промежутков (1). Первый способ заключается в прямом решении системы (3):

$$\bar{x} = A^{-1}(\bar{y} - \bar{a}_0), \tag{4}$$

при условии существования обратной матрицы A^{-1} , по крайней мере, при выполнении условия $n = m$. Последнее условие можно обеспечить практически всегда, изменяя число m дискретных точек измерения твердости. Второй способ основывается на постановке и решении соответствующей задачи оптимизации. Содержательный смысл задачи оптимального выбора допускает, например, следующие оптимальные постановки:

- минимизация стоимости химических компонентов, добавляемых при плавке стали;
- максимизация надежности попадания решения в допустимый спецификацией диапазон изменения твердости.

Задача настоящего исследования заключается в анализе моделей выбора концентраций химических компонентов по заданным значениям распределенной твердости стали.

На первый взгляд, при выполнении необходимых условий прямое решение системы (3) требует минимума вычислительных затрат и обеспечивает необходимую единственность решения. Однако следует учитывать, что обращение матрицы $A = \|a_{ij}\|$, состоящей из случайных несмещенных оценок a_{ij} параметров модели, приводит к смещенным оценкам \bar{x} в выражении (4). Этот факт был опубликован в [2] еще в конце 60-х годов прошлого века, но не всегда учитывался в практических приложениях. Игнорирование смещения основывалось на предположении о его несущественности. В то же время в ряде случаев смещение может оказывать существенное влияние на результат.

Применительно к рассматриваемой задаче предлагается следующая методика оценки возможности учета или игнорирования смещения в решении (4). Пусть модель (3), полученная как система регрессионных зависимостей, адекватна в некоторой области D_x изменения значений концентраций химических компонентов \bar{x} . Область D_x имеет вид

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, \forall i.$$

Линейный вид модели (3) позволяет построить область D_y изменения значений твердости \bar{y} , соответствующую области D_x . Действительно, границы области D_y (y_j^{\min} и $y_j^{\max}, \forall j$) будут определяться по следующему простому правилу:

$$y_j^{\min} = y_j(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n); \tag{5}$$

$$\tilde{x}_i = \begin{cases} x_i^{\min}, & \text{если } a_{ij} > 0; \\ x_i^{\max}, & \text{если } a_{ij} < 0; \end{cases}$$

$$y_j^{\max} = y_j(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n); \tag{6}$$

$$\hat{x}_i = \begin{cases} x_i^{\max}, & \text{если } a_{ij} > 0; \\ x_i^{\min}, & \text{если } a_{ij} < 0. \end{cases}$$

Необходимое условие игнорирования смещения формулируется следующим образом: если для любого заданного вектора $\bar{y} \in D_y$ решение (4) будет принадлежать D_x , т. е. $\bar{x}(\bar{y}) \in D_x$, то, в принципе, смещением оценок в решении (4) можно пренебречь. Иначе смещение будет оказывать существенное влияние на результат выбора, так как модель (3) будет уже не адекватной. Достаточные условия игнорирования смещения могут формулироваться исходя из требований по точности получения решения.

В качестве иллюстрации применения предложенной методики оценки значимости смещения рассмотрим следующий пример. По промышленным статистическим данным процесса выплавки стали марки 16MnCr5 построена регрессионная мо-

дель вида (3). Химический состав этой стали включает девять основных химических компонентов (углерод, кремний, марганец, фосфор, медь, хром, молибден, никель и азот), и твердость определяется в девяти последовательных точках от поверхности металла. Здесь матрица A — это квадратная матрица размерностью 9×9 ($m = n$) вида

$$\begin{pmatrix} 60,38 & 2,43 & 3,14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 65,02 & 2,35 & 4,15 & 0 & 3,38 & 0 & 0 & -3,39 & 0 \\ 96,40 & 4,73 & 9,28 & 0 & 7,03 & 8,18 & 0 & 0 & -194,23 \\ 117,94 & 7,98 & 13,17 & 0 & 10,55 & 13,47 & 16,21 & 0 & -251,11 \\ 111,04 & 9,56 & 14,90 & 0 & 10,46 & 13,58 & 0 & 6,33 & -258,53 \\ 104,87 & 8,37 & 13,81 & 0 & 9,19 & 13,97 & 0 & 8,45 & -205,32 \\ 106,40 & 10,54 & 14,34 & 0 & 8,53 & 13,43 & 0 & 11,16 & -170,83 \\ 104,72 & 9,39 & 13,69 & 48,70 & 8,29 & 13,91 & 0 & 11,88 & -142,09 \\ 112,20 & 10,46 & 14,00 & 50,94 & 7,34 & 14,38 & 17,75 & 11,21 & -115,28 \end{pmatrix}.$$

Определитель этой матрицы равен $-2,7 \times 10^8$, т. е. существенно отличен от нуля, а следовательно, решение (4) существует.

Вектор \bar{a}_0^T имеет вид:

$$(29,27; 26,36; 3,64; -15,89; -20,33; -21,05; -24,20; -25,65; -31,20).$$

Ограничения (2) и (5), (6) представлены в таблице.

Модель адекватна в пределах указанных ограничений.

Пусть химический состав характеризуется вектором $\bar{x}^T = (0,18; 0,04; 0,9; 0,02; 0,1; 1,0; 0,03; 0,3; 0,017)$, $\bar{x} \in D_x$. Регрессионная модель дает вполне адекватный вектор распределенной твердости $\bar{y} = (43,1; 41,2; 35,1; 28,3; 25,6; 24,5; 23,0; 22,8; 20,1)$, $\bar{y} \in D_y$.

Пусть полученную твердость необходимо повысить до следующих средних значений: $\bar{y}^* = (45; 43; 40; 35; 33; 31; 30; 28; 26)$, $\bar{y}^* \in D_y$, изменяя вектор химического состава. Решение этой задачи с помощью обращения матрицы A приводит к следующему результату: $\bar{x}^* = (0,213; 0,042; 0,889; -0,003; 0,405; 0,514; 0,13; 0,69; -0,002)$. Сравнивая этот результат с ограничениями, приведенными в первых двух строчках таблицы, можно заметить, что за счет смещения оценок нарушены ограничения в 3-, 4-, 5-, 6-, 7-, 8- и 9-м столбцах таблицы, более того значения x_4 и x_9 отрицательны, что не соответствует физическому смыслу концентрации. Другими словами, полученные значения химического состава не принадлежат допустимой области D_x . Несмотря на то, что полученная по модели при найденных значениях \bar{x}^* твердость вполне удовлетворяет заданным значениям (попадает в заданную допустимую

x^{\min}	0,13	0,02	0,80	0,006	0,04	0,82	0,01	0,10	0,015
x^{\max}	0,22	0,32	1,10	0,030	0,31	1,20	0,09	0,40	0,020
y^{\min}	39,38	37,98	26,79	16,75	13,23	12,36	10,37	9,48	6,18
y^{\max}	46,79	45,67	45,65	44,22	41,74	39,80	39,02	38,80	37,64

область значений свойств: $\bar{y}(\bar{x}^*) = (45,024; 43,027; 40,035; 35,045; 33,034; 31,031; 30,03; 28,029; 26,038)$, этим результатам доверять нельзя из-за нарушений границ области адекватности модели.

Анализ регрессионных моделей вида (3), полученных для различных видов стали, по предложенной методике показал, что практически во всех случаях смещение оценок вектора химического состава существенно и приводит к потере адекватности решения (4).

В таких случаях целесообразно формулировать и решать задачу оптимизации. Рассмотрим эту задачу на примере достижения максимальной надежности попадания твердости выплавляемой стали $\bar{y}(\bar{x}^*)$ в заданный заказной спецификацией диапазон (1). При этом должны выполняться ограничения (2) на изменения концентрации химических компонентов, также заданные заказной спецификацией.

Для получения формализации критерия оптимизации рассмотрим сначала j -е регрессионное уравнение модели (3). Будем интерпретировать заданное значение y_j^* как условную выборочную среднюю $y_j^* = M(y_j/\bar{x}^*)$ регрессионного уравнения $y_j = y_j^* + \epsilon_j$, где ϵ_j — случайные остатки. В соответствии с задачей оптимального управления необходимо найти такие значения \bar{x}^* , которые при установке на реальном объекте обеспечили бы попадание твердости $y_j(\bar{x}^*)$ в каждой заданной точке h_j в некоторый допустимый интервал вокруг y_j^* с максимальной надежностью. С одной стороны, допустимый интервал определяется индивидуальной заказной спецификацией плавки стали в виде неравенства $y_j^* - \delta_j \leq y_j(\bar{x}^*) \leq y_j^* + \delta_j$, где δ_j — допустимое отклонение твердости от центра интервала (1). С другой стороны, для y_j^* можно рассчитать доверительный интервал в виде неравенства $y_j^* - t_{1-\alpha,k} S(y_j^*) \leq y_j(\bar{x}^*) \leq y_j^* + t_{1-\alpha,k} S(y_j^*)$, где $t_{1-\alpha,k}$ — статистика Стьюдента; $S(y_j^*)$ — стандартная ошибка прогноза твердости, вычисляемая при конкретных значениях вектора $\bar{x} = \bar{x}^*$. Сравнение двух полученных неравенств показывает, что для успешного решения задачи необходимо выполнение неравенства

$$t_{1-\alpha,k} S(y_j^*) \leq \delta_j. \quad (7)$$

Отсюда следует, что при заданной доверительной вероятности надежность успешного решения задачи определяется стандартной ошибкой прогноза твердости. Для того чтобы надежность попадания твердости в заданный диапазон была максимальной, желательно выбирать такие \bar{x}^* , при ко-

торых стандартная ошибка $S(y_j^*)$ была бы минимальной. Этому желанию соответствует критерий оптимальности вида

$$S^2(y_j^*) = \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^n S_{ki}^2 x_i x_k = \bar{x}^T K_j \bar{x} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где S_{ki}^2 — оценки моментов связи (при $k = i$ — оценки дисперсии) случайных параметров модели; K_j — ковариационная матрица размерности $(n + 1) \times (n + 1)$. Очевидно, что критерии вида (8) должны быть записаны для каждого индекса j , т. е. для каждой точки измерения твердости, описываемой j -м уравнением системы (3). Совокупность критериев можно представить в виде взвешенной аддитивной свертки

$$I(\bar{x}) = \sum_{j=1}^m v_j S^2(y_j^*) = \sum_{j=1}^m v_j \bar{x}^T K_j \bar{x} \rightarrow \min, \quad (9)$$

где v_j — весовой коэффициент, учитывающий требования по точности достижения заданных значений твердости в каждой точке ее измерения.

