Автоматизация и Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

1

2014

Главный редактор
В.Л. Белоусов – д.э.н., проф., МГУПИ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бучаченко А.Л. – д.х.н., проф., ИПХФ РАН
Гусев А.А. – д.т.н., проф., МГТУ "СТАНКИН"
Дегтярев Ю.И. – д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. – д.т.н., Ин-т Инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. – д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Мальцева С.В. – д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Нефедов Е.И. – д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Шебалин И.Ю. – к.ф.-м.н., ООО "Изд-во Машиностроение" (заместитель главного редактора)
Янович Е.Л. – д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

РЕДАКЦИЯ:

Шебалин И.Ю. – зам. главного редактора
Осипова В.Г. – научный редактор
Богус С.В. – секретарь

Адрес редакции:
107076, Москва,
Стромынский пер., 4
Тел.: (499) 748 0290,
E-mail: ast@mashin.ru; http://www.mashin.ru

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НАУЧНО-КОНСУЛЬТАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗЫ

Журнал зарегистрирован 9 апреля 1999 г. за № 018684 в Комитете Российской Федерации по печати

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней

ООО "Издательство Машиностроение"

Адрес издательства:
107076, Москва,
Стромынский пер., 4
Тел.: (499) 268 3858,
факс: (499) 269 4897

© Издательство "Машиностроение", "Автоматизация и современные технологии", 2014 г.

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Иванов А.А. Робототехника в механообработке 3

Горячев О.В., Чадаев А.В. Анализ характеристик привода стабилизации и наведения оптико-электронного модуля с различными алгоритмами управления 6

Антипин А.Ф. Системы управления технологическими процессами на базе многомерных логических регуляторов 12

Редькин А.В., Сорокин П.А. Управление стреловым краном с учётом дополнительных динамических нагрузок 19

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Корчак Е.С., Середа А.В. Современные технологии проектирования корпусов рабочих цилиндров мощных гидравлических прессов 22

Ивашов Е.Н., Князева М.П. Алгоритмы последовательных и параллельных вычислений на основе квантовых точек с изомерными ядрами 26

Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Алёшина А.А. Моделирование вибраций гидроагрегата на основе адаптивных динамических регрессий 30

Лебедев В.А. Энергосбережение при электродуговой механизированной и автоматической сварке с импульсной подачей электродной проволоки 34

Чернов С.А. Моделирование недеформируемых узловых соединений в стержневых системах 39

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Голосовский М.С. Модель жизненного цикла разработки программного обеспечения в рамках научно-исследовательских работ 43

ВЫСТАВКИ И ПРЕЗЕНТАЦИИ

Компания 3М расширяет локализацию научно-исследовательской базы в России 47

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 48

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

Ivanov A.A. Robotics in machining a workpiece 3

Goryachev O.V., Chadaev A.V. The characteristics analysis of the stabilization and guidance drive for optical-electronic module with various control algorithms 6

Antipin A.F. Control systems of technological processes on the basis of multidimensional logical regulators . . 12

Redkin A.V., Sorokin P.A. Control method of jib crane with the definition of additional dinamic loads 19

MODERN TECHNOLOGIES

Korchak E.S., Sereda A.V. Modern designing technologies of the working cylinder bodies for power hydraulic presses 22

Ivashov E.N., Knyazeva M.P. Algorithms of the serial and parallel calculation on the grounds of quantum dots with isomer kernels 26

Klyachkin V.N., Kuvayskova Yu.E., Aleshina A.A. The hydraulic unit vibration modelling on the grounds of adaptive dynamic regresses 30

Lebedev V.A. Energy saving at the mechanized and automatic arc welding with pulse wire feed 34

Chernov S.A. Modeling of not deformable nodal connections in rod systems 39

ECONOMICS AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Golosovskiy M.S. Life cycle model of the software development within scientifically-research works 43

ВЫСТАВКИ И ПРЕЗЕНТАЦИИ

The company 3M expands the location of the research base in Russia 47

SURVEY OF PERIODICALS

Periodicals review 48

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" – 70537, по каталогу "Пресса России" – 27838, по "Каталогу российской прессы "Почта России" – 60267) или непосредственно в издательстве по факсу: (499) 269 4897, по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (499) 269 6600, 269 5298

Сдано в набор 01.11.13. Подписано в печать 23.12.13.
Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 5,88. Цена свободная

Отпечатано в ООО "Белый ветер"
115407, Москва, Нагатинская наб., 54

Перепечатка материалов из журнала "Автоматизация и современные технологии" возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал "Автоматизация и современные технологии" обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель

© Издательство "Машиностроение", "Автоматизация и современные технологии", 2014 г.

УДК 658.527.011

А.А. Иванов, д-р техн. наук, проф.
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)
ivanov_aa@nntu.nnov.ru

РОБОТОТЕХНИКА В МЕХАНООБРАБОТКЕ

Показано применение промышленных роботов на технологических операциях механообработки различных заготовок в качестве сервисного оборудования, т. е. загрузки–разгрузки отдельных многооперационных станков с ЧПУ и линий.

Ключевые слова: промышленный робот, станок, базовый комплект, производственный модуль.

Use of industrial robots on technological operations in machining various blanks in the capacity of the service equipment, i.e. for loading/unloading separate multioperation CNC machines and production lines is shown.

Key words: industrial robot, machine tool, basic set, production module.

Механообработка относится к основному производству машиностроительных предприятий, которое включает различные виды металлорежущего оборудования. Основу обрабатывающего производственного модуля составляет базовый комплект, включающий металлорежущий станок с ЧПУ или обрабатывающий центр с операционным накопителем (ОН) заготовок и обслуживающий его ПР. Связь модулей между собой и с автоматизированным складом осуществляется транспортными роботами [1–3].

На примере модуля токарной обработки проследим его эволюцию до стадии организации крупного производственного комплекса при добавлении других станков и транспортно-накопительной системы (рис. 1). Подобные комплексы позволяют непрерывно и последовательно обрабатывать большую номенклатуру заготовок. Модуль

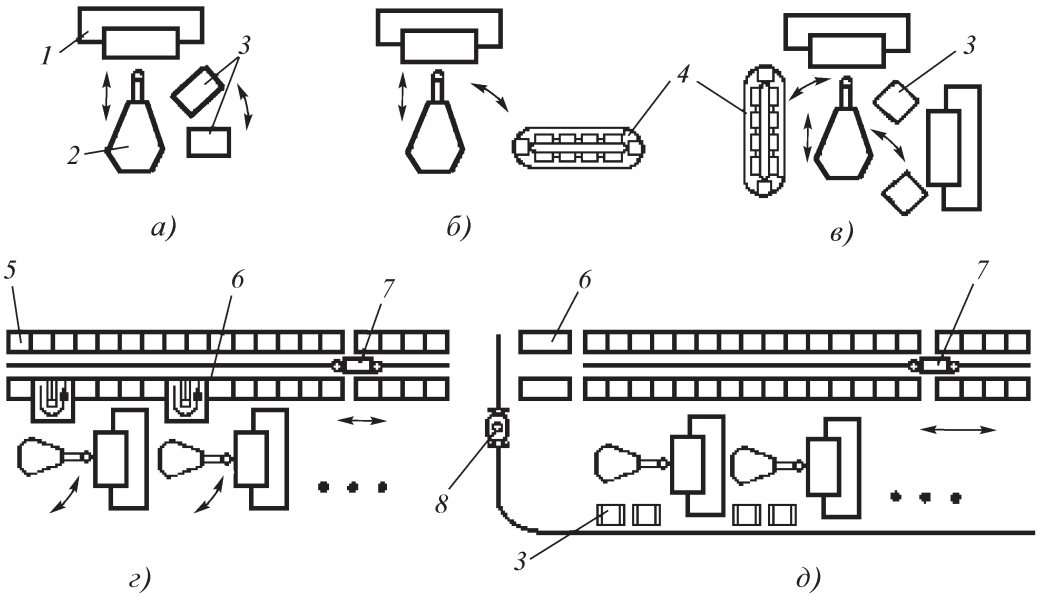


Рис. 1. Этапы эволюции модуля токарной обработки до организации крупного производственного комплекса:
а – с одним станком и минимальным операционным накопителем; *б* – с одним станком и операционным накопителем большой ёмкости; *в* – с двумя станками и большим накопителем; *г* – с группой станков и накопителем типа автоматизированного склада; *д* – то же с добавлением транспортного робота

с одним станком *1*, который обслуживается роботом *2*, и операционным накопителем *3* минимальной ёмкости представляет собой классический РТК (рис. 1, *а*). По схеме на рис. 1, *б* модуль использует накопитель большей ёмкости *4*. Компоновочная схема с двумя станками содержит минимальный *3* и большой *4* накопители (рис. 1, *в*). Схема объединения модулей в производственный комплекс уровня гибкого производственного комплекса (ГПК) представлена на рис. 1, *г*. Эта компоновка предполагает наличие на автоматизированном складе *5* приёмно-передающих устройств (ППУ) *6* в зоне каждого модуля. ППУ обслуживает складской робот *7*. В более мощном ГПК предусмотрены транспортные роботы *8*, которые взаимодействуют с ППУ *6* склада и ОН *3* станков (рис. 1, *д*).

В РТК токарной обработки преимущественно используются подвесные двурукие (или двухзахватные) ПР *4* для загрузки коротких заготовок *3* в патрон шпинделя станка *1* (рис. 2, *а*) и длинных валов в центры (рис. 2, *б*). Общие виды РТК обработки тел вращения с роботами портального и напольного типа и компоновочная схема РТК с двухзахватным ПР, смонтированным на шпиндельной бабке токарного станка, приведены в работе [1]. Двурукий (двухзахватный) ПР позволяет сократить цикл обслуживания станка примерно в два раза по сравнению с одноруким ПР.

Двухзахватный подвесной робот *2* входит в состав РТК, содержащего два станка *1* с ЧПУ и операционный накопитель кассетного типа *3* (рис. 3).

Кассеты с заготовками доставляются и отправляются с готовыми деталями транспортным роботом *4*. Представленный вариант компоновки РТК требует значительных затрат времени обслуживающего ПР на доставку к станкам заготовок и отвод деталей. Это время может быть сокращено за счёт размещения кассет непосредственно у каждого станка. Тогда трасса обслуживающего ПР может быть сокращена не менее чем в два раза. В этом случае целесообразно рассмотреть альтернативный вариант с напольным роботом. Однако этот вариант осложняет работу транспортного робота по доставке кассет с заготовками и деталями. При выборе вариантов компоновки следует учитывать удобство отвода стружки от станков РТК (магистраль *5*). Подобные задачи оптимизации варианта компоновки производственных систем уровня РТК и ГПК решаются методом компьютерного моделирования.

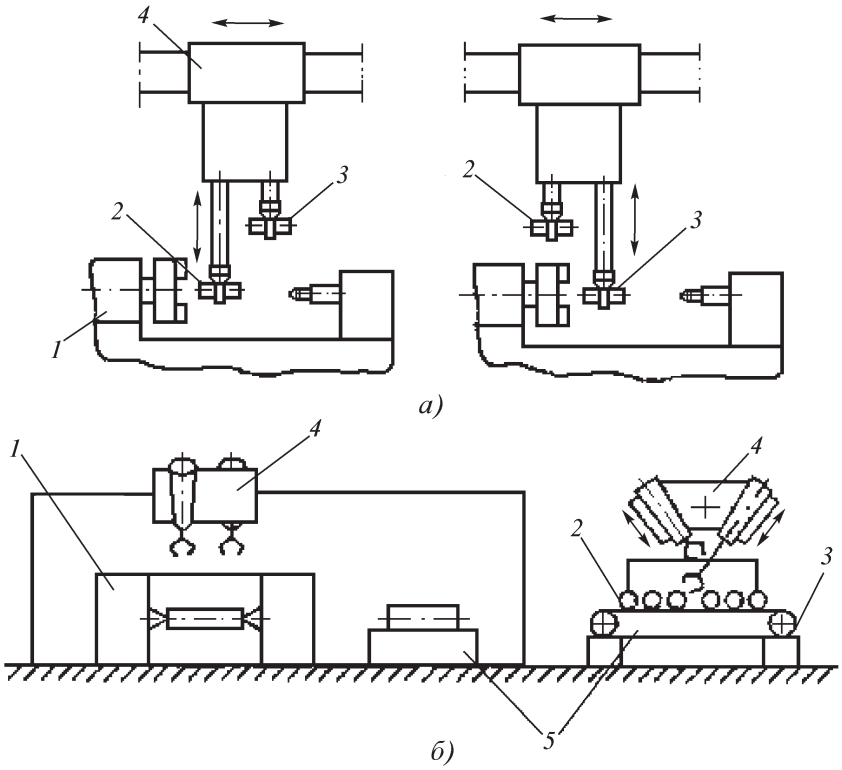


Рис. 2. Схема загрузки коротких цилиндрических заготовок в патрон шпинделя станка (*а*) и длинных валов в центры станка (*б*):
1 – токарный станок; *2* – деталь; *3* – заготовка; *4* – двурукий робот; *5* – операционный накопитель

Вариант компоновки РТК с роботом напольного типа *2* предназначен для токарной обработки деталей двух типов: ступенчатого валика *6* и фланца *7* (рис. 4). Кроме станка с ЧПУ *1* и обслуживающего робота, РТК содержит: измерительное устройство *4*, конвейер кассет с заготовками *3* и готовыми деталями *5*. Для выполнения полного цикла обработки ПР после первой операции снимает заготовку со станка, разворачивает её и вновь устанавливает в позицию обработки. Готовые детали переносятся роботом в измерительное устройство и при соответствии их параметров техническим условиям укладываются в кассеты. Забракованные детали выгружаются в изолятор брака.

Выбор РТК с линейным или круговым накопителем спутников существенно влияет на организационно-структурную схему ГПК, связанную с привязкой и объёмом накопителей спутников. Считается, что круговой накопитель обеспечи-

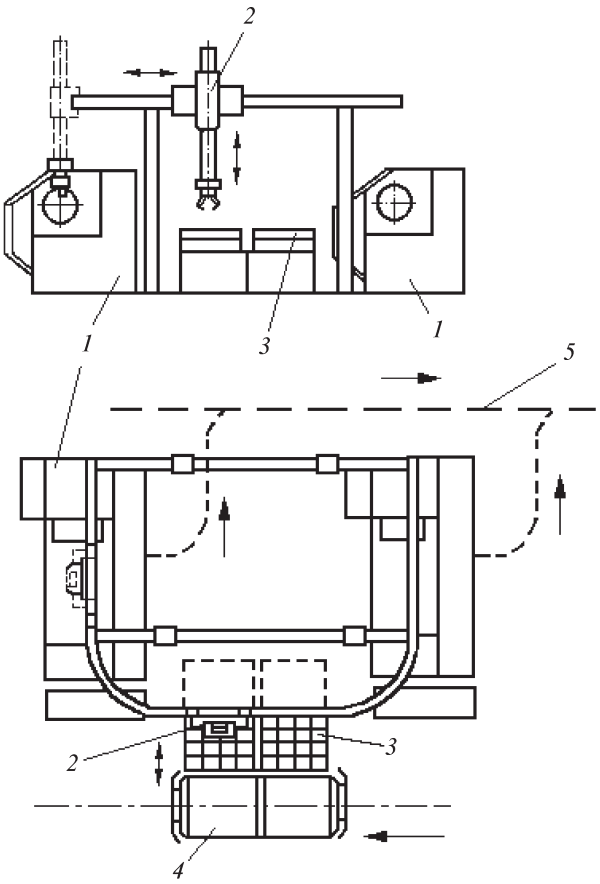


Рис. 3. Компоновка РТК, состоящего из двух станков с ЧПУ, двухзахватного подвесного робота и операционного накопителя кассетного типа:
1 – станок; *2* – робот; *3* – кассетный накопитель; *4* – транспортный робот; *5* – магистраль для отвода стружки от станков

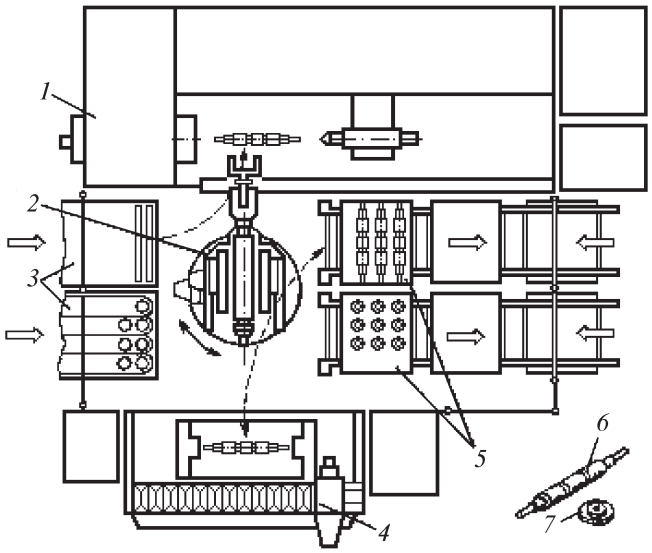


Рис. 4. Компоновка РТК токарной обработки деталей двух типов с роботом напольного типа и измерительным постом:
1 – станок; *2* – робот; *3*, *5* – конвейеры кассет с заготовками и деталями; *4* – измерительное устройство; *6*, *7* – детали

вает определённую экономию производственной площади, а линейный накопитель имеет большую гибкость.

Варианты роботизированных производственных систем механообработки с линейным расположением станков, локальными накопителями заготовок и деталей и транспортно-загрузочными роботами приведены на рис. 5 и 6.

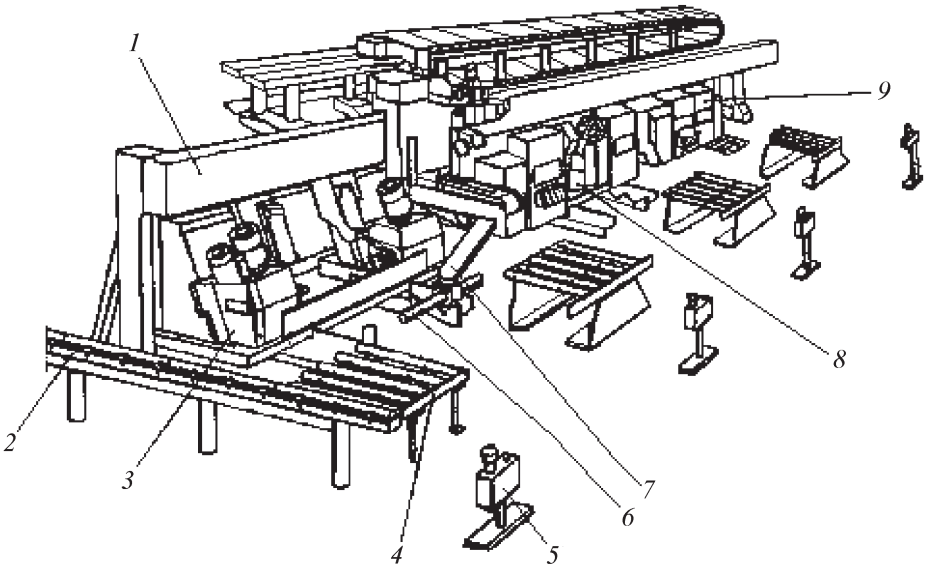


Рис. 5. Общий вид роботизированной производственной системы для обработки валов электродвигателей:
1 – монорельс; *2* – конвейер для подачи заготовок; *3* – фрезерно-центровальный станок; *4* – локальный накопитель; *5* – фотодатчик зоны защиты; *6* – заготовка вала; *7* – подвесной транспортно-загрузочный робот; *8*, *9* – токарные станки модели 1Б732Ф3

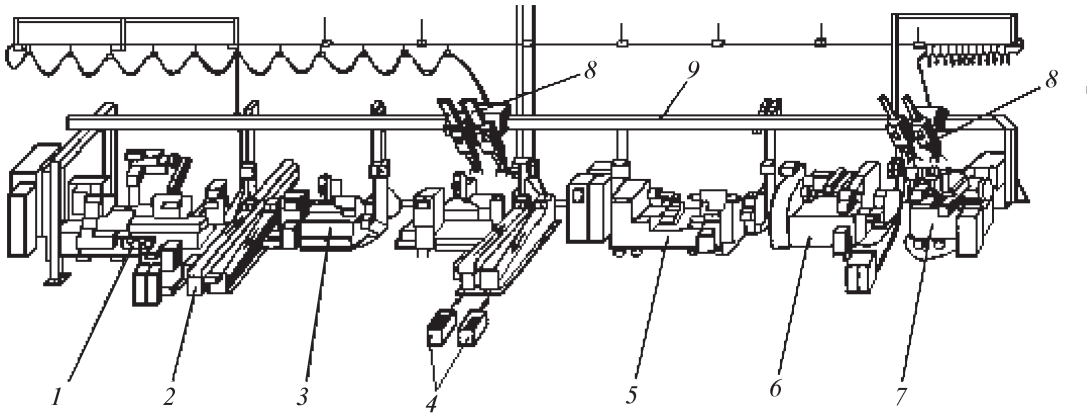


Рис. 6. Общий вид роботизированной производственной системы механообработки с линейным расположением станков: *1* – круглошлифовальный станок; *2* – двухручьевой конвейер; *3* – зубофрезерный станок; *4* – тара с деталями; *5* – токарно-винторезный станок; *6* – токарно-копировальный станок; *7* – фрезерно-центровальный станок; *8* – двурукий подвесной робот; *9* – монорельс

Заключение. Представлены этапы эволюции производственного модуля механообработки (токарной) до стадии организации крупного производственного комплекса. Показаны варианты компоновки РТК с роботами напольного и подвесного типов, схемы объединения модулей в производственный комплекс уровня гибкой производственной системы. Обосновывается применение двурукого (двухзахватного) робота, который позволяет сократить цикл обслуживания станка примерно в два раза по сравнению с одноруким ПР.