Окончательная модель задачи оптимизации принимает вид

$$\begin{cases} I(\bar{x}) = \sum_{j=1}^m v_j S^2(y_j^*) = \sum_{j=1}^m v_j \bar{x}^T K_j \bar{x} \rightarrow \min; \\ \bar{y}_{\min}^* \leq A\bar{x} + \bar{a}_0 \leq \bar{y}_{\max}^*; \\ \bar{x}_{\min} \leq \bar{x} \leq \bar{x}_{\max}. \end{cases} \quad (10)$$

Следует отметить, что задача (10) относится к классу задач квадратичного программирования. Для существования и единственности оптимального решения необходимо, чтобы матрицы K_j были симметричными и положительно определенными. Симметричность этих матриц обеспечивается по определению, а положительная определенность легко проверяется. Заметим также, что рассматриваемая задача обеспечивает решение для любого соотношения n и m , а также учитывает стохастический характер параметров регрессионных уравнений. Решение находится любым поисковым методом без использования операции обращения матрицы. Это означает, что получаемые решения \bar{x}^* можно рассматривать как несмещенные оценки.

Вернемся к рассмотренному примеру с обеспечением заданной твердости стали выбором ее химического состава. Пусть требуется достичь той же распределенной твердости $\bar{y}^* = (45; 43; 40; 35; 33; 31; 30; 28; 26)$ с погрешностью $\delta = 1$. Будем решать эту задачу как задачу квадратичного программирования, используя модель и ограничения предыдущего примера. Решение, найденное в среде MathCAD 2001, будет иметь вид $\bar{x}^* = (0,22; 0,02; 1,00; 0,006; 0,04; 1,08; 0,01; 0,279; 0,015)$. Соответствующий решению вектор твердости, прогнозные оценки которого рас-

считаны по модели, имеет вид $\bar{y}(\bar{x}^*) = (45,7; 44,0; 40,4; 34,8; 32,2; 30,7; 29,2; 28,1; 25,4)$. Найденное решение удовлетворяет требованиям к управлению и соответствует области адекватности модели, что позволяет доверять получаемым оценкам твердости с точки зрения их воспроизводимости в реальном процессе.

Проведенный анализ моделей выбора позволяет сделать вывод о целесообразности использования

моделей оптимального выбора при автоматизации управления распределенной твердостью стали в процессе ее выплавки.

Список литературы

1. **Малинкина Е. Н., Ломакин В. Н.** Прокаливаемость стали. М.: Машиностроение, 1989. 179 с.
2. **Айвазян С. А.** Статистические исследования зависимостей. М.: Metallurgia, 1968. 196 с.

УДК 621.9.079:62-1/-9

А. В. Атланов,
МГТУ "Станкин"

Оценивание эксплуатационных характеристик смазочно-охлаждающей жидкости в ходе технологического процесса

Предложен метод оценивания качества СОЖ в реальном масштабе времени и проведено имитационное моделирование системы оценивания.

Введение

Качество смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), применяемой при металлообработке, является решающим показателем для принятия решения о замене жидкости и направлении ее на участок утилизации. Оценивание качества СОЖ в реальном масштабе времени затруднено из-за множества

Таблица 1

№ п/п	Описание показателя
1	Запах (специфический, гнилостный и т. д.) характеризует наличие нежелательных примесей, бактерий или грибковое поражение технологической среды
2	Содержание концентрата СОЖ в рабочем растворе или эмульсии, выраженное в процентах: при заниженной величине возможна коррозия металла в СОЖ; завышенная концентрация может привести к раздражению кожи работающих и перерасходу СОЖ
3	Инородное масло (% об.): при содержании инородного масла более 2 % может увеличиться микробопоражаемость, понизиться рН и появиться коррозия металла. Характеризует экономичность применения СОЖ на оборудовании с большой утечкой гидравлических масел
4	Механические примеси (% мас.) характеризуют попадание в СОЖ отходов металлообработки, которые могут взаимодействовать с активными компонентами СОЖ и влиять на технологические показатели качества обработки (чистота, шероховатость и т. д.)
5	Коррозионная активность характеризует степень коррозии оборудования и обрабатываемого металла под воздействием СОЖ

факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики жидкости, Эти факторы воздействуют с разной интенсивностью, их оценивание происходит в условиях действия комплекса неконтролируемых воздействий на результаты измерений и для некоторых факторов (например, цвета и запаха СОЖ) носит субъективный характер.

На сегодняшний день отсутствуют методы расчета по каким-либо теоретическим зависимостям уровня качества СОЖ. Под уровнем качества имеется в виду значение интегрального показателя качества, которое отражает влияние отдельных эксплуатационных параметров СОЖ на степень пригодности жидкости.

Существуют разные методики определения различных показателей качества СОЖ в процессе эксплуатации [1, 2]. Возможный вариант списка показателей эффективности и качества СОЖ приведен в табл. 1.

К указанному в табл. 1 можно прибавить влияние СОЖ на лакокрасочное покрытие станков, на уплотнительные резиновые детали (эти показатели определяют после 30 суток воздействия СОЖ).

Сложный характер процесса изменения уровня качества СОЖ, неоднозначность и неполнота исходных данных служат аргументами в пользу оценивания качества СОЖ на основе нечеткой логики и (или) аппарата нейронных сетей. Подход базируется на хорошо известных аппроксимирующих свойствах этих методов [3].

Постановка задачи оценивания качества СОЖ

Рассмотрим уровень качества СОЖ как выход некоторой системы, на входе которой действуют факторы влияния на качество жидкости, составляющие вектор входов u . Состояние системы в дискретном времени описывается следующим образом:

$$Q_i = K(u_i, r_i), \tag{1}$$

где $i = 1, 2, \dots$; $Q_i \in \mathbb{R}^n$ — в общем случае вектор состояния системы; $r_i \in \mathbb{R}^s$ — вектор случайных шумов состояния.

Вектор состояния наблюдается с помощью измерения, подверженного воздействию шума:

$$y_i = K_1(Q_i) + s_i, \quad (2)$$

где $y_i \in \mathbb{R}^q$ — вектор выхода системы — вектор наблюдений; $s_i \in \mathbb{R}^m$ — вектор случайных шумов измерения.

В уравнениях (1), (2) $K(u_i, r_i)$ и $K_1(Q_i)$ — n - и q -мерные, в общем случае нелинейные относительно своих аргументов вектор-функции. Случайные векторы Q_0, u_0, r_i, s_i определены на соответствующих вероятностных пространствах. Уравнения (1)–(2) полностью описывают динамику системы.

В процессе эксплуатации СОЖ получают данные измерения только векторов u_i и y_i , т. е. может быть синтезирована лишь упрощенная модель

$$y = F(u), \quad (3)$$

позволяющая оценить качество жидкости на основании неполной информации.

Применение аппарата нейронечетких сетей

Нелинейная функция (3) аппроксимируется адаптивной нейронечеткой сетью ANFIS [3].

В качестве входных параметров системы нечеткого вывода для оценивания качества СОЖ приняты три нечеткие лингвистические переменные: "зараженность бактериями" (V_1), "механические примеси" (V_2) и "коррозионная активность" (V_3). Термножества, соответствующие переменным, приведены в табл. 2.

Выбор только трех термов для описания параметров качества вызван тем, что они, безусловно, наиболее значимы. Кроме того, если созданная аппроксимирующая модель не сможет оценить какой-то уровень качества СОЖ, число термов для параметров вектора u и, соответственно, число правил в базе знаний могут быть увеличены.

Имитационные модели выделенных эксплуатационных параметров СОЖ позволили сформировать объем "фактических" данных, достаточных для формирования обучающего, тестового и контрольного множеств данных, необходимых для идентификации нейронечеткой модели уровня качества СОЖ.

При настройке реальной системы оценивания качества СОЖ используются данные измерения параметров качества. Особенность состоит в том, что отдельные измерения поступают в систему с раз-

ной периодичностью. В произвольный момент времени некоторые компоненты вектора наблюдений могут быть еще не определены, т. е. в канале наблюдений присутствует запаздывание. Для его компенсации предложено применение процедуры рекуррентного оценивания данных измерения в момент окончания очередного цикла измерения и прогнозирования оценки на момент окончания следующего цикла:

$$\hat{u}_{k+1} = au_k + \gamma(u_k - \hat{u}_k), \quad a < 1, \quad a = \text{const}, \quad (4)$$

где u_k, \hat{u}_k — измеренное и прогнозируемое значения параметра на момент окончания k -го цикла измерений. Значение параметра качества в произвольный момент времени t находится по формуле

$$u_t = u_k + (\hat{u}_{k+1} - u_k) \frac{(t - t_k)}{(t_{k+1} - t_k)}, \quad (5)$$

т. е. выполняется кусочно-линейная аппроксимация функции изменения любого из параметров качества.

Применение описанной процедуры позволило минимизировать требования к имитационным моделям эксплуатационных параметров: модели должны быть непрерывными функциями времени в рассматриваемом интервале и качественно отражать изменение соответствующих параметров во времени. Например, данные по коррозионной активности имитировали следующей зависимостью:

$$y(t) = a_0 + a_1 \sin(a_2 t) + a_3(1 - e^{-a_4 t}) + r(t), \quad (6)$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3 = \text{const}$.

Данные, полученные по имитационной модели объекта, для моделирования неконтролируемых воздействий на свойства СОЖ просуммированы с отдельными значениями нормированной случайной последовательности $r(t)$, эти значения распределены по нормальному закону.

В качестве функции принадлежности отдельных входов соответствующим термам системы нечеткого вывода принята функция

$$\mu(u) = \frac{1}{1 + e^{-a_1(x - c_1)}} \frac{1}{1 + e^{-a_2(x - c_2)}}. \quad (7)$$

Нечеткая база знаний построена с помощью экспертов по методу Сугено [3] и состоит из 27 правил, представленных в табл. 3.