Библиографические ссылки

1. **Иванов А.А.** Основы робототехники: учеб. пособие. М.: Форум, 2011. 224 с.

2. **Козырев Ю.Г.** Промышленные роботы: справочник. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.

3. **Попов Е.П., Письменный Г.В.** Основы робототехники. Введение в специальность:учеб. М.: Высш. шк., 1990. 224 с.

УДК 681.5.01

О.В. Горячев, д-р техн. наук, проф., **А.В. Чадаев**
(Тульский государственный университет)

chu666@yandex.ru

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДА СТАБИЛИЗАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ С РАЗЛИЧНЫМИ АЛГОРИТМАМИ УПРАВЛЕНИЯ

Проведён анализ характеристик привода стабилизации и наведения оптико-электронного модуля с различными алгоритмами управления при учёте реальных параметров блока инерциальных чувствительных элементов.

Ключевые слова: электрический привод, БИЧЭ, ПИД, квазиоптимальный по быстродействию.

The characteristics analysis of the stabilization and guidance drive for the optical-electronic module with various control algorithms taking into account the real block parameters of the inertial sensitive elements is carried out.

Key words: the electric drive, inertial sensible elements unit, PID, quasi-optimal on speed performance.

К приводам наведения и стабилизации, работающими на подвижном основании, предъявляют жёсткие требования по качеству переходных процессов и точности отработки входных сигналов. Заданные требования обеспечиваются на основе реализации алгоритмов управления, позволяющих оптимизировать характеристики приводов по совокупности критериев качества с учётом реализа-

ции предельных динамических возможностей исполнительных двигателей и ограничения мощности первичного источника энергии. Необходимым условием синтеза алгоритмов, реализующих управление, близкое к оптимальному, является наличие математической модели объекта управления, адекватной работе объекта в основных режимах и учитывающей процессы в силовой системе привода, а также характеристики используемых информационно-измерительных элементов.

В качестве информационно-измерительных элементов в приводах наведения и стабилизации, работающих на подвижном основании, используются блоки инерциальных чувствительных элементов (БИЧЭ), представляющие собой сложные динамические системы. Это обуславливает необходимость проведения синтеза алгоритмов управления и анализа характеристик привода с учётом реальных характеристик БИЧЭ. Кроме того, учитывая цифровую реализацию алгоритмов управления и фильтрации, параметры БИЧЭ не только существенно влияют на характеристики приводов наведения и стабилизации, но и определяют возможность реализации алгоритмов управления. Поэтому анализ характеристик привода системы стабилизации и наведения оптико-электронного модуля с различными алгоритмами управления при учёте реальных параметров БИЧЭ является актуальным.

БИЧЭ предназначен для измерения угловых скоростей вращения и ускорений линейных перемещений объекта управления по трём ортогональным осям. Прибор включает три микромеханических датчика угловой скорости (ДУС) относительно трёх ортогональных осей и три микромеханических акселерометра, которые осуществляют измерения по трём ортогональным осям. Остановимся на рассмотрении принципа функционирования БИЧЭ в качестве ДУС горизонтального канала наведения. БИЧЭ, с точки зрения обработки сигнала от инерциального датчика, реализует следующий алгоритм, заявленный разработчиком:

аналоговый выходной сигнал датчиков фильтруется антиалиасинговыми фильтрами и поступает на вход АЦП;

данные из АЦП, оцифрованные с частотой $f_{АЦП}$, фильтруются цифровым IIR фильтром;

прореженные в n раз выходные данные из фильтра нормируются калибровочными матрицами. Из полученных значений формируются выходные пакеты данных прибора, которые выдаются на частоте f. Задержка между данными на выходе фильтра и выходе прибора составляет τ мс.

В структурной схеме БИЧЭ (рис. 1) учитывается наличие антиалиасингового фильтра Баттерворта, АЦП, IIR-фильтра, задержки сигнала на выходе и нормирование выходных данных (введением шумовой составляющей).

На рис. 1 изображены блоки, выполняющие следующие функции:

Butterworth – моделирование антиалиасингового фильтра Баттерворта;

ADC, discrete_uroven – моделирование АЦП: введение такта дискретизации по времени и шага дискретизации по уровню;

IIR-filter – моделирование цифрового IIR-фильтра;

IIR – моделирование дискретности выдачи данных с IIR-фильтра по времени;

delay_1, delay_2 – моделирование задержки между сигналами на выходе IIR-фильтра и прибора;

Band-Limited White Noise, form_filter – моделирование случайной шумовой составляющей на выходе прибора.

В качестве алгоритмов формирования управляющих воздействий в приводах наведения и ста-

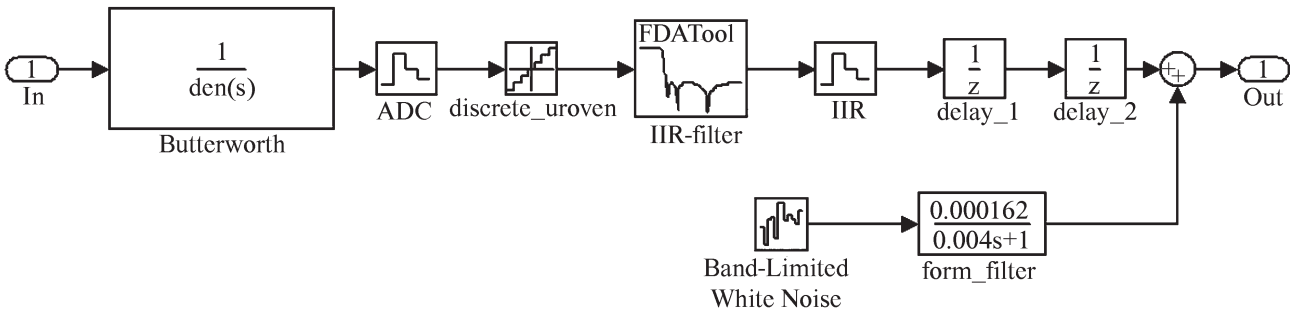


Рис. 1. Структурная схема модели блока инерциальных чувствительных элементов

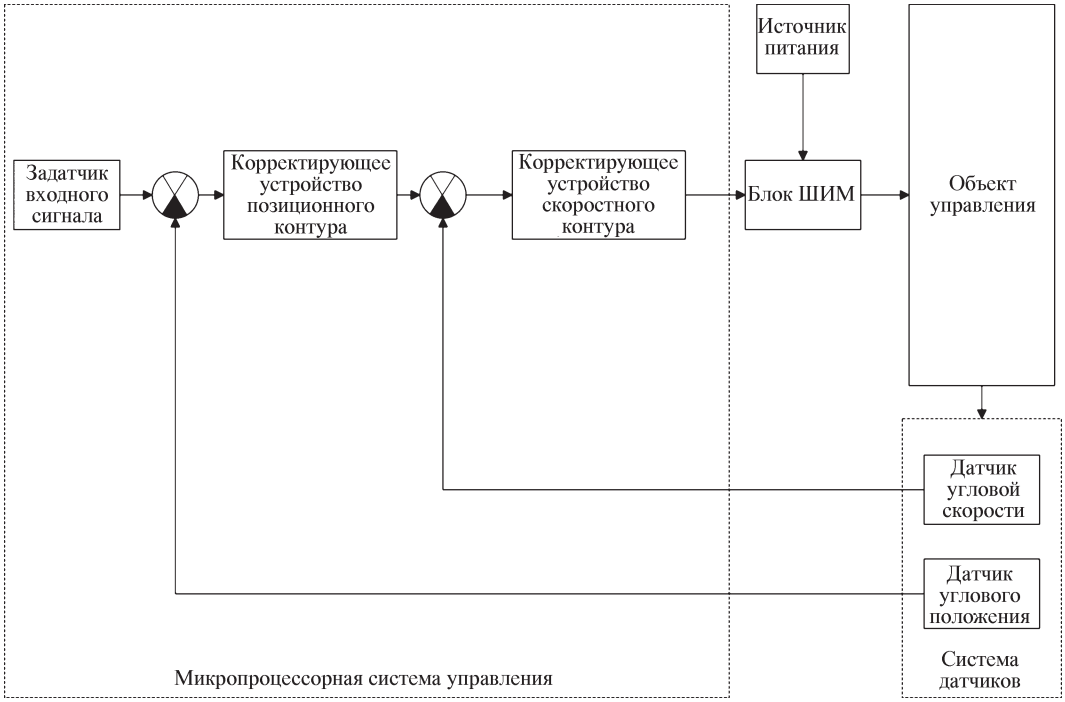


Рис. 2. Функциональная схема привода с ПИД-алгоритмом управления

билизации оптико-электронных систем (ОЭС) получили распространение алгоритмы, основанные на расчёте величин ошибки, скорости изменения и интеграла от сигнала ошибки (ПИД-алгоритмы управления) и квазиоптимальные по быстродействию алгоритмы управления. Проанализируем влияние, оказываемое параметрами БИЧЭ на характеристики приводов наведения и стабилизации ОЭС, для реализации которых используются следующие алгоритмы.

ПИД-алгоритм управления. В соответствии со стандартной методикой [1] синтез ПИД-алгоритма управления сводится к выбору корректирующего устройства, реализация которого позволяет получить систему, удовлетворяющую требованиям технического задания по качеству переходного процесса и точности отработки входных сигналов.

Функциональная схема привода с ПИД-алгоритмом управления приведена на рис. 2.

В качестве корректирующего фильтра для скоростного контура следящей системы предлагается использовать изодромное звено:

$$W_{\text{из}}(p) = K_{\text{из}} \frac{T_{\text{из}}\, p+1}{p}. \qquad (1)$$

Фильтр вносит в контур астатизм первого порядка, что сводит к нулю ошибку при отработке ступенчатых входных сигналов по скорости. Для получения максимального коэффициента по контуру постоянная времени изодромного звена выбирается равной электромеханической постоянной времени, т. е. $T_{\text{из}}$ компенсирует наибольшую постоянную времени в передаточной функции "двигатель–нагрузка" [1]. Суммарная фазовая характеристика не пересекает –180°, поэтому при достаточно больших коэффициентах контур устойчив. Коэффициент усиления фильтра необходимо подбирать, исходя из требований по времени регулирования при отработке ступенчатого скоростного сигнала и точности стабилизации привода в условиях качки.

В качестве фильтра в позиционном контуре используется безынерционное звено, коэффициент передачи которого выбран на основе анализа псевдочастотных характеристик контура, исходя из условия обеспечения требуемого качества переходного процесса и точности отработки входных сигналов.

Результаты моделирования привода с ПИД-алгоритмом управления при отработке ступенчатого входного сигнала по скорости приведены на рис. 3.

Характеристики переходного процесса на рис. 3, *а*: время регулирования 0,1 с, перерегулирование 3,5 %. Характеристики переходного процесса на рис. 3, *б*: время регулирования 0,1 с, перерегулирование 15 %.

Моделирование привода с ПИД-алгоритмом управления позволило получить следующие результаты.

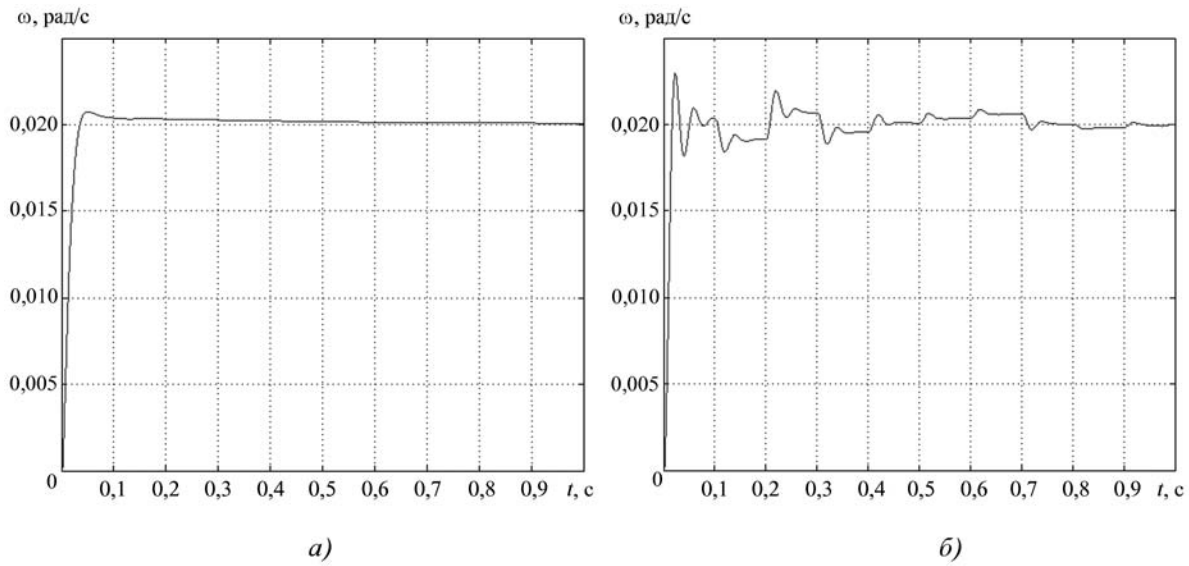


Рис. 3. Отработка ступенчатого сигнала по скорости с амплитудой 0,02 рад/с при идеальном варианте представления БИЧЭ (*а*) и при учёте реальных характеристик БИЧЭ (частота выдачи данных равна 2 кГц) (*б*)

Для варианта идеального представления БИЧЭ:

отработка ступенчатого сигнала по углу с амплитудой 1,57 рад: время регулирования 2,5 с, перерегулирование 0 %;

максимальная ошибка при отработке бортовой качки не превышает 0,1 мрад;

максимальная ошибка при отработке типового сигнала арктангенса не превышает 0,1 мрад.

При учёте реальных характеристик БИЧЭ (частота выдачи данных равна 2 кГц):

отработка ступенчатого сигнала по углу с амплитудой 1,57 рад: время регулирования 2,7 с, перерегулирование 0 %;

максимальная ошибка при отработке бортовой качки не превышает 0,6 мрад;

максимальная ошибка при отработке типового сигнала арктангенса не превышает 0,5 мрад.

Таким образом, реализация ПИД-алгоритма управления позволяет получить работоспособную систему, удовлетворяющую всем требованиям. Следует заметить, что в процессе моделирования системы с ПИД-алгоритмом в схему вводится компенсирующая связь, представляющая собой скорость изменения входного сигнала, что позволяет увеличить точность отработки сигнала арктангенса.

Квазиоптимальный по быстродействию закон управления. Квазиоптимальный по быстродействию закон для исследуемой системы с учётом влияния малой постоянной времени имеет вид, синтезированный по методике [2]:

$$U = K\,A\,\mathrm{sign}\,(\varphi_{\text{вх}} - \varphi + (\dot{\varphi}_{\text{вх}} - \omega)\,\tau + T\,((\dot{\varphi}_{\text{вх}} - \omega) + \frac{1}{T}(\omega - K_i\,I)\,\tau) - KAT \times$$
$$\times \ln\left(\frac{\left|(\dot{\varphi}_{\text{вх}} - \omega) + \frac{\tau}{T}(\omega - K_i\,I)\right| + KA}{K\,A}\right) \mathrm{sign}\,((\dot{\varphi}_{\text{вх}} - \omega) + \frac{\tau}{T}(\omega - K_i\,I)),$$

где U – расчётное напряжение на выходе реле; K – коэффициент передачи двигателя; A – питающее напряжение; τ – величина упреждения; T – приведённая электромеханическая постоянная времени; $\varphi_{\text{вх}}$ – входной сигнал; φ – угол поворота вала нагрузки; ω – угловая скорость вала нагрузки; I – ток в обмотках статора двигателя.

Функциональная схема привода с квазиоптимальным по быстродействию алгоритмом управления приведена на рис. 4.

Для получения характеристик, удовлетворяющих требованиям технического задания по качеству переходных процессов и точности отработки входных сигналов в системе с учётом параметров БИЧЭ, рекомендуется скорректировать квазиоптимальный по быстродействию закон управления. Корректировка заключается в модификации вида линии переключения изменением величины упреждения τ. Графически на фазовой плоскости данная операция представляется изменением угла наклона линии переключения. Подходящая величи-

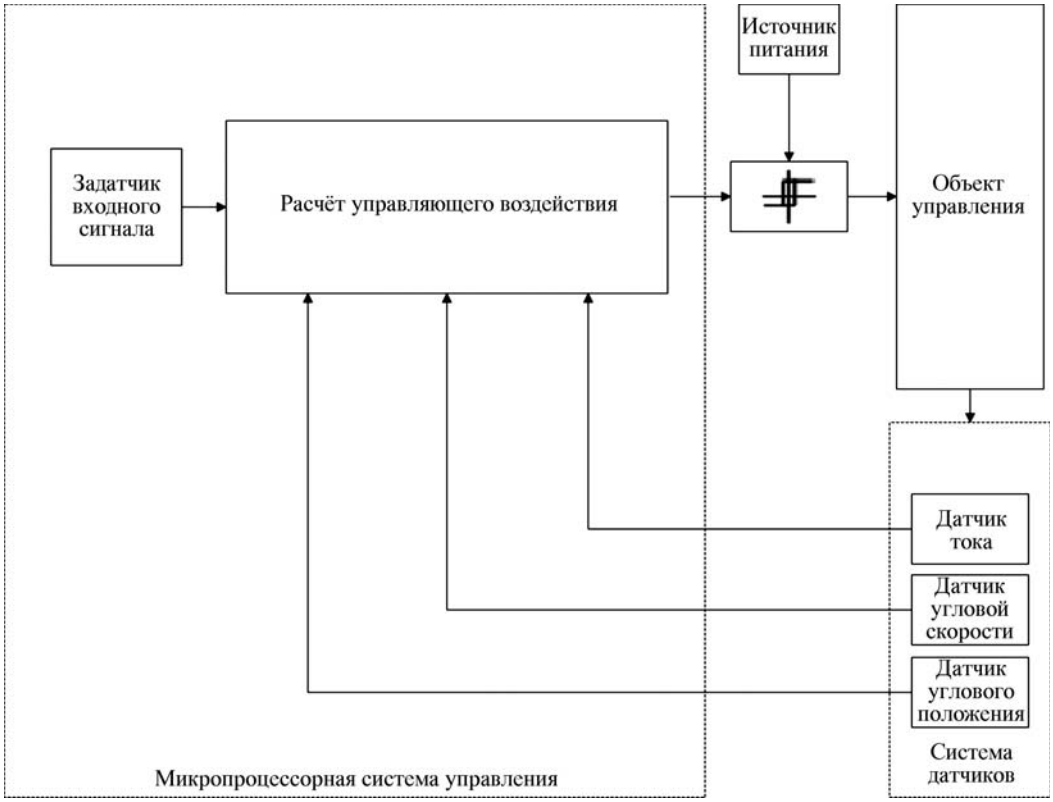


Рис. 4. Функциональная схема привода с квазиоптимальным по быстродействию алгоритмом управления

на упреждения подбирается таким образом, чтобы скорректированная система, моделирующая реальные характеристики БИЧЭ, удовлетворяла требованиям технического задания. Экспериментальное исследование показало, что увеличение τ приводит к следующим результатам:

затягивается время переходного процесса при отработке входных сигналов;

увеличивается частота автоколебаний по току;

увеличивается статическая точность отработки входных сигналов;

уменьшается точность стабилизации ОУ в условиях действия качки.

Таким образом, задача корректировки закона управления сводится к выбору величины упреждения τ, при которой обеспечивается требуемая статическая точность отработки входных сигналов и точность стабилизации в условиях действия качки, а также достигается требуемое качество переходных процессов.

Исходя из изложенного выше, подобрана компромиссная величина упреждения $\tau_{мод}$. Результаты моделирования привода с квазиоптимальным по быстродействию алгоритмом управления при отработке бортовой качки приведены на рис. 5.

На рис. 5, *а* максимальная ошибка при отработке бортовой качки не превышает 0,001 мрад.

Моделирование привода с квазиоптимальным по быстродействию алгоритмом управления позволило получить следующие результаты.

Для варианта идеального представления БИЧЭ:

отработка ступенчатого сигнала по углу с амплитудой 1,57 рад: время регулирования 0,4 с, перерегулирование 0 %;

отработка ступенчатого сигнала по скорости с амплитудой 0,02 рад/с: время регулирования 0,006 с, перерегулирование 60 %;

максимальная ошибка при отработке типового сигнала арктангенса не превышает 0,1 мрад.

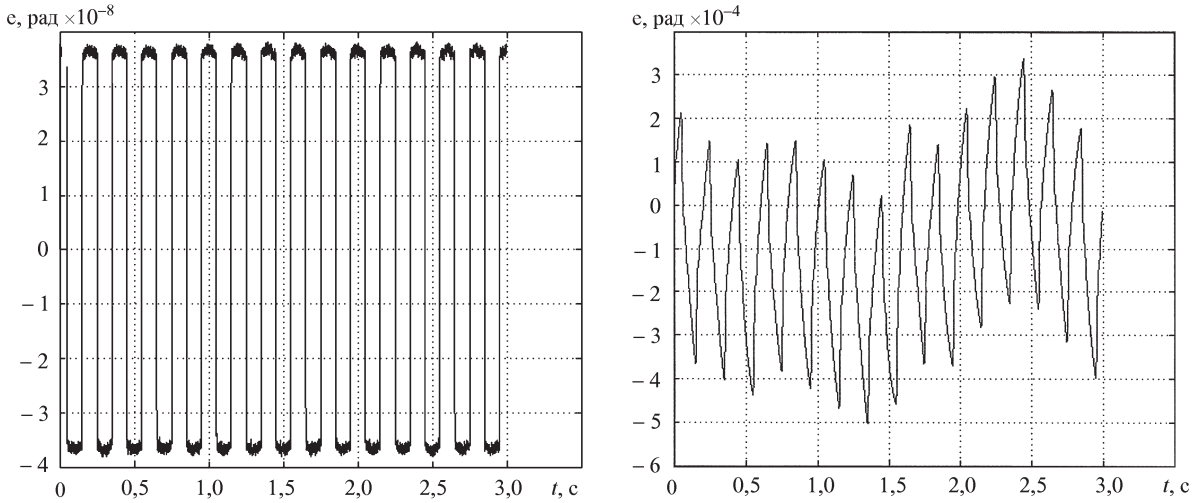
При учёте реальных характеристик БИЧЭ (частота выдачи данных равна 2 кГц):

отработка ступенчатого сигнала по углу с амплитудой 1,57 рад: время регулирования 0,9 с, перерегулирование 0 %;

отработка ступенчатого сигнала по скорости с амплитудой 0,02 рад/с: время регулирования 0,2 с, перерегулирование 60 %;

максимальная ошибка при отработке типового сигнала арктангенса не превышает 3 мрад.

Таким образом, корректировка закона управления позволяет добиться приемлемых результатов



а) *б)*

Рис. 5. Ошибка отработки бортовой качки при идеальном варианте представления БИЧЭ (*а*); при учёте реальных характеристик БИЧЭ (частота выдачи данных равна 2 кГц) (*б*)

во всех режимах, кроме отработки арктангенса. Последующее изменение величины упреждения не позволяет улучшить исследуемые характеристики. Следовательно, в данном случае при применении указанного метода коррекции закона управления невозможно получить систему, полностью удовлетворяющую требованиям технического задания.

Анализируя полученные характеристики, можно сделать вывод о предпочтительности использования ПИД-алгоритма при построении систем управления оптико-электронными модулями с использованием БИЧЭ. Расчёты показали, что при увеличении частоты опроса БИЧЭ до 10 кГц квазиоптимальный по быстродействию алгоритм управления позволяет получить лучшие результаты. Однако в реальных системах при частоте опроса БИЧЭ, не превышающей 2 кГц, рекомендуется использование ПИД-алгоритма. В процессе проектирования синтезируются корректирующие устройства, которые позволяют реализовать систему, удовлетворяющую требованиям технического задания как при наличии допущений об идеальности датчиков, так и при учёте реальных характеристик БИЧЭ. При отработке некоторых сигналов сложной формы требуется введение компенсирующей связи, позволяющей увеличить точность системы.

Библиографические ссылки

1. **Методы** инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. Ч. II. Вычислительно-аналитический эксперимент: аппарат матричных операторов и вычислительные технологии / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 416 с.

2. **Методы** классической и современной теории автоматического управления: учеб. 2-е изд., перераб. и доп. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присылаемых для публикации, можно найти на сайте **www.mashin.ru**

УДК 681.5

А.Ф. Антипин, канд. техн. наук
(Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета)
andrejantipin@ya.ru

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА БАЗЕ МНОГОМЕРНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Рассмотрены особенности реализации систем управления технологическими процессами на базе многомерных логических регуляторов с компенсацией взаимного влияния контуров регулирования. Приведены результаты вычислительного эксперимента применительно к системе управления элементом дистилляции.

Ключевые слова: нечёткие регуляторы, многомерный логический регулятор, алгоритм фаззификации, логическое управление элементами дистилляции.

Realization features of the technological processes control systems on the grounds of multidimensional logic regulators with compensation of the adjustment loops mutual influence are considered. The computing experiment results with regard to a distillation element control system are adduced.

Key words: fuzzy regulators, multidimensional logic regulator, fuzzification algorithm, logical control of distillation elements.

Введение. В настоящее время в технологии автоматизации сложных объектов и процессов (паровые котлы, карбонизационные и дистилляционные колонны, интеллектуальные роботы и т. д.) сложилась устойчивая тенденция к использованию одномерных логических регуляторов. Как правило, подобные объекты удаётся описать лишь вербально, к тому же подавляющее большинство из них являются многомерными со взаимосвязанными регулируемыми параметрами. Основной недостаток такого подхода состоит в автоматизации многомерных систем при помощи сепаратных регуляторов, выходы которых независимы.

Кроме того, многомерные системы имеют ряд особенностей, главная из которых – значительное взаимное влияние контуров регулирования при поддержании значений технологических параметров в требуемом диапазоне. Таким образом, при создании многомерных регуляторов основной проблемой являются перекрёстные связи, а задачей синтеза многомерной системы является компенсация взаимного влияния каналов регулирования за счёт введения дополнительных компенсирующих связей.

Современные многомерные регуляторы не позволяют с требуемой точностью устранить взаимное влияние контуров регулирования, что особенно проявляется в управлении многомерными объектами, представленными в виде описания на естественном языке.

Управление технологическими процессами на базе многомерных логических регуляторов (МЛР) с компенсацией взаимного влияния контуров регулирования является актуальной научной задачей, решение которой позволит повысить качество управления технологическими процессами, описанными вербально, и улучшить параметры данного вида регуляторов.

Нечёткие регуляторы и системы управления технологическими процессами на базе нечёткой логики. Известны четыре типа нечётких регуляторов [1, 2].

1. *Нечёткий регулятор с чёткой обратной связью* является первым логическим регулятором, основанным на теории нечёткой логики, получившим практическое применение. Регуляторы данного типа не требуют строгой математической модели объекта управления и позволяют реализовать регулирование значений непрерывных величин по информации, описывающей объект управления вербально.

Недостатками данного типа регуляторов являются: текущее и заданное значения непрерывной физической величины сравниваются в регуляторе дважды, что повышает время отклика системы регулирования; высокая погрешность дефаззификации непрерывной величины (расхождение значений при использовании разных методов дефаззификации достигает 25 %).

2. *Нечёткий регулятор, как расширение классического регулятора,* получил широкое распространение в качестве модуля для автоматической подстройки параметров ПИ- и ПИД-регуляторов, сохранив при этом все основные недостатки нечёткого регулятора с чёткой обратной связью.

3. *Самоорганизующиеся нечёткие регуляторы и системы управления на базе нечёткой логики* являются ступенью развития нечётких регуляторов с чёткой обратной связью в качестве адаптивных контроллеров и широко применяются в регулировании сложных процессов, которые не поддаются математическому моделированию, а также процессов с широким диапазоном изменения значений выходных параметров. Из регуляторов данного типа выделяют:

самоорганизующийся комбинированный регулятор с квантификаторами, для которого характерна более точная настройка базы правил для различных ситуаций. Программная реализация требует много памяти, но при этом точность результатов дефаззификации достаточно низкая, что вызвано использованием нечётких термов;

самоорганизующийся регулятор с самообучением характеризуется наличием эвристической базы знаний в виде системы продукционных правил. Можно выделить следующие недостатки этого регулятора:

текущее и заданное значения регулируемой величины сравниваются дважды;

ограничение области применения в связи с использованием автономного сравнивающего устройства;

высокое время сканирования системы продукционных правил и низкая точность выходных данных.

4. *Нечёткий логический регулятор с лингвистической обратной связью,* основным преимуществом которого является возможность регулирования значений непрерывных физических величин по информации, описывающей объект управления вербально, не требует строгой математической модели. Главной особенностью регуляторов данного типа является отсутствие чёткого сравнивающего устройства, что позволяет сравнить текущее и заданное значения регулируемых величин в антецедентах продукционных правил, а также исключить дублирование операций сравнения и минимизировать время отклика системы регулирования. Недостатками являются:

сложный и трудоёмкий в реализации алгоритм дефаззификации значений физических величин, который характеризуется низкой точностью вычислений;

необходимость обработки всей системы продукционных правил в каждом цикле сканирования, что негативным образом влияет на время отклика системы регулирования.

Дискретно-логические регуляторы (ДЛР) [3] являют собой альтернативную ступень развития нечётких регуляторов в плане повышения основных характеристик и устранения недостатков, таких как низкая точность дефаззификации и высокое время отработки продукционных правил. Главное отличие ДЛР заключается в том, что лингвистические переменные представлены в виде совокупности чётких термов, которые по своей логической природе являются аргументами двузначной логики.

К достоинствам ДЛР можно отнести следующее:

снижение времени отработки системы продукционных правил, вызванное отработкой только части системы;

использование ANY-TIME алгоритма позволяет снизить продолжительность процедур фаззификации на 30–40 %, что в 2,5 раза снижает время отклика и повышает точность регулирования.

При реализации систем управления на базе многомерных ДЛР следует отметить высокую сложность реализации системы продукционных правил ДЛР и отсутствие специализированного программного обеспечения для разработки регуляторов данного типа.

Концепция построения системы управления на базе МЛР. В ДЛР каждому терму физической величины на заданном отрезке числовой оси отводится отдельный участок, который не перекрывается соседними термами. Данное обстоятельство позволяет каждое значение непрерывной величины представить одним и только одним термом, что наиболее адекватно идентифицирует эту величину в виде совокупности аргументов двузначной логики.

Способ интерпретации физической величины x эквивалентной совокупностью термов T представлен на рис. 1, где изображена числовая ось величины x с расположенными на ней термами $T_1^x - T_n^x$, для каждого из которых однозначно определён покрываемый им отрезок этой оси. Например, на рис. 1, *а* терм T_2^x покрывает на оси отрезок $x_1 \le x < x_2$.

Значения x_0 и x_n определяют диапазон распределения термов T физической величины x на числовой оси.

Нумерация термов может производиться как с начала, так и с конца диапазона значений физической величины x, что позволяет задать порядок распределения термов T.

Включение x_1, x_2, ..., x_{n-1} в диапазоны значений тех или иных отрезков на числовой оси позволяет задать характер определения принадлежности термов T.

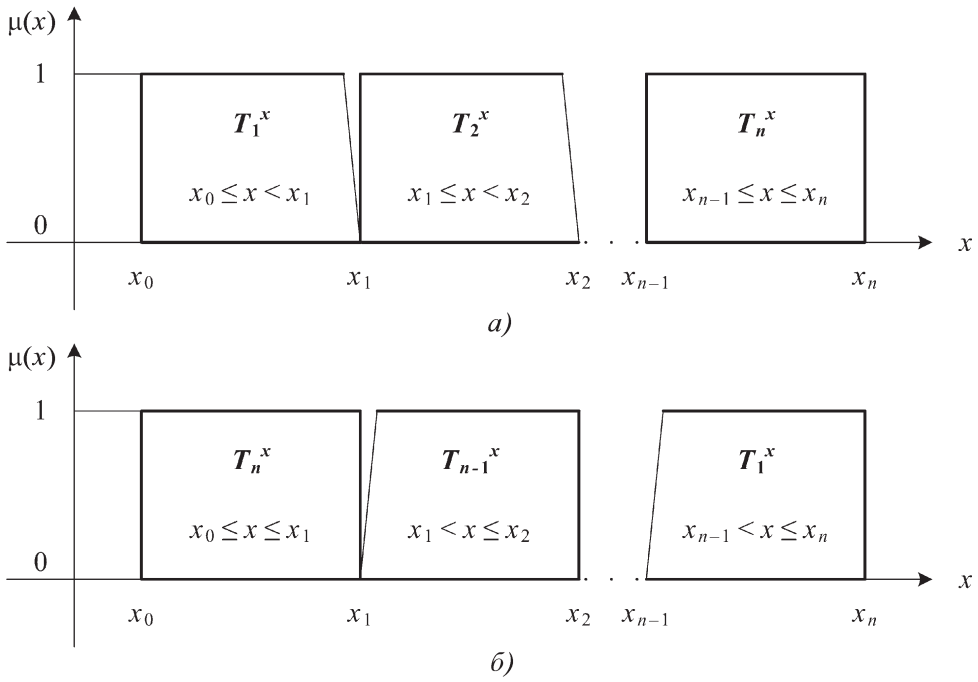


Рис. 1. Способ интерпретации непрерывной физической величины *x* в виде совокупности термов *T* с прямым (*а*) и обратным (*б*) порядком распределения термов, а также с прямым (*а*) и обратным (*б*) характером определения их принадлежности

Например, в случае прямого порядка распределения термов *T* физической величины *x* при прямом характере определения их принадлежности терм-множество T^x аналитически можно представить в виде

$$T^x = \{T_1^x(x_0 \le x < x_1),$$
$$T_2^x(x_1 \le x < x_2),\ \ldots,\ T_n^x(x_{n-1} \le x \le x_n)\},$$

а при обратном характере в виде

$$T^x = \{T_1^x(x_0 \le x \le x_1),$$
$$T_2^x(x_1 < x \le x_2),\ \ldots,\ T_n^x(x_{n-1} < x \le x_n)\}.$$

Разработанный МЛР является альтернативной ступенью развития нечётких регуляторов и ДЛР, где основной упор делается на повышение быстродействия системы автоматического регулирования и компенсацию взаимного влияния контуров регулирования [4]. Отличительная особенность структуры МЛР – отсутствие элементов обработки системы продукционных правил в блоке логического вывода (БЛВ). В каждом цикле работы регулятора в процессе фаззификации значений непрерывных величин формируется идентификационный номер продукционного правила, предназначенный для определения комбинации значений управляющих воздействий МЛР (хранятся в многомерном массиве или базе данных) в текущий момент времени *t*. На рис. 2 представлена развёрнутая схема МЛР.

Концепция построения системы управления на основе МЛР состоит из следующих базовых положений:

текущее и заданное значения непрерывных физических величин сравниваются единожды – в условной части системы фаззификаторов МЛР в процессе интерпретации числовых величин эквивалентными совокупностями термов;

для повышения быстродействия процедуры фаззификации непрерывных физических величин её необходимо прервать после определения терма, значение которого равно логической единице;

в любой момент времени существует один и только один терм в совокупности термов, определяющих физическую величину, значение которого равно логической единице. Значения остальных термов в указанной совокупности в данный момент *t* равны логическому нулю. Данное положение следует из того факта, что любая непрерывная физическая величина в момент *t* может иметь одно и только одно чёткое значение;

в любой момент *t* система продукционных правил МЛР, относящаяся к конкретной регулируемой величине, содержит одно и только одно правило, антецедент которого равен логической единице. Таким образом, в каждом цикле достаточно определить только истинное правило, а не обрабатывать систему продукционных правил целиком, что может быть достигнуто в результате введения соответствующего механизма.

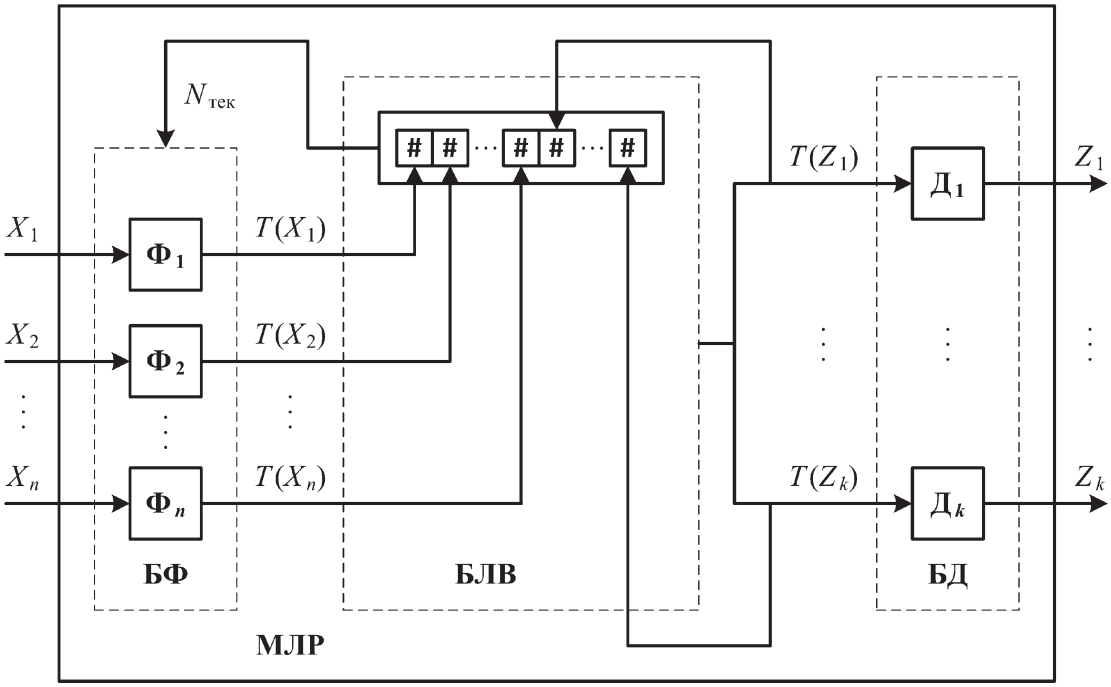


Рис. 2. Развёрнутая схема многомерных логических регуляторов:
$Ф_1, Ф_2, \ldots, Ф_n$ и $Д_1, Д_2, \ldots, Д_k$ – фаззификаторы и дефаззификаторы МЛР; БФ и БД – блоки фаззификации и дефаззификации, состоящие из фаззификаторов $Ф_1, Ф_2, \ldots, Ф_n$ и дефаззификаторов $Д_1, Д_2, \ldots, Д_k$ МЛР; $X_1, X_2, \ldots, X_n$ и $Z_1, Z_2, \ldots, Z_k$ – входные и выходные переменные МЛР; $T(X_1), T(X_2), \ldots, T(X_n)$ и $T(Z_1), T(Z_2), \ldots, T(Z_k)$ – порядковые номера термов, значения которых равны логической единице; $N_{тек}$ – идентификационный номер продукционного правила в текущий момент t; # – составляющая идентификационного номера продукционного правила, формируемого из порядковых номеров термов $T(X_1), T(X_2), \ldots, T(X_n)$ и $T(Z_1), T(Z_2), \ldots, T(Z_k)$

Таким образом, главным критерием правильности разработанной структуры МЛР будет отсутствие повторяющихся, противоречащих и дополняющих друг друга продукционных правил, а также неиспользуемых термов.

Структура системы продукционных правил МЛР с компенсацией взаимного влияния контуров регулирования. Отличительной особенностью разработанного БЛВ МЛР является разделение системы продукционных правил на составляющие – регулирующую и компенсационную (РСПП и КСПП соответственно).