Приведенная выше база знаний может рассматриваться как некоторое разбиение влияющих факторов на нечеткие подобласти, в каждой из которых выход рассчитывается как линейная комбинация входов со своими параметрами. Так как границы подобластей размытые, то одновременно выполняются расчеты по нескольким линейным зависимо-

Таблица 2

Переменная	Терм-множество
V_1	$T_1 = \{\text{«низкая»}, \text{«средняя»}, \text{«высокая»}\}$
V_2	$T_2 = \{\text{«низкая»}, \text{«средняя»}, \text{«высокая»}\}$
V_3	$T_3 = \{\text{«низкая»}, \text{«средняя»}, \text{«высокая»}\}$

Таблица 3

Правило	Переменная			P
	V ₁ (зараж.)	V ₂ (мех. прим.)	V ₃ (корр. активн.)	
1	"Низкая"	"Низкая"	"Низкая"	F ₁
2	"Низкая"	"Низкая"	"Средняя"	F ₂
....
26	"Высокая"	"Высокая"	"Средняя"	F ₂₆
27	"Высокая"	"Высокая"	"Высокая"	F ₂₇

$F_i = k_0^i + k_1^i V_1 + k_2^i V_2 + k_3^i V_3$, i — номер правила

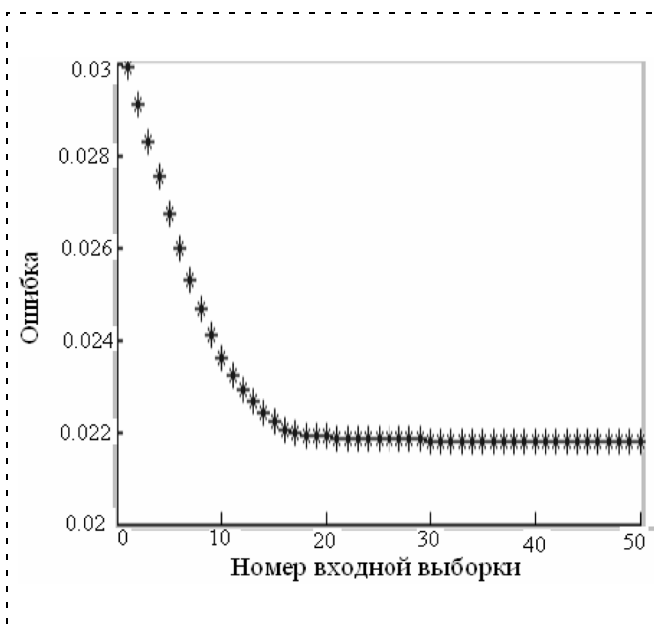


Рис. 1. Зависимость ошибки аппроксимации от числа циклов обучения

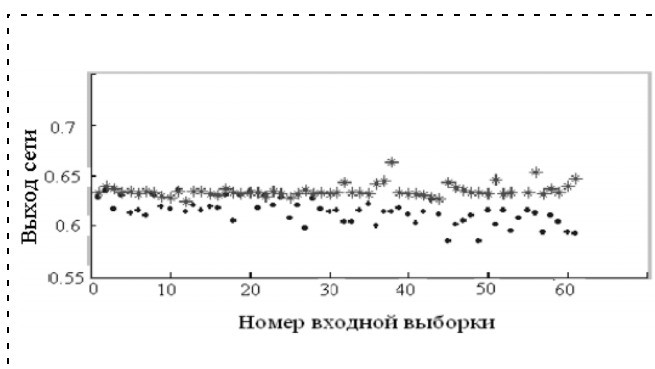


Рис. 2. Результаты проверки оценки качества СОЖ (●) на тестовом множестве (*)

стям, но с различными весами. Результирующее значение выхода — прогнозируемое значение уровня качества СОЖ P — определяется как взвешенное среднее:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i F_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}, \quad (8)$$

где n — число правил в базе; α_i — вес i -го правила:

$$\alpha_i = \min\{V_1(X_1), V_2(X_2), V_3(X_3)\}, \quad (9)$$

где в фигурных скобках — значения функции принадлежности входных данных соответствующим нечетким множествам для i -го правила. Таким образом, вес отдельного правила для конкретных значений входных переменных — результат операции пересечения над нечеткими множествами, входящими в систему нечеткого вывода (табл. 3).

Результаты настройки системы оценивания

Результат обучения представлен в виде зависимости ошибки идентификации от числа циклов обучения (рис. 1), результат проверки на тестовом множестве представлен на рис. 2. Следует отметить, что все данные тестового множества выходят за диапазон данных обучающего множества и, тем не менее, среднеквадратическая ошибка нейронечеткой модели на проверочном множестве составила около 4 %.

Найденные структура и параметры нейронечеткой сети идентифицируют вектор-функцию $F(\cdot)$ в (3), обеспечивая тем самым оценивание уровня качества СОЖ в произвольный момент времени.

Заключение

1. Предложен метод оценки качества смазочно-охлаждающей жидкости в реальном масштабе времени, основанный на построении аппроксимирующей модели в виде адаптивной нейронечеткой сети.
2. Предложенный метод может быть применен в промышленном производстве, например на участках шлифования, для принятия решений о сливе и замене смазочно-охлаждающей жидкости.

Список литературы

1. Горшков Г. М. Повышение эффективности операций шлифования путем совершенствования методов и средств приготовления СОЖ. Автореферат диссерт. на соискан. ученой степени к. т. н., Рыбинск, 1993.
2. Смирнов Д. Н., Генкин В. Е. Очистка сточных вод в процессах обработки металлов. М.: Металлургия, 1989.
3. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy-TECH. СПб: БХВ, 2003.

УДК 796.022+615.47:616-085

В. В. Морозов, д-р техн. наук, проф.,

А. В. Жданов, канд. техн. наук, доц.,

А. Б. Костерин,

Владимирский государственный университет

Биомеханические тренажеры на базе мехатронных модулей для разработки посттравматических контрактур

Обсуждаются результаты работы по созданию системы автономных биомеханических тренажеров (БМТ) для разработки посттравматических контрактур суставов верхних и нижних конечностей. Применение БМТ показано для уменьшения и исключения болевых ощущений путем более точного совмещения оси тренажера с осью естественного сустава.

Введение. Различают пассивные контрактуры, при которых подвижность сустава нарушена из-за механического препятствия движению, и неврогенные контрактуры, возникшие вследствие заболеваний нервной системы с расстройством функции конечностей. При пассивных контрактурах механическое препятствие движения сустава может зависеть от патологических изменений в самом суставе (артрогенные контрактуры) либо от патологических изменений тканей, находящихся вблизи сустава. Артрогенные контрактуры возникают после травматических повреждений суставов, вследствие неправильного их лечения (длительной иммобилизации сустава, неустраненных вывихов, переломовывихов), заболеваний суставов или заболеваний нервной системы с нарушением функции конечности. В патогенезе артрогенных контрактур большое значение имеет болевой синдром, рефлекторно приводящий к нарушению трофики во всей конечности [1, 2].

Наиболее перспективным способом лечения крупных суставов является аппаратная коррекция движений, выполняемая на специальных тренажерах путем создания адекватных пассивных и активных нагрузок. Отсутствие надежных биомеханических тренажеров для разработки контрактур сдерживает развитие этого метода лечения, так как существующие стационарные аппараты являются неудобными и недопустимыми для применения.

Требования к системе биомеханических тренажеров. К построению этой группы ортопедических

аппаратов предъявляются следующие биомеханические требования [3]:

- передающие нагрузку части аппарата (шины, шарниры) должны обладать достаточной прочностью и жесткостью, чтобы воспринимать возникающие силы сжатия, растяжения, изгиба и кручения, не выходя за пределы допустимых напряжений;
- прочность и жесткость несущих элементов аппарата должна сочетаться с минимальной его массой (особенно его дистальной части);
- надеваемые на отдельные сегменты конечности гильзы должны обеспечивать оптимальное прилегание к соответствующему отделу конечности;
- шарниры аппарата должны устанавливаться соосно с одноименными суставами пораженной конечности; локтевые шарниры — на оси, проходящей через центр наружного надмыщелка плеча; лучезапястные шарниры — на уровне вершин шиловидных отростков лучевой и локтевой костей и т. д.;
- аппарат не должен препятствовать движениям здоровых суставов.

Описание устройства биомеханического тренажера. Система биомеханических тренажеров обеспечивает пассивные движения в суставах при консервативных методах лечения посттравматических контрактур крупных суставов (локтевого, голеностопного, коленного и тазобедренного). Каждый тренажер снабжен рычажным каркасом, переносной цифровой системой управления, позволяющей осуществлять регулирование скорости и режимов движения тренажера в широком диапазоне скоростей при различных режимах движения, герметичным электромеханическим приводом, обеспечивающим плавные движения в суставах, и переносным источником питания [4].

Герметичный мехатронный модуль осуществляет движение тренажера от переносной системы управления. Особенностью модульной конструкции является совмещение вентильного двигателя постоянного тока и встраиваемого планетарного зубчатого-винтового механизма (ПЗВМ).

Планетарные механизмы включают в себя многоступенчатые планетарные редукторы типа ЗК, элементы редукторов выполняются винтовыми. Особенностью предлагаемого планетарного редуктора является использование винтовых зубчатых колес с большими углами подъема (до 86°). Такое исполнение позволяет достичь ряда преимуществ по сравнению с прямозубыми планетарными редукто-

рами: подбором углов наклона звеньев можно увеличить плавность работы передачи; понизить шумность и виброактивность; увеличить нагрузочную способность передачи в осевом направлении. Для всех модификаций разработаны необходимые расчетные зависимости и подготовлены материалы для их патентования [5–9]. Разработанные планетарные редукторы отличаются от многоступенчатых передач большими передаточными числами (в редукторе типа ЗК передаточное отношение $u = 300...500$ обеспечивается в одной ступени); высокой нагрузочной способностью благодаря внутреннему сопряжению зубьев; меньшими массой (примерно в 2...4 раза) и габаритными размерами; высоким КПД (0,8...0,97).

Выходное звено привода БМТ должно совершать вращательное движение со следующими параметрами: амплитуда сгибания — 130° ; время сгибания — 0,5...2,0 с; масса нагрузки на плече 300 мм — 1,5 кг для детского исполнения и 2,5 кг — для взрослого. В таблице приведены результаты расчета допустимых передаточных отношений модулей БМТ, полученные исходя из анализа предельных динамических возможностей [10, 11]:

1) детский аппарат (максимальная нагрузка — $10 \text{ Н} \cdot \text{м}$) на базе трехфазного двигателя ДБМ 40-0,025-4-3 (пусковой момент — $0,093 \text{ Н} \cdot \text{м}$; частота холостого хода 4400 мин^{-1} ; мощность — $10,7 \text{ Вт}$ при напряжении 12 В , масса двигателя — 120 г , наружный диаметр — 40 мм);

2) аппарат взрослого человека (максимальная нагрузка — $20 \text{ Н} \cdot \text{м}$) на базе модифицированного трехфазного двигателя ДБМ 50 (пусковой момент — $0,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$; частота холостого хода — 1500 мин^{-1} ; мощность — $11,78 \text{ Вт}$ при напряжении 12 В ; масса двигателя — 180 г , наружный диаметр — 50 мм).

Расчеты приведены для случая управления вращением нагрузки с постоянной скоростью. Этот режим не является самым экономичным; при более оптимальном управлении можно снизить мощность нагрузки на 20 %.

Характеристики вариантов приводов БМТ

Вариант	Наименование параметра	Время сгибания, с			
		1,0	1,25	1,75	2,0
1	Мощность нагрузки, Вт	9,24	7,39	5,28	4,62
	Требуемое напряжение, В	14,85	12	12	12
	Допустимые передаточные числа	107	87...167	69...295	66...353
2	Мощность нагрузки, Вт	15,4	12,3	8,80	7,70
	Требуемое напряжение, В	15,8	14,2	12	12
	Допустимые передаточные числа	50	55	62...69	48...101

Анализ вариантов показал, что они незначительно отличаются по массе и габаритным размерам. Поэтому целесообразно использовать один привод для обоих исполнений, причем в детском исполнении привод будет работать с 40 %-м запасом.