На рис. 3 представлена упрощённая схема системы управления на базе МЛР с компенсацией влияния на отдельно взятый контур остальных контуров регулирования.

Схема обладает следующими особенностями: выходные и входные параметры МЛР представлены совокупностью термов; система продукционных правил состоит из регулирующей и компенсационной составляющих; на вход БЛВ подаются не только векторы термов входных ($З_{Ti}$) и выходных (Z_{Tj}) лингвистических переменных, но и дискретные входные ($X_Б$) и выходные ($Y_Б$) параметры многомерного объекта управления (МОУ), имеющие единую логическую природу, т. е. являющиеся аргументами алгебры Буля, и поэтому на равных применяемые при формировании антецедентов правил,

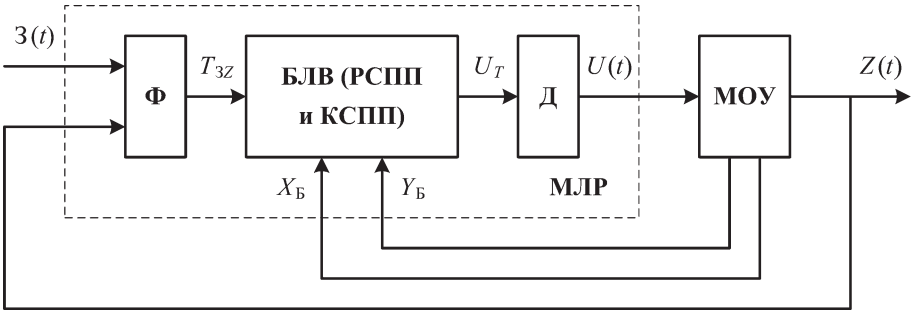


Рис. 3. Упрощённая схема системы управления на базе многомерных логических регуляторов с компенсацией влияния на отдельно взятый контур регулирования:
Ф – система фаззификаторов МЛР; Д – система дефаззификаторов МЛР; З(t), $Z(t)$ и $U(t)$ – векторы задающих, регулируемых и регулирующих параметров; $X_Б$ и $Y_Б$ – дискретные входные и выходные сигналы многомерного объекта управления (МОУ); $T_{ЗZ}$ и U_T – векторы термов задающих, регулируемых и регулирующих параметров МЛР

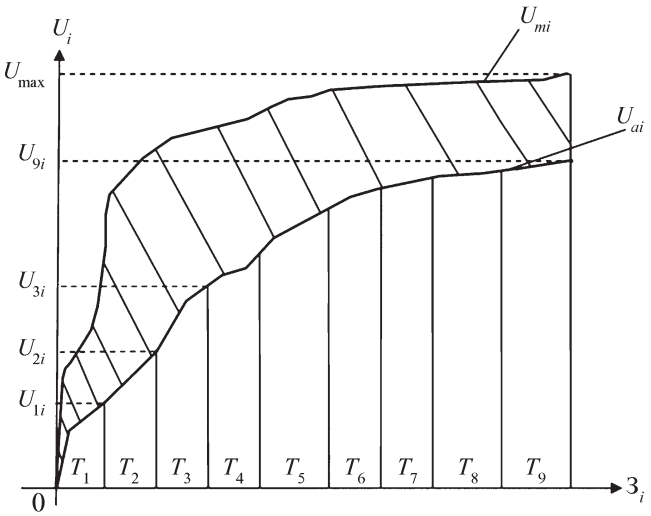


Рис. 4. Графики зависимости управляющего воздействия U_i от задающего параметра $З_i$ i-го канала многомерных логических регуляторов:
U_{ai} – кривая в автономном режиме; U_{mi} – кривая в режиме взаимного влияния контуров

которые в силу единства логической природы используемых аргументов вырождаются в функции двузначной логики.

Источником информации при разработке системы продукционных правил МЛР являются экспериментально снятые зависимости задающего и регулируемого параметров в автономном и многосвязном режимах работы.

В связи с тем, что в составе условной части продукционных правил МЛР имеется возможность использовать термы как входных, так и выходных параметров, информацию для разработки компенсирующей системы продукционных правил предлагается получать из двух и более экспериментов при работе МЛР с реальным МОУ.

В ходе первого эксперимента снимаются зависимости управляющих воздействий от задающих параметров в автономном режиме работы контуров регулирования МЛР, что достигается в результате отключения всех контуров, кроме одного, на котором в данный момент времени снимается указанная зависимость. Максимальное число зависимостей соответствует размерности МЛР.

В ходе второго и последующих экспериментов для каждого контура регулирования при одних и тех же значениях задающего параметра снимаются те же зависимости, но при работе остальных контуров регулирования МЛР в штатном режиме.

На рис. 4 представлены графики зависимости управляющего воздействия U_i от задающего параметра $З_i$ i-го канала МЛР. На рис. 4 заштрихованная площадь характеризует степень влияния на i-й контур остальных $(n-i)$ контуров регулирования МЛР. Данная характеристика, только в более лаконичной и удобной форме, представлена на рис. 5 в виде разностной функции

$$U_{pi} = U_{mi} - U_{ai}.$$

Кривая U_{mi} приведена для i-го контура регулирования МЛР. Аналогичные зависимости требуется получить для остальных контуров регулирования МЛР.

Смысл компенсации взаимного влияния контуров регулирования МЛР заключается в выработке с помощью специальной системы продукционных правил функции, характеризующей степень влияния на i-й контур остальных контуров регулирования МЛР. Функция U_{ki} является зеркальным отображением экспериментально полученной функции U_{pi} относительно оси абсцисс $З_i$. При точном отображении функция U_{ki} скомпенсирует влияние $(n-i)$ контуров на i-й контур регулирования МЛР.

Количество термов для представления функции U_{ki} определяется точностью регулирования и разрешающей способностью программируемого логического контроллера (ПЛК), ресурсы которого задействованы при разработке МЛР. Воспроизведение компенсирующих функций для остальных контуров регулирования производится аналогично.

STEP-TIME алгоритм фаззификации непрерывных величин МЛР. Известно, что в нечётких регуляторах из-за наложения смежных термов друг на друга требуется в каждом цикле сканирования отрабатывать алгоритм фаззификации целиком, не-

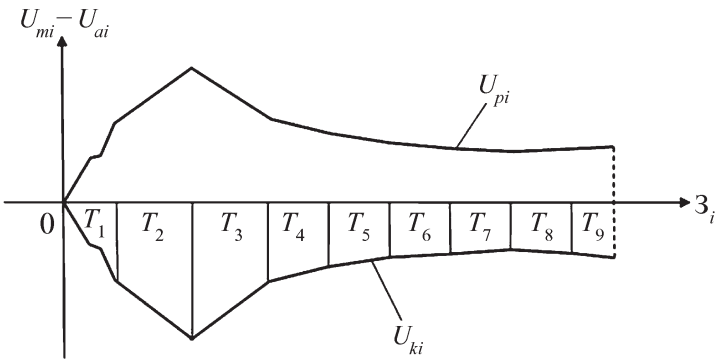


Рис. 5. Графики разностной функции U_{pi} и функции компенсации U_{ki} влияния $(n-i)$ контуров на i-й контур регулирования многомерных логических регуляторов

зависимо от текущего значения физической величины.

В ДЛР возможно в каждом цикле отрабатывать не весь алгоритм фаззификации, а только ту часть, которая находится выше продукционного правила, антецедент которого в текущий момент времени равен логической единице, что реализуется при помощи ANY-TIME алгоритма, концептуальную основу которого составляет система правил, исключающая неопределённость в идентификации значений непрерывных величин в совокупности термов и предотвращающая наложение за счёт размещения правил, имеющих наибольшую частоту срабатывания, в начало базы операций блоков фаззификации.

Из недостатков ANY-TIME алгоритма можно выделить:

значительное увеличение суммарного числа переменных регулятора, вызванное введением в алгоритм счётчиков и блока модификации структуры, пропорционально общему числу термов непрерывных физических величин;

снижение быстродействия регулятора, вызванное необходимостью обработки дополнительных операций вычислительным процессором (программный счёт, модификация алгоритма в реальном времени и пр.).

В связи с изложенным выше в МЛР предлагается использовать разработанный STEP-TIME алгоритм фаззификации, который предусматривает выбор прямого и обратного характера определения принадлежности термов и порядка их распределения на числовой оси.

Основу STEP-TIME алгоритма фаззификации составляет система продукционных правил, исключающая неопределённость в интерпретации непрерывных физических величин эквивалентной совокупностью термов.

Схемы STEP-TIME алгоритма фаззификации непрерывной величины x в диапазоне значений $[x_0;\ x_n]$ с прямым и обратным порядком распределения термов и характером определения их принадлежности представлены на рис. 6.

STEP-TIME алгоритм имеет три основные особенности:

завершение цикла сканирования после определения терма непрерывной физической величины, значение которого равно логической единице в текущий момент времени;

более чем двукратное сокращение суммарного числа операций сравнения, необходимых для интерпретации термов МЛР по сравнению с ANY-TIME алгоритмом фаззификации ДЛР;

отсутствие счётчиков и блока модификации структуры позволяет устранить избыточность переменных МЛР и снизить нагрузку на вычислительный процессор.

МЛР в системе управления элементом дистилляции. Рассмотрим пример, в котором при помощи МЛР с компенсацией взаимного влияния контуров

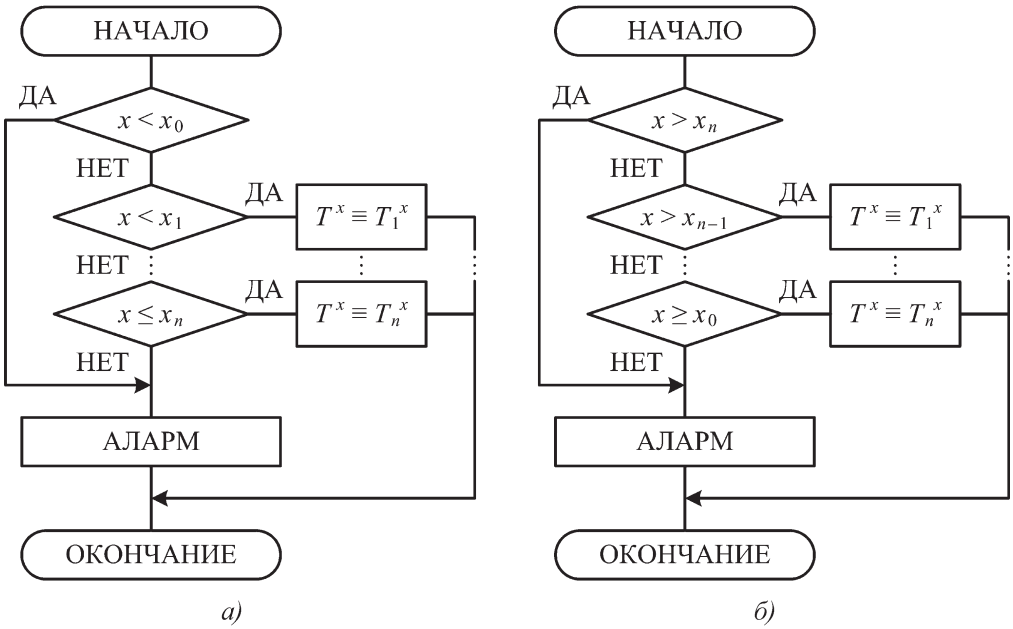


Рис. 6. Схема STEP-TIME алгоритма фаззификации непрерывной величины x в диапазоне значений $[x_0;\ x_n]$ с прямым (*а*) и обратным (*б*) порядком распределения термов, а также с прямым (*а*) и обратным (*б*) характером определения их принадлежности

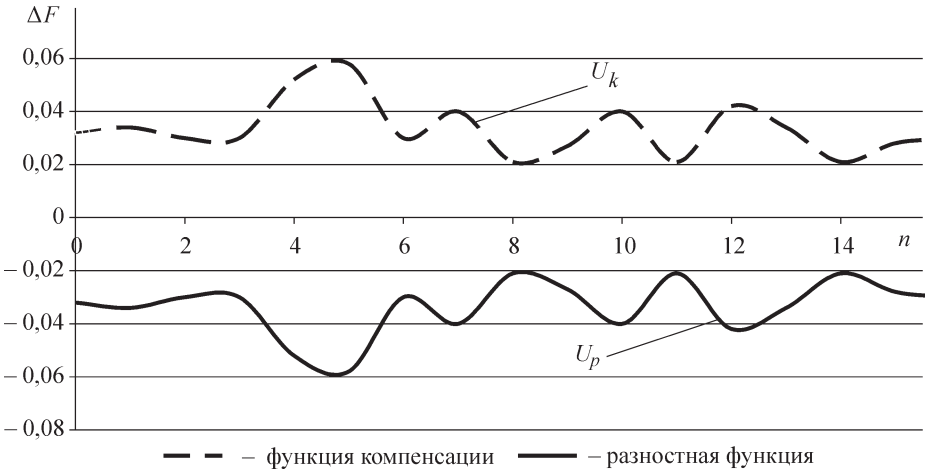


Рис. 7. Графики разностной функции U_p и функции компенсации U_k влияния контуров на контур подачи известкового молока по дополнительному потоку

регулирования реализовано управление дистилляционной колонной, состоящей из следующих элементов: дистиллера (ДС), теплообменника дистилляции и конденсатора дистилляции.

Регенерация аммиака (NH_3) из маточного раствора проводится ступенчатой отгонкой паром по мере прохождения фильтровой жидкости (ФЖ) через тарелки по дистиллерной колонне. Смешивание ФЖ и известкового молока (ИМ) проводится в смесителе (СМ). Основными показателями оптимального режима работы элемента дистилляции являются: содержание CaO в жидкости из ДС (зависит от значения *pH* жидкости на выходе из СМ) и концентрация NH_3 в жидкости из ДС [5, 6].

Для построения системы компенсационных правил БЛВ МЛР проведём следующий эксперимент: значение *pH* жидкости на выходе из СМ в некоторый период времени будет поддерживаться в заданном диапазоне значений в многосвязном режиме работы регуляторов, а затем – в сепаратном режиме (активен только контур подачи ИМ по дополнительному потоку). Графики разностной функции U_p и функции U_k для компенсации влияния контуров МЛР на контур подачи ИМ по дополнительному потоку приведены на рис. 7.

На рис. 8 показаны временные зависимости значений *pH* жидкости на выходе из СМ, составленные на основе *n* ежечасных показаний приборов, в системе управления элементом дистилляции без МЛР и с МЛР с компенсацией взаимного влияния контуров регулирования (штриховая линия).

Таким образом, использование МЛР с компенсацией взаимного влияния контуров регулирования в системе управления элемента дистилляции позволило снизить перерегулирование значения *pH* жидкости из СМ и повысить точность регулирования.

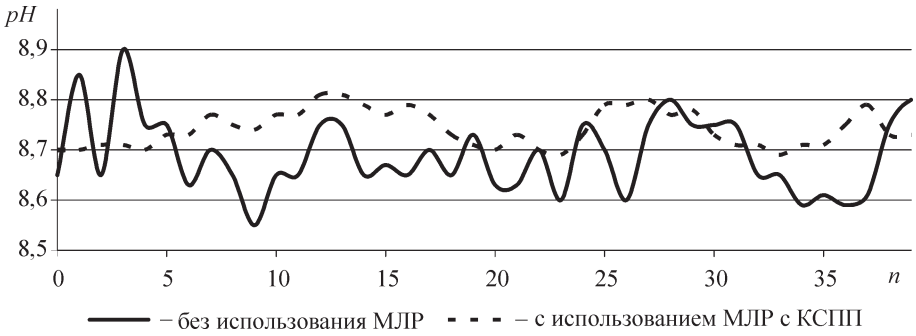


Рис. 8. Графики изменения значения *pH* жидкости на выходе из смесителя

Библиографические ссылки

1. **Усков А.А., Круглов В.В.** Интеллектуальные системы управления на основе методов нечёткой логики. Смоленск: Смоленск. гор. типография, 2003. 177 с.

2. **Деменков Н.П.** Нечёткое управление в технических системах: учеб. пособие. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 200 с.

3. **Муравьёва Е.А., Каяшева Г.А.** Дискретно-логические регуляторы с ANY-TIME алгоритмом минимизации времени фаззификации параметров технологических процессов в совокупность чётких термов // Вестник УГАТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2008. Т. 10. № 2. С. 53–57.

4. **Антипин А.Ф.** Система автоматизированной разработки многомерных логических регуляторов с переменными в виде совокупности аргументов двузначной логики // Автоматизация в промышленности. 2011. № 3. С. 12–16.

5. **Антипин А.Ф., Каяшев А.И., Муравьёва Е.А.** Система автоматического управления элементами дистилляции на базе многомерного логического регулятора // Вестник УГАТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. Т. 14. № 4. С. 126–131.

6. **Тимонин А.С.** Основы конструирования и расчёта химико-технологического и природоохранного оборудования: справочник. Т. 2. Калуга: изд-во Н. Бочкарёвой, 2002. 1028 с.

УДК 621.873.35: 629.11.02

А.В. Редькин, канд. техн. наук, доц.
(Тульский государственный университет),
П.А. Сорокин, д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ))

ra171171@yandex.ru

УПРАВЛЕНИЕ СТРЕЛОВЫМ КРАНОМ С УЧЁТОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Предложен способ управления стреловым краном, позволяющий учитывать дополнительные опрокидывающие моменты, возникающие в результате действия сил инерции и внешних возмущений в процессе выполнения грузоподъёмных операций.

Ключевые слова: стреловой кран, безопасность, устойчивость, система управления, инерционные нагрузки.

A method for controlling jib crane, allowing to take into account additional overturning moments that occur during the execution of lifting operations because of the forces of inertia and external disturbances.

Key words: jib crane, security, stability, control system, inertial loads.

Исследования устойчивости стреловых кранов и загруженности исполнительных механизмов базируются на рассмотрении классических динамических моделей колебательных систем. Эти исследования отражены во многих работах. Существующая нормативная методика расчёта устойчивости стреловых кранов является методикой статического расчёта, а процесс опрокидывания крана является динамическим процессом.

В статическом состоянии внешние опоры крана отрываются мгновенно. Потеря динамического равновесия крана, вызывающая отрыв его внешних опор от основания, необязательно связана с опрокидыванием. Всё зависит от изменения движения крана после потери контакта его внешних опор с основанием и процесса перехода динамической системы из одного состояния в другое.

Недостатками известных способов управления грузоподъёмными кранами [1] является то, что не учитывается динамика перемещаемого груза, в зависимости от скорости движения могут возникать колебания груза низкой частоты, а в критических ситуациях происходит резкая остановка крановых механизмов, что может привести к дополнительному возрастанию опрокидывающего момента.

Системы управления стреловыми кранами, как правило, решают следующие задачи:

запуск и отключение приводов механизмов, перемещающих оборудование крана, воздействием на органы управления краном;

отключение приводов механизмов по фактору ограничения перемещений обработкой сигналов датчиков, контролирующих положение подвижного оборудования;

отключение приводов механизмов по фактору перегрузки обработкой сигналов датчиков, контролирующих положение подвижного оборудования крана и его нагрузку;

создание режима и сигналов выбора допустимой скорости движения в зависимости от нагрузки на кран.

В некоторых системах для снижения уровня раскачивания груза, вызванного инерционными силами в начале движения и при останове, предусмотрены установка дополнительного датчика длины каната и переключателя кратности полиспаста, сигналы которых используются для определения высоты подвеса груза и периода раскачивания груза. Однако дополнительные силы инерции, возникающие при повороте стрелы крана с грузом, не определяются в достаточной степени для расчёта и анализа опрокидывающего момента с последующим активным управлением процессом поворота.

Предлагаемый способ управления [2] предусматривает, кроме перечисленных, следующие действия:

формируются режим и сигналы предварительного ограничения перемещения по результатам вычисления по факторам перегрузки и ограничения перемещений, а также по результату вычисления поправки к расстоянию в зависимости от периода раскачивания подвешенного груза;

по сигналам датчиков, контролирующих положение подвижного оборудования крана, вычисляются инерционные показатели оборудования, фактические значения скоростей и ускорений для определения моментов отключения и включения приводов механизмов и создания автоматического режима импульсного управления, зависящего от периода и фазы раскачивания подвешенного груза;

создаётся режим логической обработки данных, объединения сигналов запуска и сигналов отключения приводов механизмов и подключения их к усилителям, включающим исполнительные механизмы;

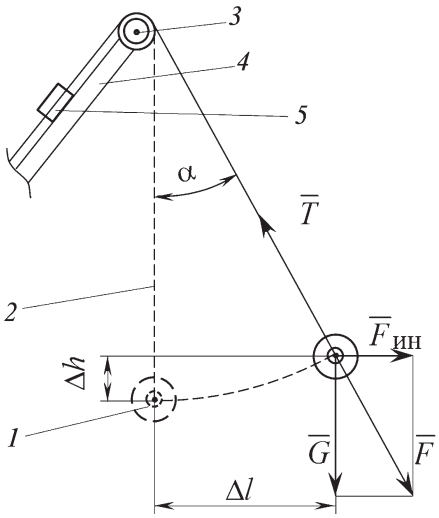
определение текущего значения опрокидывающего момента и сравнение с допустимым, после чего определяются оптимальные значения длины стрелы, высоты подвеса, скорости и ускорения при совершении дальнейшего движения, а затем предоставляются оператору на индикаторной панели.

При превышении текущего значения опрокидывающего момента над допустимым система слежения автоматически плавно снижает скорость, чтобы оператор мог изменить параметры движения – высоту подвеса, скорость и ускорение движения, вылет стрелы. Оператор может изменить рекомендованные параметры при приближении текущего значения опрокидывающего момента к максимально допустимому. Для данного положения стрелового оборудования система управления автоматически плавно снижает скорость, чтобы оператор изменил параметры движения – высоту подвеса, угол наклона или длину стрелы, ускорение движения. При превышении допустимого опрокидывающего момента движение плавно останавливают, дальнейшее движение оставляют только в рекомендованном режиме.

Для реализации поставленной задачи управления краном во время поворотного движения наиболее целесообразным является расчёт текущего опрокидывающего момента и сравнение его с допустимым, заданным в микропроцессоре в виде грузовысотной характеристики. Коэффициент грузовой устойчивости крана определяется по формуле:

$$k = \frac{M_{\text{уд}}}{M_{\text{опр}}} \geq 1{,}2 ,$$

где $M_{\text{уд}}$ – значение удерживающего момента в текущее время; $M_{\text{опр}}$ – опрокидывающий момент, создаваемый грузом и стреловым оборудованием.



Расчётная схема инерционных нагрузок

В памяти микропроцессора содержится информация о допустимом опрокидывающем моменте для каждого значения вылета стрелы. При поворотном движением (см. рисунок) измеряется натяжение каната.

Текущее значение опрокидывающего момента определяется относительно точки контакта опоры крана и грунта:

$$M_{\text{тек}} = G(l + \Delta l) + F_{\text{ин}}(h + \Delta h) + M_{\text{с}} ,$$

где G – сила тяжести груза; $F_{\text{ин}}$ – сила инерции, действующая на груз при перемещении стрелового оборудования; $M_{\text{с}}$ – опрокидывающий момент, создаваемый стрелой; l – плечо действия силы тяжести груза; Δl – величина, на которую увеличивается или уменьшается плечо силы тяжести при действии силы инерции; h – высота, на которой находится груз до начала поворотного движения, имеет прямую зависимость от значения высоты подвеса (длины каната); Δh – величина, на которую увеличивается высота груза во время действия силы инерции.

Величины Δl и Δh вычисляются в зависимости от значения угла $\alpha = \arccos(\overline{G} / \overline{F})$, на который отклоняется канат с грузом при поворотном движении:

$$\Delta l = \lambda_{\text{с}} \sin\alpha , \quad \Delta h = \lambda_{\text{с}} - \Delta\lambda_{\text{с}} \cos\alpha ,$$

где $l_{\text{с}}$ – высота канатного подвеса.

Инерционная нагрузка рассчитывается:

$$\overline{F}_{\text{ин}} = \overline{T} - \overline{G} ,$$

где $\overline{F}_{\text{ин}}$ – вектор силы инерции; $\overline{T}$ – вектор силы натяжения каната; $\overline{G}$ – вектор силы тяжести груза.

В свою очередь

$$F_{ин} = \sqrt{T^2 - G^2},$$

где T – сила натяжения каната.

Сущность предложенного способа заключается в следующем (см. рисунок). На груз *1*, подвешенный на канате *2*, действуют сила тяжести и сила инерции, результирующая сила передается по канату через оголовок *3* стрелы *4*, изменение натяжения каната определяется датчиком *5*, и на основании полученных данных определяют изменение радиуса и высоты действия сил относительно ребра опрокидывания грузоподъёмного крана.

Зная полученное значение натяжения, микропроцессор определяет текущее значение опрокидывающего момента и сравнивает его с допустимым, вычисленным согласно грузовысотной характеристике для данного вылета стрелы. Учитывая возможность изменения положения стрелового оборудования, определяют оптимальные значения величин: длины стрелы, высоты подвеса, скорости и ускорения при совершении дальнейшего движения. Машинист может изменять рекомендованные параметры при приближении текущего значения опрокидывающего момента к максимально допустимому. В этом случае автоматически плавно снижается скорость, т. е. машинист может изменить параметры движения – высоту подвеса, угол наклона или длину стрелы, ускорение движения. При превышении допустимого опрокидывающего момента движение плавно прекращается, причём дальнейшее движение возможно только в рекомендованном режиме.

Полная остановка движения осуществляется автоматически, если выполняемые оператором операции в дальнейшем увеличивают динамическую нагрузку и превышают допустимый опрокидывающий момент. Дальнейшее движение возможно только в рекомендованном режиме с учётом положения стрелы крана и груза в заданном рабочем пространстве с учётом имеющихся препятствий.

Таким образом, при управлении краном для уменьшения динамической нагрузки предлагается более точно измерять действующие силы инерции и учитывать возможность действия случайных нагрузок, в том числе просадки грунта под опорами и порывы ветра. В результате управления не исключены возможность движения при достижении максимально допустимого значения опрокидывающего момента и установка дополнительного контрольно-измерительного оборудования, так как в основе способа управления лежит математическая модель крана, находящаяся в памяти бортового микропроцессора. Модель можно изменить в зависимости от типа крана и его индивидуальных особенностей, а также усложнить при более жёстких требованиях.

Библиографические ссылки

1. **Приборы** безопасности грузоподъёмных машин: Сборник документов. Серия 10. Вып. 66. М.: ФГУП "Научно-технический центр по безопасности в промышленности", 2005. 429 с.

2. **Сорокин П.А., Чернов А.В., Редькин А.В.** Способ управления грузоподъёмным краном // Патент России № 2440924. 2012. Бюл. № 3.

Уважаемые авторы и читатели журнала!

В соответствии с решениями президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России журнал "Автоматизация и современные технологии" включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук.

УДК 621.73.06

Е.С. Корчак, канд. техн. наук, доц.
(Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Республика Украина),
А.В. Середа (Новокраматорский машиностроительный завод, г. Краматорск, Республика Украина)

helen_korchak@ukr.net

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ РАБОЧИХ ЦИЛИНДРОВ МОЩНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССОВ

Рассмотрены особенности конструкции и эксплуатации корпусов рабочих цилиндров мощных гидравлических прессов. Особое внимание уделено изучению напряжённо-деформированного состояния донной части. Проанализированы напряжения, деформации и перемещения, возникающие при силовом нагружении. Даны рекомендации по проектированию корпусов рабочих цилиндров со встроенными в дно клапанами.

Ключевые слова: рабочий цилиндр, давление, корпус, донная часть, галтель.

Design and exploiting features of the working cylinder bodies for power hydraulic presses are considered. Stressed-and-deformed state of the bottom part is investigated particularly. Resulted values of equivalent tensions, deformations and movements arising at force loading are analyzed. Practical recommendations for the working cylinders bodies designing with the valves integrated into its bottom are given.

Key words: working cylinder, pressure, body, bottom part, fillet.

Рабочие цилиндры являются наиболее ответственными деталями в конструкции мощных гидравлических прессов [1]. Снаружи цилиндры сопрягаются с элементами станины пресса, а изнутри подвергаются воздействию рабочих жидкостей высокого давления (32 МПа и более), вызывающих их усталостный и кавитационный износ. При этом, как показывает опыт промышленной эксплуатации, первый тип износа является преобладающим. Наиболее частой причиной усталостного разрушения, исключая металлургические дефекты и технологические ошибки, является недостаточная конструкторская проработка наиболее опасных сечений и концентраторов напряжений конструкций корпусов рабочих цилиндров.

В общем случае рабочие цилиндры гидравлических прессов бывают плунжерного типа с использованием стальных поковок в качестве заготовок для корпусов, которые могут быть цельнокованными или сварными и условно складываются из трёх основных частей – цилиндрической, фланцевой и донной. Конструктивное исполнение и параметры корпусов рабочих цилиндров зависят от следующих основных факторов [2]:

технологического назначения гидравлического пресса;

максимального технологического усилия, которое необходимо развивать на плунжере рабочего цилиндра;

типа и номинального давления рабочей жидкости;

механических свойств материала корпуса и др.

Следует отметить, что за последнее десятилетие существенно изменились конструкции рабочих цилиндров гидравлических прессов. Это вызвано, прежде всего, внедрением в системы управления прессами современных электрогидравлических индивидуальных следящих приводов (компактных, гибких в управлении, высокопроизводительных). Вследствие этого, стало возможным располагать клапаны управления как возле рабочих цилиндров прессов (на верхней неподвижной поперечине), так и встраивать их непосредственно в корпусы указанных цилиндров [3]. В последнем случае характерным является встраивание наполнительно-сливных клапанов вертикальной конструкции в донную часть рабочего цилиндра с выполнением в ней отверстия для подвода жидкости высокого давления. В связи с этим особый интерес представляет исследование напряжённо-деформированного состояния (НДС) донной части рабочего цилиндра, в которой имеются следующие концентраторы напряжений (рис. 1):

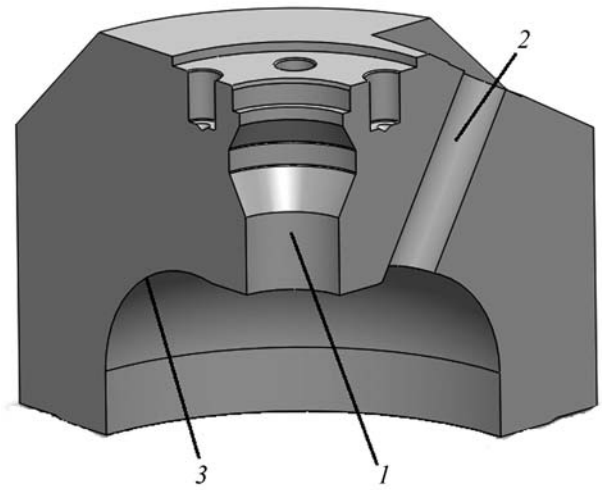


Рис. 1. Донная часть рабочего цилиндра

широкая центральная проточка *1* под встроенный клапан;

отверстие *2* для подвода жидкости высокого давления, диаметр которого определяется расходной характеристикой привода рабочего цилиндра;

галтель *3*, сопрягающая цилиндрическую и донную части цилиндра, форма и размеры которой подбираются из условия создания минимальной концентрации напряжений при силовом нагружении и отсутствии заклинивания плунжера в крайнем верхнем положении (при упоре плунжера в дно цилиндра).

Предварительно определяют параметры корпуса рабочего цилиндра по известным методикам, изложенным в специализированной литературе. Для анализа НДС остановимся на расчётах, касающихся донной части [2].

Толщина днища $h_{дн}$ цилиндра определяется по формуле

$$h_{дн} = (1{,}5 - 2{,}0)\, t_{ст} ,$$

где $t_{ст}$ – толщина стенки цилиндрической части цилиндра.

Затем проверяют напряжение $\sigma_{дн}$ в днище цилиндра и сравнивают его с допустимым:

$$\sigma_{дн} = 0{,}188 \frac{p_a}{\varphi} \left(\frac{D_{вн}}{h_{дн}} \right)^2 \le [\sigma] ,$$

где p_a – рабочее давление жидкости (в аккумуляторе); $D_{вн}$ – внутренний диаметр цилиндрической части; φ – коэффициент ослабления днища рабочего цилиндра отверстием для подвода жидкости.

Для рабочих цилиндров классической конструкции, т. е. с одним центральным отверстием для подвода жидкости высокого давления, коэффициент φ принимают 0,75–0,8, для цилиндра с донной частью (см. рис. 1) коэффициент φ необходимо рассчитывать, исходя из особенностей конструкции и величины суммарной площади проекции отверстий на плоскость, перпендикулярную оси цилиндра.

Допустимое напряжение $[\sigma]$ определяется как отношение предела текучести материала цилиндра к коэффициенту запаса прочности, который обычно принимается для рассматриваемых цилиндров 2,3–3,0.

Если условие $\sigma_{дн} \le [\sigma]$ не выполняется, то увеличивают толщину днища и расчёт повторяют.

НДС оценивается с помощью программного продукта Simulation Xpress для Solid Works–2012. При этом рассматривается симметричное нагружение внутренней поверхности донной части цилиндра максимальным рабочим давлением 32 МПа. Параметры нагружаемой конструкции (см. рис. 1) следующие:

тип конструкции цилиндра – сварно-кованая;

материал – сталь 25 ГС, предел текучести – 280 МПа;

внутренний диаметр цилиндрической части – 840 мм;

толщина стенки цилиндрической части цилиндра – 195 мм;

толщина днища – 340 мм;

максимальный диаметр центральной проточки – 270 мм;

диаметр отверстия для подвода жидкости высокого давления – 95 мм.

Ввиду симметрии (конструкции донной части и прилагаемых нагрузок) рассматривалась только та четверть конструкции, которая содержит все рассмотренные ранее концентраторы напряжений. При этом перемещение донной части ограничено в вертикальном направлении на участках её контакта с цилиндрической частью (т. е. по нижнему краю).

Расчётные схемы нагружения и результаты оценки НДС иллюстрируются на рис. 2 и 3. При этом для конструкции на рис. 2 характерным является выполнение галтели с радиусом закругления 200 мм и заглублением в донную часть на 5 мм, а для конструкции на рис. 3 – заглубление галтели радиусом 140 мм в донную часть на 80 мм.

На рис. 3 профиль заглублённой галтели в донной части определялся рекомендациями по повышению долговечности рабочих цилиндров гидрав-

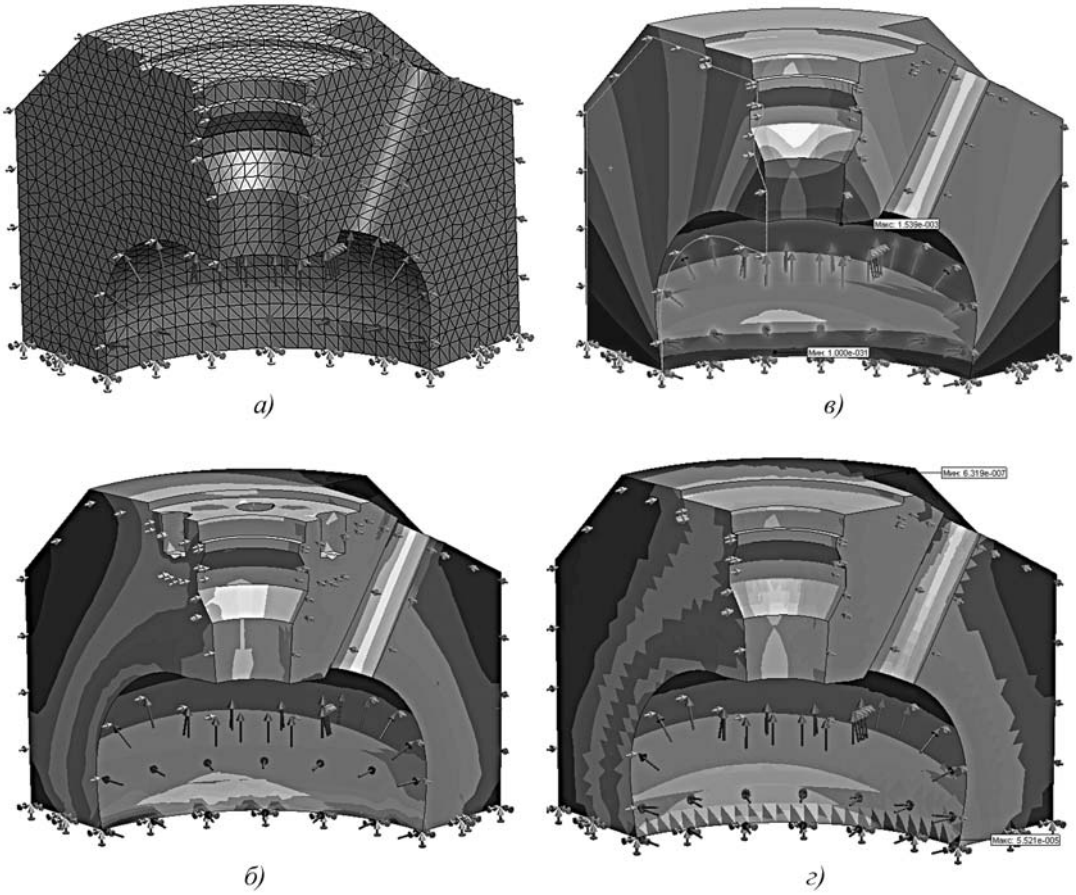


Рис. 2. Результаты анализа напряжённо-деформированного состояния днища рабочего цилиндра с галтелью:
а – конечно-элементная сетка с указанием схемы нагружения; *б*, *в*, *г* – результирующие значения напряжений, перемещений, деформаций

лических прессов вертикальной конструкции с одним центральным отверстием для подвода жидкости высокого давления [1]. На рис. 2 радиус закругления принимался, исходя из опыта проектирования указанных цилиндров (не менее 0,2 от внутреннего диаметра цилиндрической части).

При анализе НДС необходимо отметить следующее. Значениями рассматриваемых параметров по нижнему краю донной части, принебрегаем, так как поверхность её контакта с цилиндрической частью цилиндра принимается неподвижной (см. рис. 2–3, *а*). При дальнейшем анализе эти значения не будут учтены.

Анализ возникающих напряжений (см. рис. 2–3, *б*). На рис. 2, *б* показаны максимальные напряжения, возникающие на внутренней поверхности донной части, которые распределяются практически равномерно по всей цилиндрической поверхности и галтели, не вызывая пиковых значений. При этом эти напряжения плавно увеличиваются снизу вверх и в зоне галтели не превышают допустимого значения [σ], которое при максимальном значении коэффициента запаса прочности, равного 3, составляет 95 МПа. Менее напряжёнными являются центральная проточка и отверстие для подвода жидкости высокого давления. Причём для последнего отверстия характерным является незначительная концентрация напряжений (до 100 МПа) вблизи галтели и их постепенный спад (до 50 МПа) по мере удаления от неё. Наименее напряжённой является наружная поверхность донной части.

На рис. 3, *б* общий уровень возникающих напряжений в донной части на 70–80 МПа выше, чем на рис. 2, *б*. При этом в отличие от рассмотренного ранее напряжённого состояния, заглублённая галтель является явным концентратором напряжений, максимальное значение которых достигает 170 МПа и более, особенно в области отверстия для подвода жидкости высокого давления. Это является недопустимым и приводит к неизбежному разрушению донной части цилиндра.