По результатам расчетов определено схемное решение исполнительного механизма. Передаточное отношение планетарного редуктора находится

по формуле $u = \frac{1 + z_3/z_1}{1 - z_3 z_4 / z_2 z_5}$, где z_k — число заходов k -го звена. Получаем $u = 96$ при $z_1 = 3$, $z_2 = 8$, $z_3 = 19$, $z_4 = 7$, $z_5 = 18$.

Основные технические характеристики унифицированного привода биомеханического тренажера: амплитуда движения — $0...130^\circ$; скорость движения — $5...60^\circ/\text{с}$; нагрузка — 100 Н ; мощность — 15 Вт ; габаритные размеры — $\varnothing 58 \times 35 \text{ мм}$; масса — 250 г ; напряжение — 12 В ; ток потребления — не более 2 А ; ресурс — не менее 20 тыс. ч .

Алгоритм управления мехатронным модулем БМТ. Система уравнений динамики модуля БМТ имеет вид

$$\begin{cases} \dot{\phi}_2 = \omega_2; \\ \dot{\omega}_2 = \frac{\omega_{\text{хх}} \left(\frac{U_{\text{упр}}}{U_0} - \frac{1}{u} \frac{M_2(\phi_2)}{\eta M_{\text{п}}} \right) - \omega_2}{T_{\gamma}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\omega_2 = \dot{\phi}_2$ — угловая скорость вращения выходного звена (нагрузки); $\omega_{\text{хх}}$ — угловая скорость идеального холостого хода; u — кинематическое передаточное отношение ПЭВМ; η — КПД ПЗВМ; $U_{\text{упр}}$ — управляющее напряжение на входе двигателя; U_0 — номинальное напряжение двигателя; M_2 — момент нагрузки в суставе; $M_{\text{п}}$ — пусковой момент двигателя; T_{γ} — электромеханическая постоянная времени привода.

Момент нагрузки в суставе M_2 зависит от угла разгибания ϕ_2 , мышечного тонуса и показателя контрактуры по степенному закону

$$M_2 = M_0 + M_{\text{пр}} \left(\frac{\phi}{\phi_{\text{пр}}} \right)^k, \quad (2)$$

где M_0 — момент сопротивления, вызванный начальным мышечным тонусом сгибателей; $M_{\text{пр}}$ — момент сопротивления при полном разгибании сустава на угол $\phi_{\text{пр}}$; k — показатель контрактуры.

Показатель контрактуры k меняется в пределах от 0 до 1. Чем выше этот показатель, тем меньше подвижность в суставе, которая ограничена пороговым значением момента нагрузки $M_{\text{кр}}$. Критическое значение $M_{\text{кр}}$ соответствует значению, выше которого наступает фаза контрактуры (например,

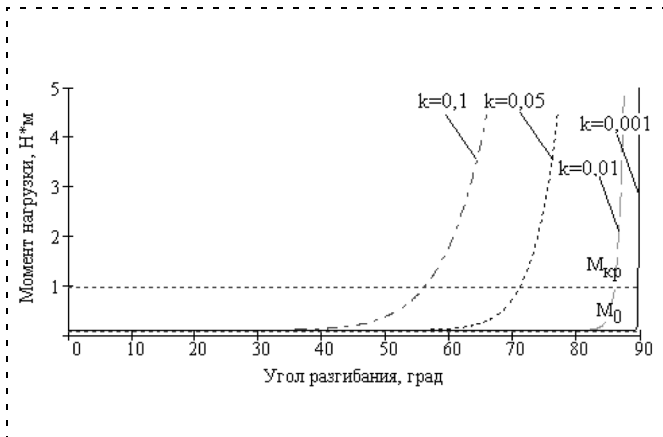


Рис. 1. Закон изменения момента нагрузки при различных значениях показателя контрактуры

возникают болезненные ощущения). На рис. 1 показана зависимость момента нагрузки от угла разгибания при различных показателях контрактуры на примере локтевого сустава (за начальное положение принято положение с углом 90°). Для данной модели при показателе $k = 0,1$ амплитуда подвижности сустава составляет $56,2^\circ$, при $k = 0,05$ — амплитуда $71,1^\circ$, при $k = 0,01$ — амплитуда $85,9^\circ$, при $k = 0,001$ — амплитуда $89,6^\circ$.

Показатель контрактуры не является постоянным параметром, а уменьшается в процессе разработки. Для формализации этой зависимости следует обладать достаточно большим объемом клинических данных, кроме того, эта зависимость, по-видимому, индивидуальна для каждого пациента.

В приводе БМТ реализован алгоритм управления движением шарнирно-рычажной системы тренажера для разработки контрактур с уменьшением болевых ощущений. Действие алгоритма основано на учете момента сопротивления. Привод совершает разгибательное движение в суставе, пока сопротивление не достигнет порогового значения $M_{кр}$ (этот момент фиксируется датчиком тока, так как потребляемый ток прямо пропорционален преодолеваемой нагрузке). В этом случае привод переключается на осциллирующий режим, заставляя сустав совершать быстрые колебательные движения малой амплитуды. Амплитуда осциллирующего напряжения U_1 определяется из условия прохождения заданного угла разгибания α за полупериод. Такой режим способствует расслаблению сгибаемых мышц и снижению болевых ощущений. Осциллирующий режим функционирует некоторый период времени (от нескольких секунд до нескольких минут), задаваемый программно, после чего привод возвращается в исходное положение, заставляя сустав сгибаться и давая возможность для восста-

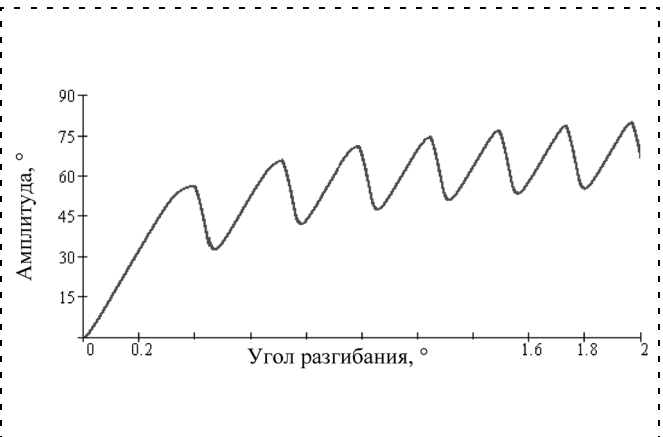


Рис. 2. Диаграмма изменения угла разгибания за цикл разработки

новления локального кровообращения и релаксации разгибателей. Затем цикл повторяется вновь.

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма проведен комплекс исследований по имитационному моделированию динамики БМТ в реальном времени. Заметим, что для работы алгоритма не важен точный вид зависимости (2) и, тем более, значение показателя контрактуры (который существенно привязан к предложенной модели). Но для имитационной модели необходимо формализованное описание зависимости усилия сопротивления разгибанию от угла разгибания, причем с учетом положительной динамики в процессе разработки. На рис. 2 представлены результаты имитационного моделирования — диаграммы изменения угла разгибания. Для наглядности предложен идеализированный случай, когда каждая осцилляция эффективна — после каждой осцилляции показатель степени $1/k$ в выражении (2) увеличивается на единицу. Режим осцилляции: $T_{осц} = 0,1$ с, $\alpha = 20^\circ$. Подвижность в суставе до начала разработки составляла $56,1^\circ$, в конце цикла разработки — $80,1^\circ$.

Пульт управления состоит из кнопочного пульта из 16 клавиш и двухстрочного алфавитно-цифрового ЖКИ DV-16252. На индикацию выводится информация о режимах работы, значения параметров управления: $M_{кр}$ — пороговое значение момента сопротивления, характеризующее наступление контрактуры; M — число циклов разработки в течение сеанса разработки; N — число осцилляций в течение цикла разработки; $T_{осц}$ — полупериод осцилляции; α — амплитуда осцилляции. С помощью клавиатуры возможно изменение указанных параметров.

Разработанная система управления мехатронным приводом БМТ состоит из однокристалльного 8-разрядного микроконтроллера (МК) AT89S8252

фирмы ATMEЛ, блока управления электродвигателем и пульта управления.

В приводе используется бесконтактная синхронная трехфазная машина, работающая в режиме вентильного двигателя. Для коммутации обмоток применен силовой трехфазный транзисторный мост CPV362M4U. Для согласования управляющих выходных сигналов МК с входами силового моста применен драйвер IR2133S. В качестве датчика тока используется шунт R14. Для регулирования скорости вращения МК в соответствии с запрограммированным алгоритмом генерирует ШИМ-сигналы для силовых ключей.

В начале работы осуществляется настройка аппаратных и программных устройств микроконтроллера (таймера, портов ввода—вывода, системы прерываний, внутренних регистров). Далее система управления переходит в режим управления двигателем и ожидания приема команды от пульта управления.

Заключение. На рис. 3 приведен опытный образец унифицированного мехатронного модуля БМТ [12]. Особенностью предлагаемого привода биомеханического тренажера является моноблочный принцип построения конструкции, в которой сочетаются моментный бесконтактный электрический двигатель и планетарный винтовой механизм типа ЗК-Н. Это позволяет получить большой диапазон рабочих скоростей, низкий шум и виброактивность при небольших массогабаритных характеристиках. Цифровая система управления обеспечивает требуемое дозирование интенсивности нагрузки, возможность работы двигателя в разных режимах, реализацию



Рис. 3. Внешний вид мехатронного модуля БМТ

постоянных и осциллирующих движений тренажера и другие возможности.

Разработанный на базе унифицированного мехатронного модуля комплекс автономных биомеханических тренажеров обеспечивает пассивные движения в обычном состоянии и в воде как на низких скоростях, при которых не происходит травмирования внутрисуставных щращений, так и на высоких скоростях, когда сустав "разрабатывается". Комплекс состоит из пяти тренажеров на все крупные суставы. В каждый тренажер включается шарнирно-рычажная система, обеспечивающая жесткость конструкции. Особенностью шарнирно-рычажной системы является использование жестких ложементов и стяжек вместе с эластичными ремнями и брейсами. Это обеспечивает хорошую фиксацию конечности в аппарате, а также возможность подгонки тренажера с целью совмещения осей вращения аппарата и естественного сустава и отсутствие травмирования мягких тканей.

Апробацию, клинические испытания и внедрение комплекса биомеханических тренажеров предполагается осуществить в Детском областном клиническом санатории им. Первого мая (п. Пиганово Владимирской обл.).