Анализ перемещений и возникающих деформаций (см. рис. 2–3, *в*, *г*). Наибольшим перемещениям под-

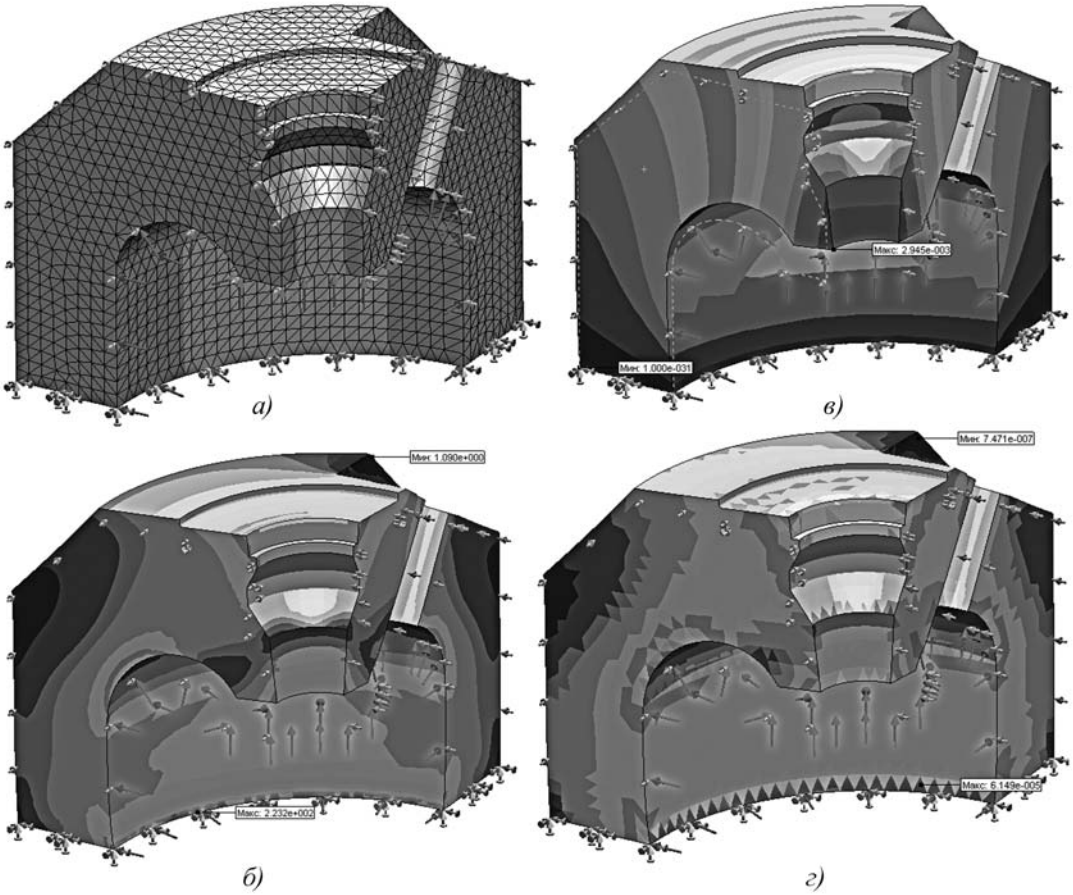


Рис. 3. Результаты анализа напряжённо-деформированного состояния днища рабочего цилиндра с заглублённой галтелью: *а* – конечно-элементная сетка с указанием схемы нагружения; *б*, *в*, *г* – результирующие значения напряжений, перемещений, деформаций

вержена центральная часть дна, содержащая проточку под клапан. На рис. 2, *в* максимальное значение перемещений составляет порядка 1,5 мм, а на рис. 3, *в* – вдвое больше (3 мм). Причём имеет место не только осевое (вертикальное) смещение центральной части, но и её разворот (изгиб) от периферии внутренней поверхности к центру вследствие возникновения дополнительных радиальных сил в заглублении галтели. На рис. 2, *в* радиальная составляющая незначительна и ею можно пренебречь.

Уровень возникающих деформаций (см. рис. 2–3, *г*) также отличается почти вдвое. При этом сконцентрированные в зоне заглублённой галтели деформации (см. рис. 3, *г*) превышают уровень упругих и переходят в разряд пластических, вызывая появление усталостных трещин. Причём существенные деформации возникают не только на внутренней поверхности, но и во всем объёме донной части. На рис. 2, *г* деформации распределяются равномерно по внутренней поверхности без образования зон ярко выраженной концентрации и имеют незначительные величины в объёме металла.

Таким образом, проведённый анализ НДС донной части рабочего цилиндра позволил установить следующее:

выполнение радиуса закругления галтели величиной менее 0,2 от внутреннего диаметра цилиндрической части приводит к появлению ярко выраженных зон концентрации напряжений в галтели;

заглубление галтели в донную часть приводит к возникновению дополнительных радиальных сил, вызывающих появление пластических деформаций и усиливающих развитие усталостных трещин.

Библиографические ссылки

1. **Семичев Ю.С., Сурков И.А.** О своевременности работ по предупреждению аварий мощных гидравлических прессов, вызванных "внезапным" разрушением базовых деталей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 10. С. 29–36.

2. **Korchak E.S.** Designing high-pressure hydraulic cylinder body of rational construction // Proceedings of the 12th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" RaDMI 2012, 13–17 September 2012. Vrnjacka Banja, Serbia. Vol. 1. P. 206–209.

3. **Bosch** Rexroth AG Industrial Hydraulics. URL: http://www.boschrexroth.de (дата обращения: 25.01.2013).

УДК 681.513

Е.Н. Ивашов, д-р техн. наук, проф., **М.П. Князева**
(Московский институт электроники и математики национального исследовательского университета "Высшая школа экономики")
eivashov@hse.ru

АЛГОРИТМЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК С ИЗОМЕРНЫМИ ЯДРАМИ

Рассмотрены алгоритмы последовательных и параллельных вычислений, выполненных на основе машины Тьюринга и кинетической машины Кирдина. Предложены устройства флэш-памяти, долговременной памяти, энергонезависимой памяти, выполненные в виде квантовых точек на изомерных ядрах для реализации последовательных и параллельных вычислений.

Ключевые слова: машина Кирдина, машина Тьюринга, квантовые точки, изомерные ядра.

Algorithms of the serial and parallel calculation executed on the grounds of Turing machine and kinetic machine of Kirdin are considered. USB flash memory, long term memory, nonvolatile memory formed as quantum dots on isomer kernels for implementation of the serial and parallel calculation are proposed.

Key words: kinetic machine of Kirdin, machine of Turing, quantum dots, isomer kernels.

Введение. Для описания последовательных алгоритмов существует много формальных способов: машины Тьюринга (МТ), грамматики Хомского типа 0, нормальные алгоритмы Маркова (НАМ), системы Поста, большинство языков программирования.

Записанный с одним из этих способов алгоритм можно промоделировать алгоритмом, записанным с любым другим из них, так как все вышеперечисленные способы эквивалентны.

Работу МТ можно промоделировать с помощью кинетической машины Кирдина (КМК). МТ детерминирована, следовательно, соответствующая ей КМК также будет детерминирована и будет состоять только из команд прямой замены. Такую КМК моделируют с помощью нормальных алгоритмов Маркова. Отсюда следует алгоритмическая универсальность КМК, поскольку существует тезис Черча–Тьюринга, который говорит, что любой вычислительный процесс, который можно разумно назвать алгоритмом, можно промоделировать на МТ [1].

В состав МТ входит управляющее устройство и бесконечная лента, разбитая на ячейки, где в каждой ячейке может быть записан единственный символ заданного алфавита $A = \{a_1, \ldots, a_m\}$; считывающая и пишущая головка, которая в зависимости от символа, записанного в этой ячейке, и состояния управляющего устройства записывает символ в ячейку, затем либо сдвигается влево или вправо на одну ячейку, либо остаётся на месте; управляющее устройство принимает новое состояние.

Для любого внутреннего состояния q_i и символа a_j однозначно заданы:

следующее состояние q_i;

новый символ a_{j+1}, который нужно записать вместо a_j в ту же ячейку;

направление сдвига головки d_k, обозначаемое символом в алфавите $D = \{L, R, E\}$ (L = *Left*, R = *Right*, E = *Equal*) [1].

Это задание описывается таблицей или системой команд, имеющих вид $q_i\, a_j \to q_i'\, d_k$ [1].

Понятие КМК. Пусть L – алфавит символов. L^* – множество всех конечных слов или цепочек в алфавите L. Обрабатываемой единицей является ансамбль слов M из алфавита L, который отождествляется с функцией FM с конечным носителем на L^*, принимающей неотрицательные целые значения – FM: $L^* \to N \cup \{0\}$. Значение $FM(s)$ интерпретируется как число экземпляров слова s в ансамбле M [2].

Обработка состоит в совокупности элементарных событий, которые происходят недетерминировано и параллельно. Элементарное событие S: состоит в том, что из ансамбля M изымается ансамбль K^- (это возможно, если для всех s $F_K^-(s) \le F_M(s)$) и добавляется ансамбль K^+, т. е. $F_{M'} = F_M - F_K^- + F_K^+$. Ансамбли K^- и K^+ однозначно задаются правилами или командами, которые объединяются в программу.

Пусть $u, \omega, v, f, g, k, q, s$ – терминальные символы, обозначающие некоторые цепочки символов из L, являющиеся подцепочками слов из L^* [2].

МТ детерминирована и последовательна, следовательно, КМК также будет детерминирована и в каждый момент времени будет существовать лишь одно событие, являющееся допустимым. Алфавитом для КМК будет являться $L = A \cup Q$. Начальный ансамбль состоит из одного слова, соответствующего стандартной конфигурации МТ $M_0 = \{q_0 \alpha\}$, где $\alpha \in A^*$. Можно описать моделирование команд МТ таблицей, где команде МТ соответствует ответная команда КМК.

Команда МТ	Команда КМК
$q_i\, a_j \to q'_i\, a'_j\, R$	$u q_i\, a_j\, \omega \to u a'_j\, q'_i\, \omega$ $u a'_j\, q'_i \to u a'_j\, q'_i\, \lambda$
$q_i\, a_j \to q'_i\, a'_j\, L$	$u a_1\, q_i\, a_j\, \omega \to u q'_i\, a_1\, a'_j\, \omega$ ... $u a_m\, q_i\, a_j\, \omega \to u q'_i\, a_m\, a'_j\, \omega$ $q_i\, a_j\, \omega \to q'_i\, \lambda a'_j\, \omega$
$q_i\, a_j \to q'_i\, a'_j\, E$	$u q_i\, a_j\, \omega \to u q'_i\, a'_j\, \omega$

Программа для полученной детерминированной КМК состоит только из команд прямой замены [2].

Рассмотрим некоторые схемы реализации таких машин.

Устройство флэш-памяти на квантовых точках в диэлектрической среде (рис. 1) содержит корпус, установленный в нём набор нанообъектов долговременной памяти, выполненный с возможностью электрической связи с тактовым генератором и источником излучения. Набор нанообъектов долговременной памяти выполнен в виде квантовых точек на изомерных ядрах, расположенных в диэлектрической среде, а источник излучения выполнен в виде гамма-квантового излучателя–приемника.

В качестве элементов памяти используют квантовую точку. Под этим понятием понимают некоторую (искусственно) созданную область вещества (так называемые "островки" или островные кристаллические структуры), т. е. структуру размером в несколько нм, в которой можно "хранить" небольшие количества электронов. Квантовые точки могут образовываться в результате процессов самосборки.

Устройство флэш-памяти на квантовых точках в диэлектрической среде работает следующим образом. При работе тактового генератора происходит периодическое подключение и отключение квантовых точек с частотой, равной частоте тактового генератора (тактовая частота). Запись информации осуществляется при возбуждении квантовых точек на изомерных ядрах под действием гамма-квантового излучения. При этом состоянию с возбуждённым ядром соответствует единица (один бит информации), а с невозбуждённым – ноль. Считывание информации осуществляется в обратном порядке, т. е. тактовый генератор подключает соответствующую квантовую точку, и гамма-излучение передаётся на излучатель–приемник [3].

Устройство долговременной памяти (рис. 2) содержит элементы памяти, записывающие и считывающие головки, выполненные с возможностью электромагнитного взаимодействия с элементами памяти. Элементы памяти выполнены в виде наночастиц железного порошка, взвешенного в жидком галии. Наночастицы железного порошка представляют собой квантовые точки на изомерных ядрах, являющихся дважды магическими. За-

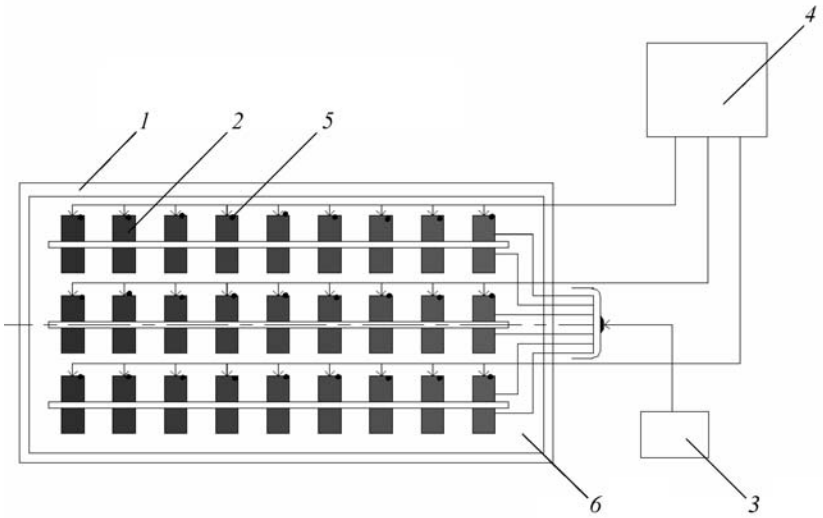


Рис. 1. Устройство флэш-памяти на квантовых точках в диэлектрической среде:

1 – корпус; *2* – нанообъекты долговременной памяти; *3* – тактовый генератор; *4* – источник и приёмник излучения; *5* – квантовые точки; *6* – диэлектрическая среда (масло)

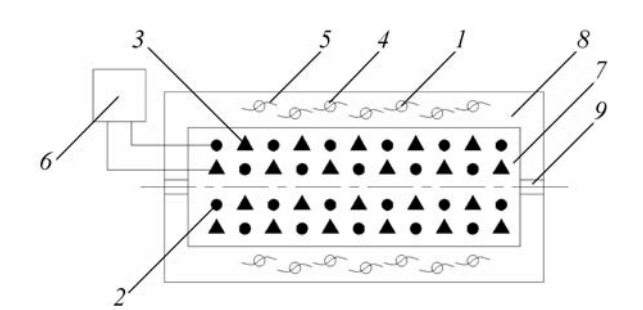


Рис. 2. Устройство долговременной памяти:
1 – элементы памяти; *2* – записывающие головки; *3* – считывающие головки; *4* – наночастицы железа; *5* – жидкий галлий; *6* – тактовый генератор; *7* – барабан; *8* – суспензия Ga–Fe

писывающие и считывающие головки установлены на наружной поверхности барабана, расположенного в суспензии Ga–Fe, с возможностью вращения вокруг своей оси и электрически связанные с тактовым генератором.

Устройство долговременной памяти работает следующим образом. Запись информации осуществляется посредством записывающих головок, сигнал от которых поступает на элементы памяти. При этом элементы памяти переходят в возбуждённое состояние. Так как элементы памяти представляют собой квантовые точки на изомерных ядрах, являющихся дважды магическими, то их возбуждённое состояние, а следовательно, и информация в них, может сохраняться несколько тыс. лет.

Считывание информации происходит следующим образом. От считывающих головок подаётся квант гамма-излучения, необходимый для "раскачки" квантовой точки, в результате чего квантовая точка излучает полученный ранее квант гамма-излучения, который регистрируется считывающими головками.

Таким образом, одна квантовая точка может нести один бит информации. Считывающие и записывающие головки во время своей работы реализуют алгоритм работы КМК, т. е. алгоритм параллельного считывания и записи информации [4].

Устройство энергонезависимой памяти (рис. 3) содержит элементы памяти, расположенные на носителе информации, например диске, записывающие и считывающие головки, выполненные с возможностью электромагнитного взаимодействия с элементами памяти. Элементы памяти выполнены в виде атомов с изомерными ядрами, например, атомов железа, а записывающие и считывающие головки соответственно в виде источника и приемника гамма-излучения.

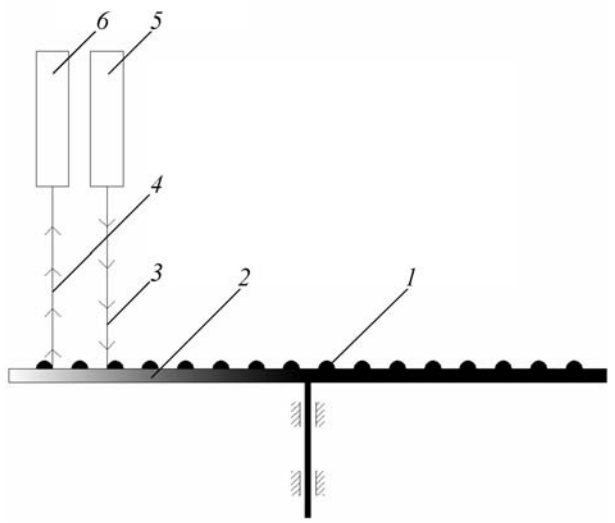


Рис. 3. Устройство энергонезависимой памяти:
1 – элементы памяти; *2* – носитель информации; *3* – записывающие головки; *4* – считывающие головки; *5* – источник гамма-излучения; *6* – приёмник гамма-излучения

Устройство энергонезависимой памяти работает следующим образом. При получении сигнала от записывающей головки квантовые точки и изомерные ядра переходят в возбуждённое состояние под действием гамма-излучения. Каждое изомерное ядро соответствует элементарной ячейке памяти в 1 бит, а 8 бит соответствуют ячейке памяти в 1 байт. Запись информации осуществляется по всем квантовым точкам, расположенным на носителе информации, например на диске при его вращении.

Считывание информации с носителя информации, в частности с диска, осуществляется в обратном порядке. От источника гамма-излучения подаётся квант гамма-излучения, необходимый для "раскачки" квантовой точки, в результате чего квантовая точка излучает соответствующий гамма-квант, который и регистрируется приёмником гамма-излучения. Таким образом, считывание информации осуществляется на всех участках диска.

Квантовая точка – это фрагмент проводника или полупроводника, ограниченный по всем трём пространственным измерениям и содержащий электроны проводимости. Точка должна быть достаточно маленькой настолько, чтобы существенны были квантовые эффекты. Это достигается, если кинетическая энергия электрона, обусловленная неопределённостью его импульса, будет заметно больше всех других энергетических характеристик, в первую очередь, больше температуры, выраженной в энергетических единицах [5].

Устройство флэш-памяти с преобразователем магнитных сигналов (рис. 4) содержит матрицу с закреплённым на ней элементами логической памяти типа "0–1", преобразователь магнитных сигналов, тактовый генератор, связанный с элементами логической памяти и преобразователем электромагнитных сигналов, а также элементы логической памяти, выполненные в виде квантовых точек с изомерными ядрами, и преобразователь магнитных сигналов в виде передатчика – приёмника, гамма-квантов и приёмника Оже-электронов.

Квантовые точки (их иногда ещё называют искусственными атомами) представляют собой специальным образом полученные (выращенные) наноразмерные объекты (наночастицы), созданные на основе обычных неорганических полупроводниковых материалов (Si, InP, CdSe и др.), ведущие себя как отдельные атомы. Это наноразмерные островки-включения одного полупроводникового материала (с меньшей шириной запрещённой зоны) в матрицу другого (с большей шириной запрещённой зоны). Они могут поглощать световые волны, перемещая электроны на более высокий энергетический уровень, и выделять свет при переходе электронов на низкоэнергетический уровень.

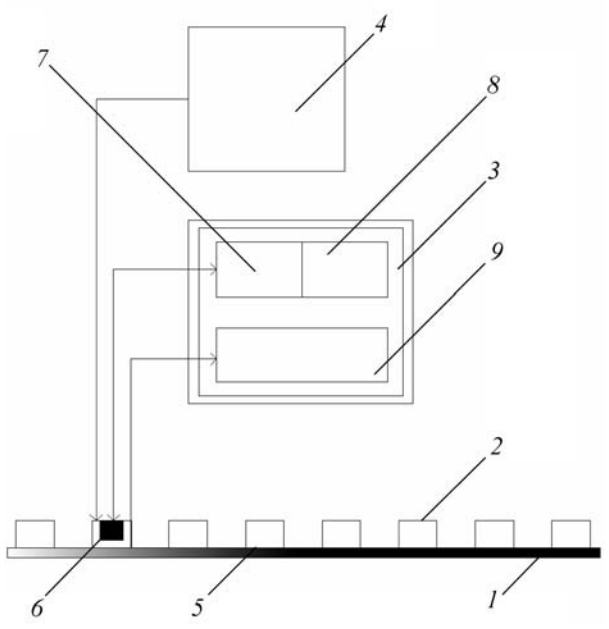


Рис. 4. Устройство флэш-памяти с преобразователем магнитных сигналов:
1 – матрица; *2* – элементы логической памяти типа "0–1"; *3* – преобразователь магнитных сигналов; *4* – тактовый генератор; *5* – квантовые точки; *6* – изомерные ядра; *7* – передатчик–приемник; *8* – гамма-кванты; *9* – Оже-электроны

Рентгеновское излучение, которое образуется при взаимодействии электронов с атомом, может частично рассеиваться внутри самого атома, в результате чего из этого атома могут эмитироваться наружу электроны (Оже-электроны). Такой атом становится дважды ионизированным. Эмиссия Оже-электронов особенно характерна для атомов с малыми атомными номерами. Оже-электроны могут эмитироваться лишь с очень незначительной глубины (около 1 нм).

Устройство флэш-памяти с преобразователем магнитных сигналов работает следующим образом. Элементы логической памяти "1–0", выполненные в виде квантовых точек, с помощью воздействия на них тактового генератора вводятся в возбуждённое состояние, которое соответствует "1" или "0", и фиксируются преобразователем электромагнитного сигнала. За счёт возбуждения гамма-квантами, пересылаемого на матрицу передатчиком гамма-квантов, изомерные ядра переходят в возбуждённое состояние, в котором могут находиться неограниченный период времени, далее приёмник гамма-квантов фиксирует состояние квантовых ячеек памяти по энергии, выпущенной электронами с помощью приемника Ожэ-электронов, и после преобразования электромагнитных сигналов (ПЭС), считываются в цифровом виде матрицы логических ячеек "1–0". Процесс нанесения информации на матрицу памяти происходит в результате преобразования цифровых импульсов в энергию гамма-квантов, за счёт которой возбуждаются квантовые ячейки и переходят в состояние, отвечающее состоянию логической памяти ячеек "1–0" [6].

Заключение. В предложенных устройствах долговременной памяти на квантовых точках с изомерными ядрами реализуется алгоритм как последовательных, так и параллельных вычислений. Рассмотренные технические решения послужат основой для создания современных устройств записи и считывания информации.

Применение устройства флэш-памяти на квантовых точках в диэлектрической среде позволяет увеличить объём памяти при уменьшении реальных размеров устройства.

Применение устройства долговременной памяти позволяет увеличить ёмкость материального носителя информации при уменьшении его объёма.

Применение устройства энергонезависимой памяти также позволяет увеличить ёмкость материального носителя информации при уменьшении его объёма.

Применение устройства флэш-памяти с преобразователем магнитных сигналов позволяет снизить габаритные размеры и увеличить размер памяти при реализации матрицы с элементами логической памяти на наноразмерном уровне.

Библиографические ссылки

1. **Горбунова Е.О.** Алгоритмическая универсальность кинетической машины Кирдина. Методы нейроинформатики: сб. науч. трудов / под ред. А.Н. Горбаня. Красноярск: КГТУ, 1998. С. 41–47.

2. **Горбунова Е.О.** Финитность и детерминированность простых программ для кинетической машины Кирдина. Методы нейроинформатики: сб. науч. трудов / под ред. А.Н. Горбаня. Красноярск: КГТУ, 1998. С. 23–40.

3. **Пат. № 62731 РФ.** Устройство флеш-памяти / Е.Н. Ивашов, С.М. Пак. 2007. Бюл. № 9.

4. **Пат. № 66609 РФ.** Устройство долговременной памяти / Е.Н. Ивашов, Т.Т. Козанов, Н.В. Мазур, С.М. Пак. 2007. Бюл. № 25.

5. **Пат. № 66862 РФ.** Устройство энергонезависимой памяти / Е.Н. Ивашов, Т.Т. Козанов, Н.В. Мазур, С.М. Пак. 2007. Бюл. № 27.

6. **Пат. № 66863 РФ.** Устройство флеш-памяти / Е.Н. Ивашов, Т.Т. Козанов, Н.В. Мазур, С.М. Пак. 2007. Бюл. № 27.

УДК 519.246.8

В.Н. Клячкин, д-р техн. наук, проф., **Ю.Е. Кувайскова,** канд. техн. наук, доц., **А.А. Алёшина**
(Ульяновский государственный технический университет)

E-mail: v_kl@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ ГИДРОАГРЕГАТА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕГРЕССИЙ

Для моделирования вибраций гидроагрегата предложен подход адаптивного регрессионного моделирования, предусматривающий при построении математических моделей временных рядов последовательную адаптацию к нарушениям основных предположений регрессионного анализа. Построенная модель вибраций адекватна реальной ситуации и позволяет прогнозировать состояние гидроагрегата, что предупреждает об аварийной ситуации.

Ключевые слова: гидроагрегат, вибрации, временной ряд, адаптивные динамические регрессии.

The adaptive regression modelling method for the hydraulic unit vibration modelling providing consecutive adaptation to infringements of the regression analysis basic assumptions at construction of the temporal rows mathematical models is proposed. Constructed vibration model is adequate to a real situation and allows predicting a hydraulic unit state that warns about an emergency.

Key words: hydraulic unit, vibrations, temporal row, adaptive dynamic regressions.

Одно из направлений повышения эффективности управления гидроагрегатом связано с возможностью раннего предупреждения об аварийной ситуации с помощью прогнозирования состояния агрегата по множеству его характеристик, в частности по вибрациям.

Система вибромониторинга гидроагрегата включает контролируемые характеристики (показания распределённой сети датчиков относительной и абсолютной вибрации, а также датчиков измерения скорости вращения вала), которые образуют систему временных рядов (ВР). Для данной системы можно построить соответствующие математические модели как в режиме запуска агрегата, так и в режиме работы в сети. На базе этой модели возможно прогнозирование изменения характеристик агрегата и обнаружение нарушений процесса до того, как контролируемые параметры превысили предельные значения [1].

Для анализа вибраций гидроагрегата в режиме запуска предлагается использовать подход адаптивного регрессионного моделирования, предусматривающего при построении математических моделей ВР последовательную адаптацию модели к возможным нарушениям основных предположений регрессионного анализа [2]. При этом построенная модель вибраций адекватна реальной ситуации и позволяет прогнозировать состояние гидроагрегата, что предупреждает об аварийной ситуации.

В режиме работы в сети, при условии стационарной работы агрегата, для оценки стабильности процесса могут быть использованы многомерные

контрольные карты, аналогичные используемым при контроле многопараметрических технологических процессов [3].

Методика построения адаптивных динамических регрессий. Подход адаптивного динамического регрессионного моделирования, предложенный С.Г. Валеевым [2], представляет собой реализацию метода многоэтапной структурно-параметрической идентификации. Предполагается, что процесс $Y(t)$, наблюдаемый в равноотстоящие моменты времени $t_1, t_2, \ldots, t_N$, может быть представлен в виде:

$$Y(t) = f(t) + \varphi(t) + \psi(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $Y(t_1), Y(t_2), \ldots, Y(t_N)$ – ряд наблюдений случайной функции, называемый временным рядом; $f(t)$ – неслучайная (долговременная) функция тренда; $\varphi(t)$ – неслучайная периодическая функция; $\psi(t)$ – случайная с элементами регулярности функция; $\varepsilon(t)$ – нерегулярная компонента (случайная величина, ошибка).

На каждом этапе проводятся построение и анализ соответствующей компоненты модели ВР, оценка точности аппроксимации и прогнозирования, диагностика свойств остатков и при необходимости – адаптация к нарушениям предположений о характеристиках этих свойств.

Методика предусматривает исследование ряда на наличие свойств регулярности и трендоустойчивости с помощью мультифрактального анализа. Для исследуемого ВР вычисляются информационная размерность, парный корреляционный интеграл. С помощью значений экспонент Гельдера обнаруживаются корреляции в динамике процесса. Спектр сингулярности, вычисляемый на основе преобразования Лежандра, позволяет определять неоднородность изучаемого объекта. Метод максимумов модулей вейвлет-преобразований даёт возможность устанавливать регулярность в точках динамики исследуемого процесса.

После идентификации регулярности выделяется трендовая составляющая ряда. При наличии "всплесков" в динамике ряда использование робастных методов для оценивания параметров тренда позволяет повысить качество модели по внешней и внутренней точности.

Методом спектрального анализа исследуются остатки ряда для обнаружения периодических слагаемых.

После идентификации трендовой и периодической составляющей в модель включают различные конкурирующие между собой математические структуры или их линейную комбинацию (авторегрессия (АР), скользящее среднее (СС), авторегрессия и скользящее среднее (АРСС)).

Учесть зависимость условной дисперсии ошибок модели от истории процесса позволяет применение комплекса моделей авторегрессионной условной гетероскедастичности (ARCH-моделей). Предположение о постоянстве дисперсии ошибок проверяется тестом Энгла. При оценивании параметров моделей с условно гетероскедастичными остатками используется метод максимального правдоподобия, который позволяет получить более эффективные оценки параметров, чем обычный или обобщённый метод наименьших квадратов.

Автоматизированная система динамического регрессионного моделирования. Пакет программ "Автоматизированная система динамического регрессионного моделирования (АС ДРМ)" [4] предназначен для разработки комплексных моделей ВР. Математическое наполнение пакета АС ДРМ включает:

модуль "Сценарии обработки данных", обеспечивающий автоматическое построение оптимальной по среднеквадратичному отклонению (СКО) прогнозирования комплексной модели ВР; кроме интерактивного режима пакет содержит два сценария: псевдополный перебор и жёсткий (фиксированный) сценарий;

модули предварительного анализа данных для расчёта основных статистических характеристик ВР;

модули построения различных моделей ВР (тренд, гармоническая модель, авторегрессия, авторегрессия и скользящее среднее, авторегрессионная модель условной гетероскедастичности, мартингальная аппроксимация);

процедуры для анализа точности по смешанным, внешним и внутренним мерам и диагностики выполнения основных предположений регрессионного анализа.

Используемые СКО для оценки точности аппроксимации σ и прогноза σ_Δ вычисляются по формулам:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-p)}, \quad (2)$$

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} \Delta_i^2 / (k-p)}, \quad (3)$$

где n – количество наблюдений; k – объём контрольной выборки; p – число слагаемых в модели; $\Delta_i = y_i - \hat{y}_i$;

y_i – результат i-го наблюдения; $\hat{y}_i$ – прогнозируемое значение по построенной модели.

Моделирование вибраций гидроагрегата. Данные по вибрациям поступали по восьми каналам, причём по первым двум поступали результаты измерений по абсолютной вибрации, по остальным передавалась информация по относительной вибрации элементов гидроагрегата. Наблюдения в режиме запуска длились 38 с, показания снимались 2 раза в секунду, всего получено 76 наблюдений по каждому из 8 каналов.

В качестве примера рассмотрим обработку данных по первому каналу. ВР результатов наблюдений признан нестационарным. С помощью мультифрактального анализа получены экспоненты Гельдера $h(q) > 0{,}6$. Следовательно, динамика ряда коррелированна, и ВР имеет регулярную составляющую.

На следующем этапе выделен квадратичный тренд. Модель имеет вид:

$$Y_1(t) = -165{,}594 + 27{,}479\,t - 0{,}267\,t^2 + X_1(t), \qquad (4)$$

где $Y_1(t)$ – результат наблюдения значений вибраций, идущих по первому каналу в момент времени t; $X_1(t)$ – остатки модели после вычитания из исходного ВР трендовой составляющей.

Внутреннее СКО модели $\sigma = 53{,}74$, внешнее $\sigma_\Delta = 82{,}35$. Для получения внешнего СКО (характеризующего погрешность прогнозирования) исходный ВР делился на две части: 90 % точек использовано для построения модели, а 10 % – для контроля. Построенная модель оказалась значимой по F-критерию.

Для выявления гармонической составляющей в модели проведён спектральный анализ, результаты которого свидетельствуют о присутствии периодических слагаемых. Методом пошаговой регрессии выявлены две значимые и некоррелирующие гармоники. Модель имеет вид:

$$\begin{aligned} X_1(t) &= 2{,}129\,\sin(2\pi t/12 + 4{,}715) + \\ &+ 2{,}200\,\sin(2\pi t/17 + 116{,}45) + X_2(t), \end{aligned} \qquad (5)$$

где $X_2(t)$ – остатки после вычитания из $X_1(t)$ прогнозов по гармонической модели.

Внутреннее СКО модели $\sigma = 39{,}59$, внешнее $\sigma_\Delta = 52{,}58$. Таким образом, применение гармонического анализа улучшило качество модели по внутренней и внешней точности.

Критерий Дарбина–Уотсона ($DW = 0{,}511$) указывает на присутствие положительной авторегрессии. Проведение теста Энгла свидетельствует, что ARCH-компонента в остатках не обнаружена. Строим АРСС-модель:

$$X_2(t) = 0{,}765\,X_2(t-1) - 0{,}066\,e(t-1) + e(t), \qquad (6)$$

где $e(t)$ – остатки после АРСС-процесса.

При этом $\sigma = 27{,}03$, $\sigma_\Delta = 36{,}95$.

В итоге ряд наблюдений за вибрациями на первом канале описан комплексной моделью в виде суммы трендовой, периодической составляющих и АРСС(1,1):

$$\begin{aligned} Y_1(t) &= -165{,}594 + 27{,}479t - 0{,}267t^2 + \\ &+ 2{,}129\sin(2\pi t/12 + 4{,}715) + \\ &+ 2{,}200\sin(2\pi t/17 + 116{,}45) + \\ &+ 0{,}765\,X_2(t-1) - 0{,}066\,e(t-1) + e(t). \end{aligned} \qquad (7)$$

СКО итоговой комплексной модели составило $\sigma = 27{,}03$, внешнее $\sigma_\Delta = 36{,}95$.

Результаты диагностики остатков последнего шага: остатки распределены нормально; авторегрессия отсутствует; коэффициенты полученной модели статистически значимы на уровне 0,05.

Количество наблюдений достаточно для построения комплексной модели. Однако модель вибрации, как и любая другая модель ВР, подвержена "старению", поэтому при поступлении новых данных параметры модели необходимо корректировать, адаптируя модель к новым условиям развития процесса [5].

На рис. 1 показаны результаты наблюдений (сплошная линия) и аппроксимации по комплексной модели (штриховая линия).

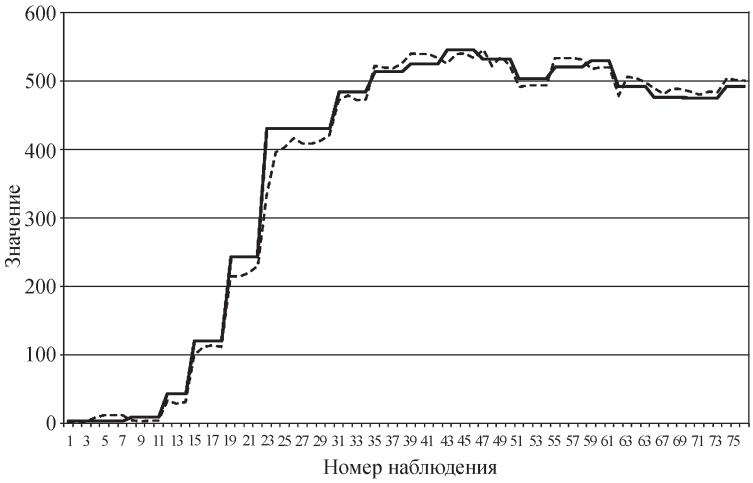


Рис. 1. График результатов наблюдений за вибрациями по первому каналу (сплошная линия) и их аппроксимация (штриховая линия) в пакете "Автоматизированная система динамического регрессионного моделирования (АС ДРМ)"

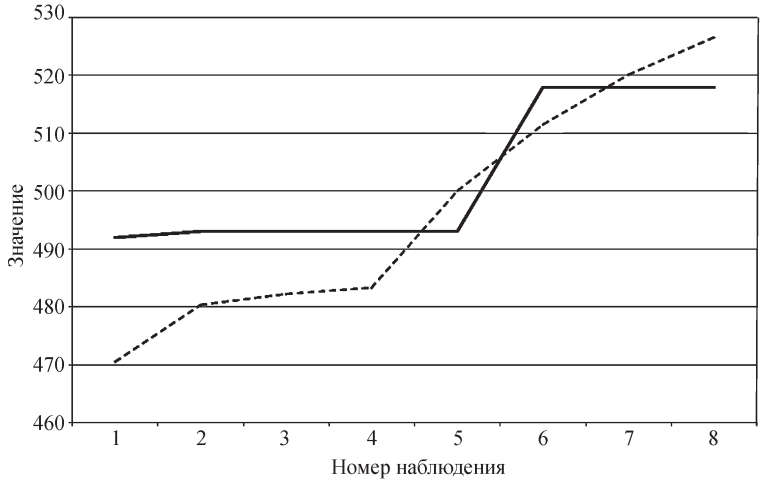


Рис. 2. График наблюдений (сплошная линия) и прогноза по модели (штриховая линия) в пакете "Автоматизированная система динамического регрессионного моделирования (АС ДРМ)"

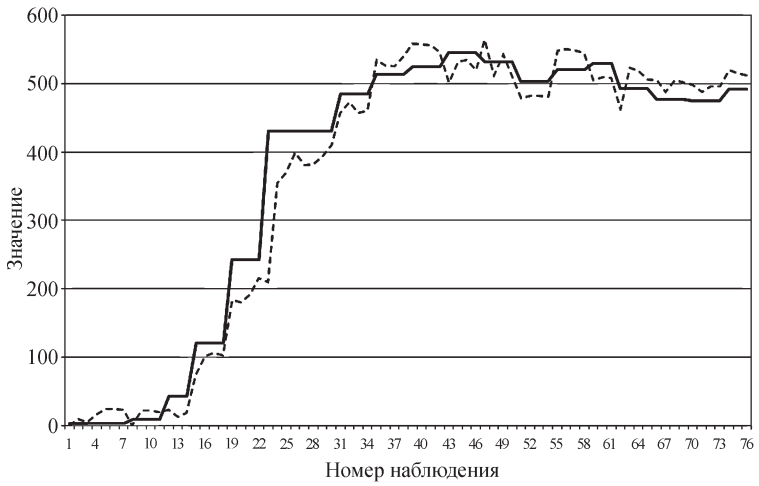


Рис. 3. Графики исходного (сплошная линия) и аппроксимированного (штриховая линия) временных рядов в системе Statistica

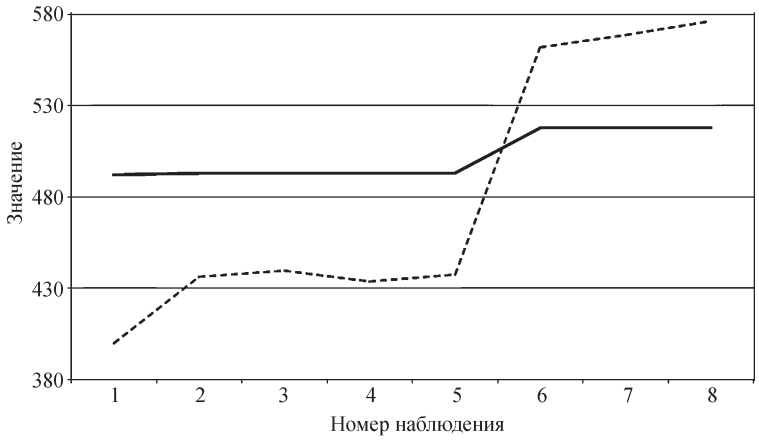


Рис. 4. Графики наблюдений (сплошная линия) и предсказанных значений (штриховая) временных рядов в системе Statistica

По модели (7) выполнен прогноз на восемь значений. На рис. 2 показан график предсказанных (штриховая линия) и исходных (сплошная линия) значений ВР.

Статистически значимый коэффициент корреляции между точечными оценками прогноза и исходными данными равен 0,947.

Сравнение предложенной методики анализа со стандартным подходом. Для сравнительного анализа эффективности разработанной методики и программного обеспечения использовался стандартный подход построения моделей авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС), реализованный в пакете Statistica [6]. На рис. 3 показаны графики исходных данных (сплошная линия) и аппроксимации по модели АРПСС, построенные в системе Statistica (штриховая линия).

По построенной модели выполнен прогноз на восемь значений. На рис. 4 показан график предсказанных (штриховая линия) и исходных (сплошная линия) значений ВР.

В таблице представлены результаты сравнения по точности аппроксимации (внутреннее СКО) и по точности прогнозирования (внешнее СКО) для всех ВР, полученных по восьми каналам измерения вибраций.

Результаты численных экспериментов свидетельствуют об эффективности использова-

№ канала	Система Statistica		Методика АС ДРМ	
	внутреннее СКО	внешнее СКО	внутреннее СКО	внешнее СКО
1	31,17	40,46	27,03	36,95
2	39,01	45,40	32,03	34,16
3	2,34	6,53	1,76	2,19
4	73,76	76,09	70,43	72,43
5	5,89	5,79	5,40	4,04
6	81,68	91,96	82,15	88,29
7	162,83	7,58	154,86	7,07
8	5,63	12,57	5,41	3,05

ния методики адаптивного динамического регрессионного моделирования и применения программного комплекса АС ДРМ при моделировании и прогнозировании ВР вибраций гидроагрегата: точность моделирования и прогнозирования возрастает по сравнению с точностью при использовании методики АРПСС. Повышение точности аппроксимации и прогнозирования обусловлено применением многоэтапной структурно-параметрической идентификации с адаптацией к нарушениям основных предположений регрессионного анализа, что позволяет принимать с определённым запасом времени управленческие решения, направленные на предупреждение опасной ситуации.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0672 (федеральная целевая программа "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России").