Список литературы

1. **Травматология** и ортопедия: Центр Альтернативных Разработок [online]. <http://www.travma.ru/>.
2. **Маркс В.** Ортопедическая диагностика: Руководство-справочник. Б. и. 1978 [online]. <http://www.rusmedserv.com/orthopaedics/book/>.
3. **Конструкции** протезно-ортопедических изделий / Под ред. А. П. Кужекина. М.: ЛПП, 1984.
4. **Морозов В. В., Жданов А. В.** Комплекс биомеханических тренажеров для разработки контрактур крупных суставов // Производственные технологии и качество продукции: Матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. Владимир: ВлГУ, 2001. С. 175—177.
5. **Патент 2017030 РФ, МПК⁵ F 16 Н 1/30.** Планетарная передача / В. В. Морозов, В. И. Панюхин, Е. В. Зуева и др. № 4952867/28; заявл. 24.05.94. Бюл. № 21 от 30.07.94.
6. **Патент 2162177 РФ, МПК⁷ F 16 Н 1/30.** Планетарная передача / В. В. Морозов, В. П. Ганин. — № 99112672/28; заявл. 18.06.99. Бюл. № 2 от 20.01.01.
7. **Морозов В. В., Панюхин В. И., Панюхин В. В.** Зубчато-винтовые передачи для преобразования вращательного движения в поступательное. Владимир: ВлГУ, 2000. 160 с.
8. **Морозов В. В., Панюхин В. И., Панюхин В. В.** Механические передачи: КПД и самоторможение. Владимир: ВлГУ, 2002. 164 с.
9. **Морозов В. В.** Роликовинтовые механизмы: Кинематические характеристики. Владимир: ВлГУ, 2005. 84 с.
10. **Морозов В. В., Костерин А. Б., Новикова Е. А.** Плавность динамических звеньев электромеханических приводов. Владимир: ВлГУ, 1999. 158 с.
11. **Жданов А. В.** Снижение энергопотребления приводов протеза локтя // Конверсия. Приборостроение Медицинская техника: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Владимир: ВлГУ, 1999. С. 45—46.
12. **Морозов В. В., Жданов А. В., Крыштал П. И.** Создание системы биомеханических тренажеров для разработки посттравматических контрактур у детей и подростков-инвалидов // Индустрия образования. Вып. 3. М.: МГИУ, 2002. С. 293—303.

УДК 61.519.67.

А. В. Черняев, д-р техн. наук, проф.,
Д. О. Ясюкевич,
МАТИ-РГТУ имени К. Э. Циолковского

Моделирование процесса насыщения потока крови кислородом в мехатронных медицинских устройствах массообменного типа

Рассматривается математическая модель насыщения потока крови кислородом в оксигенаторе с учетом влияния гидродинамики потока и приводятся результаты анализа расчетных данных по динамике насыщения кровотока, полученных с применением программного комплекса вычислительной гидродинамики FlowVision.

Введение

В современной медицинской технике все большее значение приобретают мехатронные устройства с автоматизированным управлением. При проведении операций на открытом сердце в состав аппарата искусственного кровообращения входят несколько основных мехатронных устройств, заменяющих на время операции аналогичные органы человека. Среди них можно выделить перфузионный насос, являющийся аналогом сердца человека, и оксигенатор — устройство для насыщения крови кислородом и вывода из крови углекислого газа. Оксигенатор по своему действию аналогичен легким человека. Испытания промышленных образцов и макетов оксигенаторов показывают дефекты различных типов. К последним относят тромбоз, гемолиз крови, засорение мембранных каналов липидами крови, шунтирование потоков венозной крови по стенкам и между капиллярами мембраны оксигенатора. Для предотвращения указанных нежелательных эффектов необходимо на этапе проектирования устройства учитывать основные физико-химические, гидро- и массообменные процессы, происходящие в оксигенаторе, и оптимизировать как условия их протекания, так и работу систем управления [1–3].

Целью настоящей работы явилось комплексное моделирование массообмена между кровью и кислородом в мембране оксигенатора, построе-

ние математической модели процесса, проведение вычислительных и натурных экспериментов для проверки адекватности разработанной модели.

Модель оксигенатора

Математическая модель устройства включает в себя систему уравнений, определяющую как гидродинамические параметры потока, так и массообменные процессы.

Физическая и упрощенная модель процесса представлены на рис. 1.

В основе гидродинамической модели оксигенатора лежит система уравнений Навье—Стокса для случая ламинарного потока [4]:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla(V \otimes V) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla(\mu \nabla V) + S;$$

$$\nabla V = 0;$$

$$S = \left(1 - \frac{P_{hyd}}{\rho}\right) g + B + \frac{\alpha}{\rho},$$

где V — скорость потока жидкости, м/с; t — время, с; P — давление потока, Па; P_{hyd} — гидростатическое давление потока, Па; ρ — плотность модельной жидкости, кг/м³; μ — динамическая вязкость, Па·с; g — ускорение свободного падения, м/с²; B — ускорение вращения кровотока, м/с²; α — коэффициент проницаемости мембраны, кг/(м²·с²).

Применение уравнений Навье—Стокса для ламинарного потока обосновано следующими причинами: во-первых, строгое и упорядоченное движение потока по капиллярной мембране способствует уменьшению турбулизации потока, заданной входными элементами устройства и нестационарным давлением перистальтического насоса; во-вторых, согласно известной зависимости вязкости крови от скорости сдвига для указанного процесса

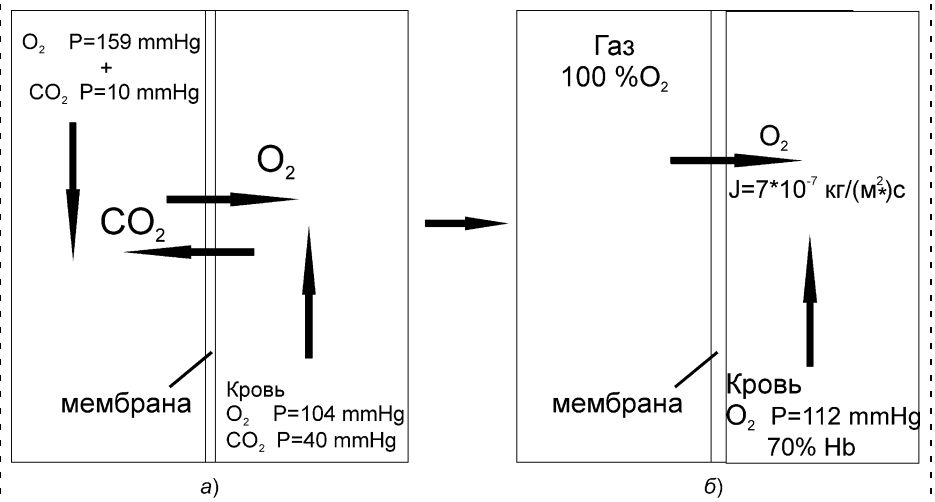


Рис. 1. Физическая (а) и упрощенная (б) модели процесса оксигенации

параметры попадают в область, для которой характерны небольшие изменения вязкости от скорости сдвига. Модельная жидкость рассматривается как простая ньютоновская несжимаемая жидкость. Гетерогенность крови также не учитывается. Модельная жидкость близка к крови только по вязкости и плотности, значения которых составляют соответственно $8,1 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с и $1,05$ кг/м³.

Моделирование капиллярной мембраны в полном объеме представляет собой весьма громоздкую задачу, поэтому в данной работе было решено заменить реальную капиллярную мембрану ее упрощенной эквивалентной моделью с увеличенными размерами капилляров. Радиус эквивалентного капилляра равен 1,75 радиуса реального капилляра, при этом межкапиллярные расстояния оставлены равными реальным. Подобное допущение не вносит существенных изменений в гидродинамику модели, что подтверждено специально проведенными исследованиями. При переходе к эквивалентной мембране соответственно увеличивается ее площадь. Влияние этого фактора учитывается при определении коэффициента диффузии D на стенке капилляра, для чего введен коэффициент R , определяющийся опытным путем.

Коэффициент диффузии зависит от проницаемости, толщины стенки мембраны, коэффициента проницаемости мембраны и вязкости крови:

$$D = \frac{\alpha \mu R}{\lambda},$$

где D — коэффициент диффузии; α — проницаемость стенки мембраны, л/м·с; λ — толщина стенки мембраны, м; R — коэффициент эквивалентности капиллярной мембраны.

Насыщение потока крови имеет две стадии: диффузную и конвективную. На *диффузной* стадии происходит проникновение кислорода через стенку мембраны в поток жидкости. При этом на стенке капилляра задается диффузный поток на границе раздела фаз кислород—кровь, обусловленный массовым расходом потока кислорода согласно второму закону Фика:

$$J = D \frac{\partial Q}{\partial t},$$

где J — массовый поток на стенке капилляра, кг·м²/с; Q — массовый расход потока, кг/с.

На *конвективной* стадии при попадании кислорода в кровь начинается взаимодействие потоков, насыщенного и не насыщенного кислородом. Взаимодействие определяется согласно уравнению конвекции

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(VC) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\frac{\mu}{Sc} \nabla C \right),$$

где C — относительная концентрация кислорода, %; Sc — число Шмидта.

Число Шмидта в данном уравнении для половолоконного мембранного оксигенатора определяется как

$$Sc = \frac{\alpha}{D(1-\varepsilon)} d_0,$$

где ε — коэффициент заполнения оксигенационной камеры мембранным полотном; d_0 — диаметр капилляра, м.

В крови кислород существует в двух состояниях: в растворенном в плазме крови и в связанном с гемоглобином — оксигемоглобине. Значение каждого параметра при проведении операции имеет большое значение, поэтому представляется значимым определение концентрации кислорода на выходе расчетной области не только суммарно, но и по каждой составляющей.

Общая концентрация кислорода в крови равна

$$C = \sigma P_r + \beta S(P_r) \text{Hb},$$

где σ — растворимость кислорода в крови, кг/м³; P — кислородная емкость гемоглобина, м³/кг; P_r — парциальное давление растворенного в крови кислорода, Па; $S(P_r)$ — насыщение гемоглобина, %; Hb — количество гемоглобина, кг·моль/м³.

Насыщение гемоглобина зависит от парциального давления кислорода, растворенного в крови, согласно кривой диссоциации гемоглобина, которая может быть аппроксимирована логистическим законом и представлена уравнением

$$S(P) = 100,5 - \frac{99,2}{1 + \left(\frac{P_r}{25}\right)^{2,5}}.$$

Граничными условиями процесса являются следующие:

- на стенке расчетной области и капилляра должно иметь место прилипание частиц жидкости:

$$V_L = 0,$$

где V_L — скорость на стенке расчетной области;

- давление на входе модели равно сумме давлений:

$$P_{\text{вх}}|_{\Gamma} = P_{\Gamma 1} + P_{\Gamma 2} + P_{\Gamma 3};$$

$$(\nabla V_{i,n})|_{\Gamma} = 0,$$

где $P_{\text{вх}}|_{\Gamma}$ — давление на входе расчетной области; $P_{\Gamma 1}$ — перепад давления на мембране оксигенатора; $P_{\Gamma 2}$ — перепад давления в кровеносной системе тела пациента; $P_{\Gamma 3}$ — перепад давления в прочих элементах системы АИК (насосах, фильтрах, кардиотомных резервуарах, трубках);

- на входе расчетной области $S(P_r) = 70$ % по гемоглобину, а $P_r = 47$ мм рт. ст.;

- давление на выходе модели

$$P_{\text{вых}}|_{\Gamma} = -(P_{\Gamma 1} + P_{\Gamma 2})$$

$$(\nabla V_{i, n})|_{\Gamma} = 0,$$

где $P_{\text{вых}}|_{\Gamma}$ — давление на выходе расчетной области;

- расход кровотока ($Q_{\text{кр}}$) в системе равен 1 л/мин.

Согласно экспериментальным данным, полученным авторами, $P_{\Gamma 1}$ составляет около 3 кПа (20 мм рт. ст.). Известно [5, 6], что $P_{\Gamma 2}$ равно 20 кПа (150 мм рт. ст.), а $P_{\Gamma 3}$ равно примерно 7 кПа (50 мм рт. ст.).

Значение потока на стенке капилляра определяется как функция от перепада парциального давления кислорода между газовой (внутри капилляра) и жидкой фазой (вне капилляра). В предельном значении скорость диффузии определяется транспортной характеристикой мембраны — проницаемостью. Для использованной мембраны эта величина равна 420 мл/мин.

Обсуждение результатов

Расчет проводился с применением прикладного программного комплекса вычислительной гидродинамики FlowVision версии 2.3.3 [8]. В качестве расчетной области использовалась фигура, представляющая собой проточную область устройства. Поверхность расчетной области представляет собой треугольную поверхностную сетку с общим числом полигонов около 19 000, которая формируется в программном пакете твердотельного моделирования. Начальная расчетная сетка представляет собой параллелепипед со сторонами $300 \times 300 \times 8$ ячеек соответственно, при этом общее число ячеек после адаптации становится равным 896 562, однако число расчетных ячеек меньше — 202 066. Шаг расчета по времени равен 0,1 с. Как показали исследования, процесс выходил на стационарный через 250 итераций.

В результате расчета получены данные по концентрации насыщенного потока внутри устройства. В табл. 1 представлены расчетные данные по потоку на выходе из устройства по насыщению оксигемоглобином, а в табл. 2 — по растворенному в крови кислороду и экспериментальные данные.

Экспериментальные и расчетные данные по насыщению потока кислородом качественно близки по обоим составляющим. По насыщению гемоглобином зависимость между входом и выходом модели для расчета совпадает с экспериментальными данными, а по значению растворенного в жидкости кислорода есть некоторые несущественные отклонения, имеющие вторичное значение. Количественная адекватность процесса укладывается в рамки 5 % для насыщения потока по гемоглобиновой составляющей и до 10 % — по растворенной составляющей.

Насыщение потока жидкости на выходе расчетной области составляет 93 % для потока крови с $\text{Hb} = 14$ мг/100 мл, что равно количеству гемоглобина в перфузионной жидкости при проведении лабораторного эксперимента, насыщение составило 17,45 мл кислорода на 100 г крови. При этом $P_{\Gamma} = 143,64$ кПа (108 мм рт. ст.)

Полученные данные говорят о возможности применения предложенной модели для процесса насыщения потока жидкости кислородом в оксигенаторе.

В качестве практического применения данной модели проанализируем с ее помощью протекание процесса насыщения потока по высоте устройства.

На рис. 2 представлено насыщение потока по высоте модели в продольном сечении устройства. На графике 1 (рис. 2) представлено насыщение по

Таблица 1

Параметр	Расчетные данные	Экспериментальные данные
$P_{\text{O}_2\text{вх}}$	42	42
$P_{\text{O}_2\text{вых}}$	90	98

Таблица 2

Параметр	Расчетные данные	Экспериментальные данные
$S(P_{\Gamma})_{\text{вх}}$	75	75
$S(P_{\Gamma})_{\text{вых}}$	96	97

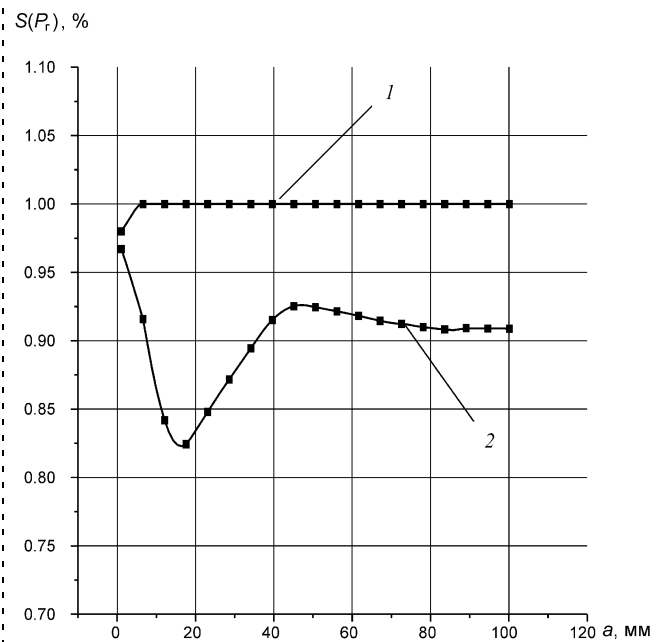


Рис. 2. Изменение насыщения потока по высоте модели в продольном сечении

тока в части, наиболее удаленной от выходной границы устройства. Поток быстро насыщается кислородом в нижней части мембраны и в дальнейшем проходит по мембране полностью насыщенным. Причина этого — в малой скорости потока в элементах устройства, наиболее удаленных от выходных.

График 2 показывает насыщение в потоке, протекающем по кратчайшему пути между входной и выходной границами устройства. Зависимость можно представить полиномиальным уравнением девятой степени:

$$C = 0,96532 + 0,00426a - 0,00357a^2 + 3,15482 \cdot 10^{-4}a^3 - 1,25079 \cdot 10^{-5}a^4 + 2,77262 \cdot 10^{-7}a^5 - 3,67606 \cdot 10^{-9}a^6 + 2,90407 \cdot 10^{-11}a^7 - 1,26324 \cdot 10^{-13}a^8 + 2,33146 \cdot 10^{-16}a^9$$

при $0 < a < 100$,

где a — геометрический параметр (высота) мембраны.

Резкое изменение насыщения потока примерно на высоте мембраны $a = 20$ мм можно объяснить переходом малонасыщенного кислородом потока с внутренней стенки камеры в глубь мембраны. В связи с тем, что поток при движении по мембране имеет направление от входного элемента к выходному под углом примерно 10° к оси устройства, то именно на высоте около 20 мм ненасыщенный поток наиболее существенно проникает в глубокие слои мембраны, что является одним из негативных моментов.

В дальнейшем поток насыщается кислородом через капилляры мембраны, однако максимального 100 %-го насыщения поток не имеет по причине постоянного перехода с внутренней стенки устройства малонасыщенного потока в глубокие слои потока крови с высоким насыщением кислородом. Полученные данные говорят о неоптимальном насыщении потока в данной модели. Изменение конструкции отдельных частей устройства (например, подводного, распределительного элементов и размеров оксигенационной камеры) позволят оптимизировать движение кровотока и насыщение потока.

Заключение

В результате численного моделирования с применением прикладного программного пакета FlowVision

была создана адекватная модель насыщения потока кислородом в капиллярной мембране оксигенатора. Анализ насыщения позволил определить ряд негативных явлений в разработанной конструкции, среди которых можно выделить основные: неоптимальную конфигурацию распределительного элемента и окон, формирующих поток, конфигурацию подводного элемента, шунтирование малонасыщенного потока по внутренней стенке устройства и в межкапиллярном пространстве, малую степень заполнения оксигенационной камеры мембранным полотном. Для решения указанных проблем можно использовать рассмотренную численную модель устройства, внося изменения в геометрию модели.

Данные испытаний и сравнительного анализа по экспериментальным и расчетным данным показали удовлетворительные результаты, что позволяет использовать представленную модель для анализа различных аспектов работы устройства и проектирования автоматизированных систем управления мехатронными медицинскими устройствами.

Список литературы

1. Wang J. H. Application of CFD in the designing of a membrane oxygenator // Journal of mechanics in medicine and biology. 2001. Vol. 1. N 1. P. 11—16.
2. Van Driel M. R. Cardioplegia Heat exchanger design modeling using computational fluid dynamics // Perfusion 2000. N 15. P. 541—548.
3. Gartner M. J., Wilhelm C. R., Gage K. L., Fabrizio M. C. Modelling flow effects on thrombotic deposition in a membrane oxygenator // Artificial Organs. 2000. N 24. P. 29—36.
4. Gage K. L., Gartner M. J., Burgreen G. W., Wagner W. R. Predicting membrane oxygenator pressure drop using computational fluid dynamics // Artificial Organs 2002. N 26. P. 600—607.
5. Каричев З. П., Мулер А. Л. Применение композиционных волоконных мембран для оксигенации крови // Теоретические основы химической технологии. 2001. Т. 35. № 4. С. 403—409.
6. Broodie J. E., Johnson R. B. The manual of clinical perfusion. Second edition. Glendale Medical Corp. Augusta, GA. 1997.
7. Hewitt T. J., Harder B. G., Federspiel W. J. A mathematical model of gas exchange in an intravenous membrane oxygenator // Annals of biomedical Engineering. 1998. Vol. 26. P. 166—178.
8. Руководство пользователя по системе моделирования движения жидкости и газа FlowVision. М.: ЗАО "ТеСИС", 2007.
9. Spaan J. A. E. Transfer of Oxygen into Haemoglobin Solution // Pflugers Arch. 1973. Vol. 342. P. 289—306.
10. Власов В. М., Каричев З. П., Мулер А. Л. Перенос кислорода в движущихся пленках крови // Теоретические основы химической технологии. 1991. Т. 25. № 4. С. 496—502.
11. Локшин Л. С., Лурье Г. О., Дементьева И. И. Искусственное и вспомогательное кровообращение в сердечно-сосудистой хирургии. М.: Изд. Научного центра хирургии РАМН. 1998.

УДК 004.75

Е. Е. Ковшов, д-р техн. наук, проф., **Д. И. Мутин**,
Московский государственный
технологический университет "СТАНКИН"

Управление гетерогенными данными в корпоративной информационной системе медицинского учреждения путем применения XML-технологий

Рассматривается метод решения проблемы межсистемного информационного взаимодействия, позволяющего повысить эффективность обмена информацией в медицинском учреждении.

Введение

В современном мире меняется как количественное, так и качественное содержание информационных ресурсов, отдельные информационные массивы объединяются между собой. Появилось понятие единого информационного пространства как системообразующей составляющей системы принятия решения, обеспечивающей интеграцию процесса управления по вертикали и горизонтали, а также интеграцию взаимодействующих компонентов управления [1]. Составными частями данного пространства выступают гетерогенные (т. е. имеющие разнородную структуру и содержание) информационные потоки.

Несмотря на бурное развитие современных информационных технологий, они не способны обеспечить построение сложных (состоящих из большого числа компонентов и имеющих большее число источников информации) медицинских информационных систем (МИС) [2]. Необходимо, чтобы информация из одних потоков дополняла, уточняла, подтверждала информацию из других.

Для реализации взаимодействия между отдельными функциональными подсистемами необходимо обеспечить число информационных потоков, равное $n(n-1)/2$, где n — число функциональных подсистем [3]. Затраты на реализацию возможностей информационного обмена между функциональными подсистемами в этом случае велики и быстро начнут преобладать над затратами по реализации функциональности самих подсистем [4]. В целях снижения числа информационных потоков до числа функциональных подсистем предлагается метод интеграции гетерогенных информационных потоков.

Суть метода заключается в приведении всех информационных потоков к единому универсальному формату представления информации и осуществлении всего информационного обмена в этом формате [1].

В роли универсального носителя информации выступает XML (*extensible markup language*)-доку-

мент, с помощью которого можно описать структуру любого документа, используя правила DTD (*document type definition*) или XSD (*XML schema definition*) [5]. XML позволяет осуществлять контроль за корректностью данных, хранящихся в документах, проводить проверки иерархических соотношений внутри документа и устанавливать единый стандарт на структуру документов, содержимым которых могут быть самые различные данные.

Проблема межсистемного информационного взаимодействия

В последнее время все большую актуальность приобретает решение задач межсистемного взаимодействия, позволяющего существенно ускорить процесс предварительной обработки информации для ее последующего использования [6]. Качество межсистемного информационного взаимодействия во многом зависит от объема и структуры передаваемых данных. Передача данных сопровождается решением проблемы: с одной стороны, необходимо передать как можно более детальную информацию, чтобы принимающая сторона могла корректно интерпретировать полученные данные, с другой стороны, передаче подлежат не все имеющиеся данные, что вызвано соблюдением режима конфиденциальности.

В связи с этим, при реализации информационного взаимодействия требуется предварительная подготовка (конвертация) данных в целях генерации их представления в понятном для принимающей стороны формате, но с учетом ограничений, накладываемых передающей стороной.

Так, при организации информационного взаимодействия двух информационных систем управления предприятием (ИСУП) (α_1 и α_2) требуется реализовать правила взаимной конвертации данных:

$$\Omega = \begin{cases} \Psi_{\alpha_1 \Rightarrow \alpha_2}; \\ \Psi_{\alpha_2 \Rightarrow \alpha_1}, \end{cases}$$

где Ω — пространство правил конвертации; $\Psi_{\alpha_i \Rightarrow \alpha_j}$ — правило конвертации из одной ИСУП в другую, $i, j = 1, 2, i \neq j$.

Каждое правило конвертации ИСУП содержит множество подправил конвертации отдельных объектов:

$$\Psi_{\alpha_i \Rightarrow \alpha_j} = \begin{cases} Y_1(\omega_{1\alpha_1} \mapsto \omega_{1\alpha_2}); \\ Y_2(\omega_{2\alpha_1} \mapsto \omega_{2\alpha_2}); \\ \dots \\ Y_n(\omega_{n\alpha_1} \mapsto \omega_{n\alpha_2}), \end{cases}$$

$i, j = 1, 2, i \neq j$,

где $\omega_{1\alpha_i} \dots \omega_{n\alpha_j}$ — объекты ИСУП, для которых определяются правила конвертации; $Y_1 \dots Y_n$ — правила конвертации для отдельного объекта.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что при организации информационного взаимодействия между N ИСУП требуется определить в общей сложности $N^2 - N$ правил конвертации Ω , при этом общее число правил конвертации объектов Ψ не поддается исчислению.

Анализ форматов представления данных в виде табличной или текстовой модели позволил определить, что для реализации информационного взаимодействия наиболее перспективным является использование текстового формата [6]. Его основным преимуществом является простота интеграции в сообщение дополнительных элементов, которые могут быть использованы для передачи семантики сообщения.

Среди стандартов текстового формата наиболее распространенным является семейство стандартов, определяемых с помощью языка *XML*. В отличие от других языков язык *XML* позволяет описать не только структуру, но и семантику информации.

Хранение *XML*-документов в истинной *XML*-базе данных

Для хранения *XML*-документов наиболее эффективным является применение активно развиваю-

щейся технологии создания истинных *XML*-баз данных [7].

Истинная *XML*-база данных (*Native XML Database, NXD*) обладает следующими полезными свойствами [8]:

- определяет (логическую) модель *XML*-документа (в отличие от данных, содержащихся в этом самом документе) и сохраняет и извлекает документы в соответствии с этой моделью;
- документ *XML* в этой базе выступает в качестве основной единицы (логического) хранения;
- может быть построена на основе любой физической модели хранения.

Цель истинных *XML*-баз данных состоит в помощи разработчику в обеспечении надежного хранения и манипулирования *XML*-документами.

Практическая реализация модели обмена данными в гетерогенной медицинской информационной системе

При работе с распределенной медицинской информационной системой (МИС) возникают трудности в нахождении оптимального решения задач управления, документооборота и отчетности, которые являются следствием одной причины — отсутствия у подсистем медицин-

ской клиники актуальной информации о деятельности других подсистем [9]. Решения этой проблемы можно добиться включением всех объектов управления клиникой в единое информационное пространство, в чем может помочь создание истинной *XML*-базы данных.

Структура информационной системы медицинского учреждения, состоящая из нескольких подсистем, представлена на рис. 1.

Для повышения эффективности управления медицинской информацией в гетерогенных МИС была выбрана отечественная истинная *XML*-база данных *Sedna*, разрабатываемая исследовательской группой MODIS Института системного программирования РАН [10].

Модель обмена данными в такой гетерогенной системе представлена на рис. 2.

Проектирование *XML*-структуры медицинских документов

В СУБД *Sedna* в основе хранения *XML*-документа во внеш-



Рис. 1. Структура информационной системы

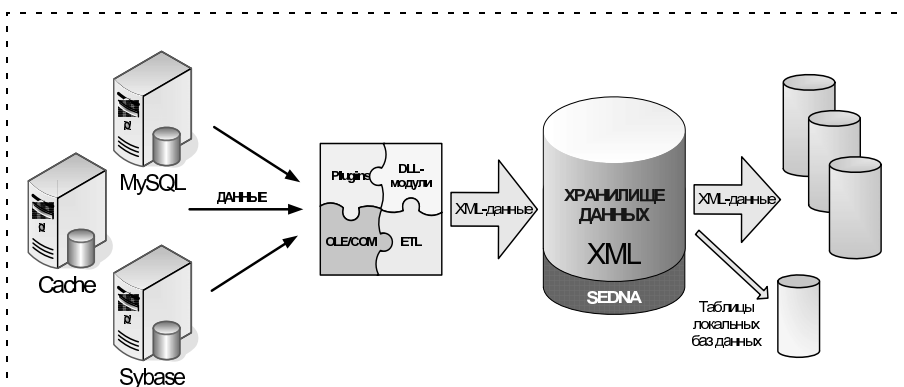


Рис. 2. Структура обмена информацией в МИС

Таблица 1

Состав электронного документа

Наименование тега	Описание тега	Обязательность
MSH	Идентификация электронного документа	Обязательный
LPU	Идентификация медицинского учреждения	Обязательный
FORM	Идентификация формы	Обязательный
ПЕРСОНАЛ	Начало сведений о персонале	Обязательный
АНКЕТА	Начало сведений о враче	Обязательный
ПАСПОРТ	Сведения о фамилии, имени, отчестве, половой принадлежности, дате рождения	Обязательный
ОБРАЗОВАНИЕ	Сведения об образовании	Обязательный
РАБОТА	Сведения о настоящем месте работы	Обязательный
СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ	Сведения о специализации	Необязательный
АТТЕСТАЦИЯ	Сведения об аттестации	Необязательный
ЗВАНИЯ	Сведения о званиях	Необязательный

Таблица 2

Атрибуты тега «MSH»

Атрибут	Назначение	Формат данных
mshSoft	Передает в произвольном виде наименование организации-разработчика программного обеспечения, сформировавшего электронный документ	Строка символов
mshDate	Передает дату формирования электронного документа	Строка символов (dd.mm.yyyy)

ней памяти лежит описывающая схема XML-документа.

Рассмотрим пример структуры персонального учета врачебных кадров медицинских учреждений. Согласно приказу Департамента здравоохранения г. Москвы от 21.10.2003 № 621 существует стандарт общих требований, структур и правил формирования электронных документов форм федерального государственного наблюдения. Стандарт предназначен для обеспечения обмена данными между информационными системами. Стандарт разработан на основе и с использованием языка XML.

Состав элементов электронного документа приведен в табл. 1.

Тег "MSH" определяет начало электронного документа и передает атрибуты, приведенные в табл. 2. Остальные теги описываются аналогично.

Фрагмент семантической модели электронного документа дан на рис. 3.

Результат выполнения указанного примера представлен на рис. 4.

Структура XML-документа для БД "Отдел кадров", хранящей данные о персонале медицинского

```
<?xml version="1.0" encoding="windows-1251"?>
<xs:schema xmlns:xs=http://www.w3.org/2001/XMLSchema
elementFormDefault="qualified">
<xs:element name="MSH">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="LPU"
maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
    <xs:attribute name="mshSoft" type="xs:string"
use="required"/>
    <xs:attribute name="mshDate" type="xs:string"
use="required"/>
  </xs:complexType>
</xs:element>
...
```

Рис. 3. Фрагмент семантической модели электронного документа

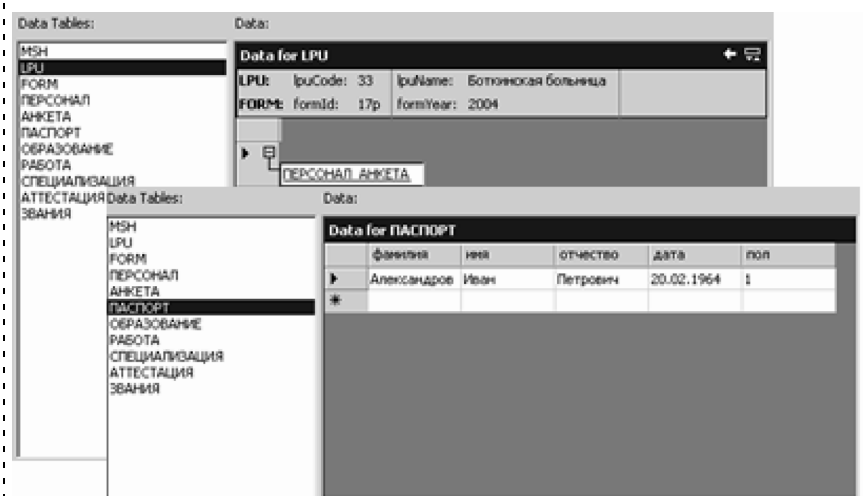


Рис. 4. Структура электронного документа

```
<?xml version="1.0" encoding="windows-1251"?>
< MSH mshSoft="000 Программы и комплексы" mshDate
="18.12.2004">
  <LPU lpuCode="33" lpuName="Боткинская больница">
    <FORM formId="17p" formYear="2004">
      <ПЕРСОНАЛ>
        <АНКЕТА>
          <ПАСПОРТ>
            <фамилия> Александров
            </фамилия>
            <имя> Иван </имя>
            ...
```

Рис. 5. Фрагмент структуры XML-документа

учреждения, проиллюстрирована фрагментом на рис. 5.

Заключение

Благодаря использованию технологии XML-баз данных достигается эффективное взаимодействие для обмена информацией между информационными системами управления лечебно-профилактическим учреждением. Помимо этого XML СУБД Sedna позволяет создавать эффективные серверные ре-

шения для решения задач управления полуструктурированными данными.

Список литературы

1. **Панькин А. В.** Интеграция гетерогенных информационных потоков, циркулирующих в контуре управления // Тр. 2-го междунар. сем. "Интеграция информации и ГИС". СПб.: Анатолия, 2005.
2. **Рузайкин Г. И.** Медицинские информационные системы, или МИС // Мир ПК. 2001. № 3.
3. **Ogdin J. L.** The Mongolian hordes versus super-programmer // Infosystems. 1972. Dec.
4. **Брукс Ф.** Мифический человекомесяц или как создаются программные системы. СПб.: Символ, 2000.
5. **Питц—Моултис Н., Кирк Ч.** XML в подлиннике. — СПб.: BHV, 2000.
6. **Слукин П. А.** Адаптивные интерфейсы обмена коммерческой информацией: Автореф. дисс. канд. экон. наук. Москва, 2006.
7. **Bouret R.** Школы консорциума W3C: XML и базы данных. <http://xml.nsu.ru>
8. **Native XML Databases.** <http://www.rpbouret.com/xml/XMLAndDatabases.htm>
9. **Гулиев Я. И.** Медицинская информатика в ИПС РАН // Программные системы: теория и приложения. Тр. конф. Москва: Физматлит, 2004.
10. **Sedna XML DBMS.** <http://modis.ispras.ru/Development/sedna.htm>

УДК 62-835, 62-86

В. В. Козырев, д-р техн. наук, проф.,
А. И. Новожилов, канд. техн. наук, проф.,
О. В. Федотов, канд. техн. наук, доц., **С. М. Паринов**,
 Владимирский государственный университет

Шарнирно-стержневая конструкция автоматизированного аппарата остеосинтеза и ее исследование

Приведено описание шарнирно-стержневой конструкции автономного ортопедического аппарата автоматизированного остеосинтеза, разработанного на базе известного аппарата проф. Г. А. Елизарова. Проведен сравнительный анализ структуры аппарата с известным механизмом параллельной кинематики класса "Тексапод", исследована структура аппарата на наличие избыточных связей. Разработана математическая модель кинематики, силового анализа конструкции аппарата. Проведены эксперименты по определению потерь в кинематических парах аппарата.

*Полный текст статьи опубликован
 в Приложении к журналу*

УДК 51-76

А. В. Копыльцов¹, д-р техн. наук, проф.,
Ю. И. Сенкевич², канд. техн. наук,
Л. В. Крыленков¹, **Х. И. Альжасем**¹,

¹Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена,

²Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Моделирование капиллярного кровотока с использованием алгоритма распределенных вычислений

Представлены результаты натурального и вычислительно-го экспериментов по расчету параметров кровотока в капиллярной сети. Впервые показаны результаты расчетов модели капиллярной сети до высоких значений уровней ветвления, которые стали возможны благодаря применению технологии распределенных вычислений. Результаты моделирования ориентированы на научные исследования в медицине и биологии по направлению "сердечно-сосудистые заболевания".

*Полный текст статьи опубликован
 в Приложении к журналу*

УДК 616-71, 681.03.06, 616.005

И. А. Филатов, канд. техн. наук, доц., **А. В. Розин**,
Московский авиационный институт (ГТУ)

Портативный комплекс экспресс-диагностики смерти мозга

Представлены результаты исследований по созданию инструментальных средств диагностики смерти мозга на базе мобильных вычислительных комплексов и систем, адаптированных к эксплуатации в стационарных и полевых условиях. Освещаются технические и методические аспекты интеграции средств транскраниальной доплерографии, электроэнцефалографии и эхоэнцефалографии на базе мобильного нейродиагностического комплекса для оперативного освидетельствования смерти мозга.

*Полный текст статьи опубликован
в Приложении к журналу*

УДК 65.018(075) + 615.47(082)

В. Б. Моисеев, д-р пед. наук, проф.,
Е. В. Бурлюкина, канд. экон. наук, **А. Ю. Павлов**,
Пензенская государственная
технологическая академия,
Е. В. Истомина,
Московский авиационный институт (ТУ)

Рынок медицинской техники (на примере КВЧ-аппарата "АИСТ")

Исследован рынок аппаратов КВЧ-терапии, достоинством которых является возможность безмедикаментозного лечения без нарушения целостности кожного покрова. Определено позиционирование товара на внутреннем рынке, товар исследован по модели Ф. Котлера.

*Полный текст статьи опубликован
в Приложении к журналу*

УДК 004.891.2

Е. Е. Ковшов, д-р техн. наук, проф., **Е. И. Мутина**,
Московский государственный технологический университет "СТАНКИН"

Повышение эффективности функционирования распределенной медицинской информационной системы на основе интеллектуального анализа информации

Предложен способ решения проблемы выявления скрытых взаимосвязей в медицинских данных, имеющих неявный характер, с помощью интеллектуального анализа информации, в частности, деревьев решений, эффективность которого проиллюстрирована на конкретном примере.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

УДК 615.47

Т. В. Истомина, д-р техн. наук, проф.,
Н. В. Козлова, канд. техн. наук, доц.,
Н. В. Назарова, канд. техн. наук, доц.,
Пензенская государственная
технологическая академия

Применение модели выпускника при профориентации студентов медико-технического профиля

Рассматривается проблема повышения качества медико-технического образования. Впервые предложена методика организации профессиональной ориентации студентов, основанная на модели выпускника направления "Биомедицинская техника". Полученные результаты могут быть распространены на другие образовательные специальности.

*Полный текст статьи опубликован
в Приложении к журналу*

УДК 519.6(07)

А. Ф. Зубков, канд. техн. наук, проф.,
Н. В. Назарова, канд. техн. наук, доц.,
Г. С. Колгушкина,
Пензенская государственная
технологическая академия

Моделирование интеллектуальной деятельности в системе медико-технического образования

Для решения задачи управления сложными системами (биологическими, экономическими, информационными) проанализирован механизм действия закона Ципфа-Парето, на основе которого разработана модель интеллектуальной деятельности в системе медико-технического образования. Предлагается применять эту модель для определения направлений наиболее важных исследований и обучения инженерных медицинских кадров.

*Полный текст статьи опубликован
в Приложении к журналу*

CONTENTS

Makarov I. M., Lokhin V. M., Manjko S. V., Romanov M. P. Algorithms of Control by Motion of Multilink Mechatronic-Modular Robots with Adaptive Kinematic Structure	2
Boljshakov A. A., Golik M. S. Intellectual System of Search of Faultiness at the Robot-Technical Complex	10
Skryabin A. M., Kardash D. I., Frid A. I. Modernization of Controlling Software of Automatic Control Systems by Autonomous Mobile Objects	14
Grankin B. K., Kozlov V. V., Lysenko I. V., Petrov G. D. Method for a Unique Mechanical Device Technical State Verification Over a Long Period of Unique Mechanical Device Life Duration	20
Dzashitov V. E., Pankratov V. M., Barulina M. A. The Sensor of Temperatures of Monitoring and Diagnostics of Space-Rocket Engineering in Conditions of Thermal Shocks	24
Borovik S. Yu., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. The Engineering Principles of Systems for Data Acquisition, Sensors Signals Transformation and Data Processing Meant for Prof-fan Engines Experimental Investigations	28
Malyugin V. D., Ivanov E. B. Expert Managerial System Technological Process on Example of Installation of Processing of Slag	34
Bondarchuk A. A., Matveev M. G. The Analysis of Control Models of Steel Hardness During its Melting	37
Atlanov A. V. Workflow Runtime Estimation of Lubricoolant Processability	40
Morozov V. V., Zhdanov A. V., Kosterin A. B. Biomechanical Exercisers with Mechatronic Unit for Treatment of Large Joints' Contractures	43
Chernyaev A. V., Yasyukevich D. O. Modelling of Oxygen Saturation Process in Mechatronic Medical Mass-Transfe devices	47
Kovshov E. E., Mutin D. I. Heterogeneous Data Management in Corporate Information System of the Medical Institution by Using XML-Technologies	51
Kozyrev V. V., Novogilov A. I., Fedotov O. V., Parinov S. M. Joint a Rod Construction of the Automized Device of an Osteosynthesis and Her Research	54
Kopyltsov A. V., Senkevich Yu. I., Krylenkov L. V., Aldassem H. I. The Modelling of the Capillary Blood Flow with the Help of the Distributed Computing	54
Filatov I. A., Rozinov A. V. Portable Complex for Express-Diagnostics Death of a Brain	55
Moiseev V. B., Burlukina E. V., Pavlov A. U., Istomina E. V. Market of Medical Technique (for Example of the Device "AIST")	55
Kovshov E. E., Mutina E. I. Increase of the Distributed Medical Information System's Operating Benefits by Using Intellectual Data Analysis	55
Istomina T. V., Kozlova N. V., Nazarova N. V. Application of Graduating Student Model in Vocational Guidance of Student with Medico-Technical Profile	55
Zubkov A. F., Nazarova N. V., Kolgushkina G. S. Modelling of Intellectual Activity in System of the Megico-Technical Education	55

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1

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

Дизайнер Т.Н. Погорелова. Художник В.Н. Погорелов.
Технический редактор О.А. Ефремова. Корректор З.В. Наумова.Сдано в набор 28.12.2007. Подписано в печать 18.02.2008. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,01. Заказ 159. 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