Библиографические ссылки

1. **Стандарт** организации ОАО РАО "ЕЭС России". "Методика оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций". СТО 17330282.27.140.001–2006.

2. **Валеев С.Г.** Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. М.: Наука, 1991. 272 с.

3. **Клячкин В.Н.** Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса. М.: Физматлит, 2011. 196 с.

4. **Валеев С.Г., Кувайскова Ю.Е.** Программное обеспечение обработки временных рядов техногенных характеристик // Обозрение прикладной и промышленной математики. М.: ТВП, 2009. Т. 16. Вып. 6. С. 1037–1038.

5. **Алёшина А.А.** Применение адаптивного регрессионного моделирования к системе временных рядов // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования: сб. науч. тр. Всероссийской школы–семинара аспирантов, студентов и молодых учёных. Ульяновск: УлГТУ, 2012. С. 74–78.

6. **Боровиков В.П., Ивченко Г.И.** Прогнозирование в системе Statistica в среде Windows. М.: Финансы и статистика, 1999. 382 с.

УДК 621.791.75.03-52

В.А. Лебедев, д-р техн. наук
(Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Республика Украина)
valpaton@ukr.net

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ С ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧЕЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ

Рассмотрено обоснование снижения энергозатрат при дуговой сварке плавящимся электродом с управляемой импульсной подачей. Проанализировано уравнение, определяющее мощность дугового процесса, в котором используется управляемая импульсная подача электродной проволоки.

Ключевые слова: механизированная сварка, наплавка, электродная проволока, импульс, подача, энергоресурсосбережение.

Energy consumption decrease explanation at arc welding by a melting electrode with pulse wire feed is considered. The equation determining of the arc process capacity which uses controlled pulse wire feed is analysed.

Key words: the mechanized welding, pad weld, electrode wire, impulse, feed, energy resources saving.

Дуговая механизированная сварка и наплавка постоянно совершенствуются специалистами сварочного производства и разработчиками оборудования для этих процессов. Имеются способы улучшения технико-технологических показателей дуговой механизированной сварки, восстановительной и упрочняющей наплавки, а одним из самых важных показателей при высоком качестве выполняемых работ являются реальные энергетические и ресурсные затраты. К наиболее эффективным способам улучшения показателей следует отнести аппаратные с импульсным воздействием на дуговой процесс, а точнее с возможностью переноса электродного металла импульсным источником питания, импульсным механизмом подачи электродной проволоки, с помощью вибродугового процесса,

созданием оптимальных условий для переноса капли электродного металла за счёт алгоритмизации параметров источника в микроцикле переноса, комбинацией импульсных воздействий от импульсного источника и импульсной подачей электродной проволоки.

Известно [1], что использование импульсного источника сварочного тока позволяет обеспечить эффективный КПД порядка 80–85 %, т.е. энергозатратно [2].

Управление микроциклом переноса электродного металла за счёт изменения параметров источника сварочного тока – весьма сложная задача, если учитывать разнообразие способов и режимов сварки и наплавки плавящимся электродом [3]. Вибродуговая наплавка специфична и сложна с точки зрения технической реализации из-за особенностей получения управляемого переноса.

Опыт показывает, что наиболее перспективным способом управления переносом электродного металла как по энергетическим показателям, так и по используемым аппаратным средствам и оборудованию в настоящее время является управляемая импульсная подача электродной проволоки. Генерирование импульсов подачи возможно как за счет специальных электродвигателей в механизме подачи электродной проволоки (например, шаговых или таких, которые описаны в работе [4]), так и при использовании механических модуляторов (импульсных механизмов) различных конструкций [5].

В настоящее время применение специальных электродвигателей для управляемой импульсной подачи электродной проволоки в дуговом механизированном оборудовании для сварки и наплавки пока достаточно проблематично из-за технической сложности и относительно большой стоимости.

Более просты, достаточно дёшевы системы импульсной подачи на основе преобразователей вращательного движения вала электродвигателя в импульсное движение движителей (захватов, роликов), перемещающих электродную проволоку. Современные конструкции импульсных механизмов подачи базируются на квазиволновых преобразователях (КВП), которые практически не требуют дополнительных затрат, проще и надёжнее, чем обычные редукторные механизмы, и позволяют обосновать выбор способа управления переносом электродного металла и механизма импульсной электродной проволоки на основе КВП.

Рассмотрим особенности сварки с управляемой импульсной подачей электродной проволоки механизмами на основе КВП, связанными с энергосбережением.

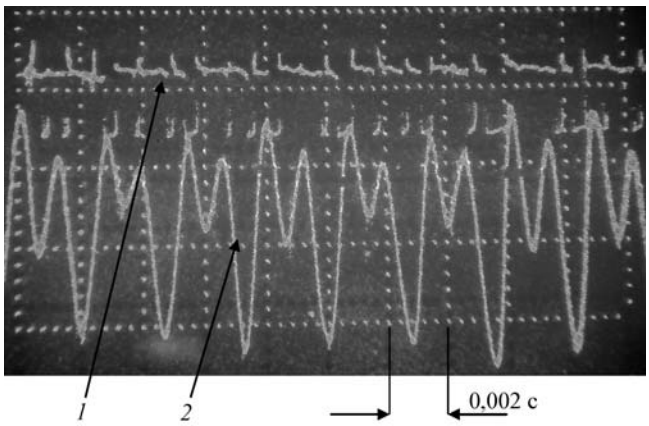


Рис. 1. Характерные осциллограммы напряжения (*1*) и скорости импульсной подачи (*2*) при сварке с управляемыми короткими замыканиями

Выбор конструкции механизма импульсной подачи на основе КВП обусловливается отсутствием нестабильных узлов и элементов в его кинематических связях, а также высокими показателями надёжности. На рис. 1 показаны осциллограммы процесса сварки в среде CO_2 при импульсной подаче электродной проволоки Св08Г2С диаметром 1,2 мм, обеспечивающей интегральное значение тока сварки 100–120 А. Осциллограммы – это последовательность одинаковых импульсов (импульсы тока адекватны импульсам подачи), что практически недостижимо при использовании импульсных источников сварочного тока, а также других механизмов импульсной подачи.

В работе [6] объясняется экономия электроэнергии при сварке с импульсной подачей электродной проволоки. Здесь говорится лишь об экономии той электроэнергии, которая затрачивается непосредственно на процесс плавления. Другие энергетические затраты (зачистка от брызг, использование специального инструмента, исправление швов и др.) во внимание не берутся, хотя их экономия при рассматриваемом процессе также имеет место.

В работе [7] рассмотрена возможность экономии электроэнергии при сварке с импульсными составляющими скорости при подаче электродной проволоки.

Непосредственные замеры расхода электроэнергии на плавление электродной проволоки при дуговой сварке со значительными колебаниями тока и напряжения процесса осуществить достаточно сложно.

Для оценки энергетических затрат при различных видах переноса электродного металла предложено использовать определение количества электричества, которое необходимо для реализации сварочного процесса. При этом учитывается, что механизированная дуговая сварка осуществляется от источников с жёсткой вольт-амперной характеристикой. Для этого разработана система измерения, которая применялась при определении удельных затрат электричества в пяти вариантах переноса электродного металла при сварке в среде CO_2 в случаях невозмущённой и импульсной подачи электродной проволоки Св08Г2С диаметром 1,2 мм. Система подробно рассмотрена в работе [8], её выходным параметром является количество электричества, затрачиваемого на процесс сварки. Характеристики переноса электродного металла и расходы электроэнергии с учётом адекватности затраченного электричества приведены в таблице.

При исследованиях использовался полуавтомат типа ПШ107И с механизмом импульсной подачи, обеспечивающим регулируемую форму импульса, позволяющий получить различные ускорения электродной проволоки и выбрать из них необходимые [9].

В качестве источника сварочного тока выбран простой по конструкции выпрямитель типа ВС300 с регулированием напряжения холостого хода переключением обмоток трансформатора, т. е. с неискажённой формой выходного напряжения, позволяющей исключить влияние формы напряжения на плавление электродной проволоки.

Из таблицы видно, что на потребление энергии при сварке существенно влияет способ сварки: при импульсной подаче по сравнению с обычной (невозмущённой) потребление энергии снижается, при этом с увеличением ускорения движения электродной проволоки в импульсе фиксируется снижение потребления энергии.

Указанные выше результаты подтверждаются математическими моделями формирования капли электродного металла, предложенными в работе [10]. Уравнение, описывающее энергозатраты P на плавление электродной проволоки при импульсной подаче с частотой f, имеет следующий вид [11]:

$$P = \beta\eta\{k_ф T - f\{e^{-aT}[(a\sin(bT-\mu) - b\cos(bT-\mu)] + a\sin(\mu) - b\cos(\mu)\}/b\delta\}, \quad (1)$$

где β, η – коэффициенты, характеризующие электродную проволоку, параметры сварочной цепи и дугового процесса; $k_ф$ – коэффициент формы импульса подачи проволоки; $\delta = \sqrt{a^2 + b^2}$; T – время цикла переноса электродного металла; b – частота затухающих колебаний в сварочной цепи при плавлении электродной проволоки; μ – сдвиг фаз колебательных процессов; a – величина, определяемая постоянной времени сварочной цепи.

Следует добавить, что практическое использование полуавтоматической наплавки с импульсной подачей электродной проволоки подтверждает факт экономии энергии [12] (применение сплошной и порошковой проволоки), так же как и выводы работы [13], рассматривающей общие закономерности плавления электродной проволоки, в том числе и при механизированной сварке в среде защитного газа.

Каким образом достигается повышение коэффициента наплавки при применении механического управления переносом электродного металла? Для того чтобы понять и объяснить это в соответствии с литературой [14, 15], для процесса сварки характерно практически пропорциональное увеличение коэффициента расплавления с увеличением тока и напряжения дугового процесса, а следовательно, и мощности дуги. Таким образом, очевидно, что экономия электроэнергии и коэффициент расплавления имеют прямо пропорциональную зависимость. При дуговом механизированном процессе сварки с импульсной подачей электродной проволоки имеются и другие факторы, основные из которых связаны с перераспределением энергии, расходуемой на плавление

Удельные расходы энергии при разных характеристиках и способах сварки

Виды переноса электродного металла	С естественными короткими замыканиями	С управляемыми короткими замыканиями		Без коротких замыканий	
		Ускорение в импульсе 20–30 м/с^2	Ускорение в импульсе 40–60 м/с^2	Величина импульса тока 50 А	Величина импульса тока 100 А
Удельный расход электричества $q_{пл}$, (А·С)/мм^3	2,5–2,7	2,1–2,3	1,9–2,0	1,8	До 1,6

электродной проволоки, что позволяет упорядочить циклы переноса, изменить соотношение времени короткого замыкания и горения дуги.

На рис. 2 представлены некоторые характерные зависимости мощности сварочного процесса от частоты импульсной подачи для трёх значений постоянной времени сварочной цепи T_1 и двух значений коэффициента формы импульса подачи проволоки $k_ф$ (кривые *1а*, *1б*, *2а*, *2б*, *3а*, *3б*).

Исследуя уравнение (1) и анализируя результаты расчётов по реальным параметрам дуги и оборудования, реализующего дуговую сварку с импульсной подачей электродной проволоки, представленные на рис. 2, можно выделить и отметить следующее:

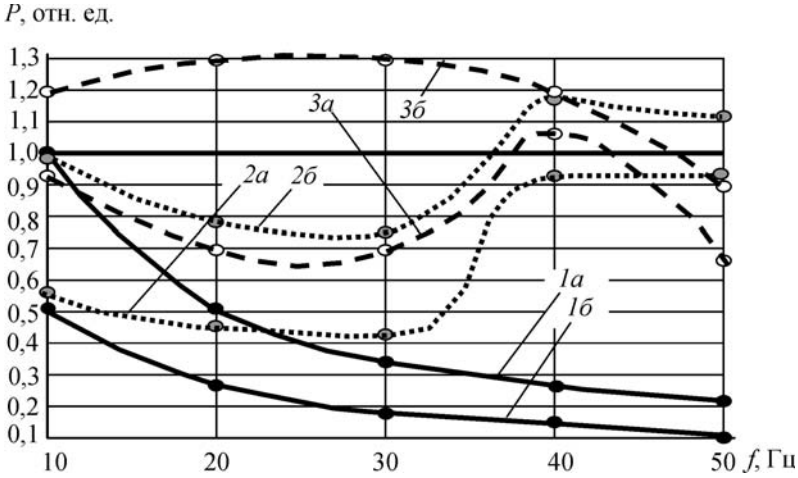


Рис. 2. Мощность процесса сварки при изменении частоты подачи электродной проволоки:

1а – при T_1 = 0,01 с; $k_ф$ = 1; *1б* – при T_1 = 0,01 с; $k_ф$ = 0,5; *2а* – при T_1 = = 0,05 с; $k_ф$ = 1; *2б* – при T_1 = 0,05 с; $k_ф$ = 0,5; *3а* – при T_1 = 0,1 с; $k_ф$ = 1; *3б* – при T_1 = 0,1 с; $k_ф$ = 0,5

по результатам экспериментальных исследований, частично представленных на рис. 2, уравнение с достаточной степенью точности (70–75 %) описывает изменения энергии при сварке с импульсной подачей электродной проволоки;

очевидно, что при малых постоянных времени сварочного контура (дуга – источник сварочного тока) с повышением частоты импульсов энергетические затраты на сварочный процесс снижаются, что отмечено по результатам экспериментов с вибродуговой наплавкой, которая характеризуется управляемым переносом электродного металла, как показано в работе [16]. С увеличением постоянной времени энергетические затраты снижаются лишь на отдельных участках частот подачи. Значительное и определяющее влияние на энергетические характеристики процесса оказывают форма и скважность импульса подачи электродной проволоки. При этом влияние возрастает со снижением постоянной времени сварочной цепи.

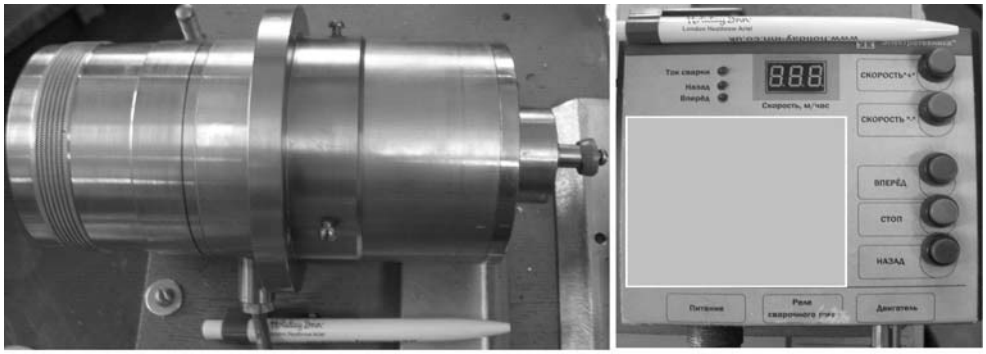
До настоящего времени импульс нужной формы формировался за счёт использования специальной разработки механизмов управляемой импульсной подачи, позволяющих решать задачи формирования капли электродного металла с оптимальными для технологического сварочного процесса параметрами. Получить дополнительный эффект в снижении энергетических затрат, используя только механические преобразователи, весьма сложно, так как в этом случае ограничены возможности регулирования механизма. Поэтому в системах подачи используются быстродействующие вентильные электроприводы с микропроцессорным управлением. Разработка, изготовление и испытания таких систем ведутся при участии специалистов ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Возможности специальных вентильных электроприводов при использовании в качестве управляемых генераторов механических импульсов с регулированием параметров (частота до 70 Гц, скважность – от подачи с постоянной скоростью до величины, ограничиваемой необходимой интегральной скоростью для выбранного процесса; любое сочетание последовательности импульсов – подача, пауза, реверс – и любое сочетание скоростей в этих последовательностях) для осуществления импульсной подачи электродной проволоки рассмотрены в работе [17]. Преимущества таких систем очевидны и состоят в достаточно быстрой адаптации электропривода к изменяющимся задачам сварочного производства, высокой надёжности (безредукторная подача электродной проволоки) и способности воспроизводить импульсы с параметрами, которые одновременно бы удовлетворяли двум основным критериям:

получению качественного сварного соединения с минимальными потерями электродного металла;

дальнейшему снижению затрат электроэнергии.

На рис. 3 представлен безредукторный вентильный электропривод для управления импульсной подачей электродной проволоки, рассчитанный на безопасное для рассматриваемого класса сварочного оборудования постоянное напряжение питания (48 В).

Что касается источников сварочного тока, то решение задач энергоресурсосбережения при при-



Электропривод Система управления

Рис. 3. Специализированный вентильный безредукторный электропривод механизма импульсной подачи электродной проволоки

менении дугового механизированного и автоматического оборудования с импульсной подачей электродной проволоки основывается на применении инверторных источников или использовании чопперных и конвертерных систем питания дуги с низкими значениями постоянных времени сварочной цепи.

В заключение отметим, что, учитывая важность решения задач получения качественных характеристик сварного шва и энергоресурсосбережения, совершенствование дуговых механизированных процессов сварки и наплавки будет основываться на применении систем подачи электродной проволоки и питания дуги с импульсными алгоритмами функционирования.

Библиографические ссылки

1. **Судник В.А., Иванов А.В., Дилтей У.** Математическая модель источника теплоты при дуговой сварке плавящимся электродом в смеси защитных газов // Сварочное производство. 2000. № 9. С. 9–16.

2. **Потапьевский А.Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М.: Машиностроение, 1974. 240 с.

3. **Сараев Ю.Н.** Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. Новосибирск: Наука, 1994. 108 с.

4. **Кенио Т.** Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.

5. **Лебедев В.А., Притула С.И.** Современные механизмы подачи электродной проволоки в аппаратах для механизированной сварки, наплавки и резки // Автоматическая сварка. 2006. № 4. С. 53–56.

6. **Анализ** технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки / Б.Е. Патон, В.А. Лебедев, В.Г. Пичак, С.И. Полосков, Л.Н. Щавелев // Сварочное производство. 2002. № 2. С. 24–31.

7. **Бондаренко В.Л.** Дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки – процесс СМТ, предложенный фирмой "Фрониус" // Автоматическая сварка. 2004. № 12. С. 55–58.

8. **Лебедев В.А.** Оценка затрат энергии при механизированной дуговой сварке плавящимся электродом // Электротехника и электромеханика. 2007. № 6. С. 48–51.

9. **Лебедев В.А., Пичак В.Г., Смолярко В.Б.** Механизмы импульсной подачи электродной проволоки с регулированием параметров импульсов // Автоматическая сварка. 2001. № 5. С. 31–37.

10. **Лебедев В.А.** Определение аналитической зависимости между изменяющимися скоростями подачи и плавления электродной проволоки в условиях сварки с короткими замыканиями // Сварочное производство. 2008. № 9. С. 7–11.

11. **Лебедев В.А.** Аспекты выбора оборудования для электродуговой механизированной и автоматической сварки с импульсной подачей электродной проволоки // Электромашиностроение и электрооборудование. Межведомственный науч.-техн. сб. Вып. 70. Киев: Техника, 2008. С. 45–49.

12. **Практическое** применение дуговой наплавки с импульсной подачей электродной проволоки / В.А. Лебедев, А.Е. Коротынский, В.М. Мозок, В.Г. Пичак // Автоматическая сварка. 2001. № 2. С. 37–41.

13. **Букаров В.А., Ермаков С.С.** Анализ закономерностей изменения энергетических характеристик дуги при сварке плавящимся электродом // Сварочное производство. 1993. № 9. С. 7–9.

14. **Ерохин А.А.** Основы сварки плавлением. М.: Машиностроение. 1973. 447 с.

15. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением [под ред. Б.Е. Патона]. М.: Машиностроение. 1974. 768 с.

16. **Пацкевич И.Р., Попков А.М.** Характеристики плавления электродной проволоки при автоматической вибродуговой наплавке // Сварочное производство. 1965. № 2. С. 11–14.

17. **Лебедев В.А., Рымша В.В., Радимов И.Н.** Современные вентильные электроприводы в системах механизированного сварочного оборудования // Електромашинобудування та Електрообладнання. Вип. 74. Киев: Техника, 2009. С. 22–24.

УДК 519.6:539.3

С.А. Чернов, канд. техн. наук
(Ульяновский государственный технический университет)

727122@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕДЕФОРМИРУЕМЫХ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены узловые соединения стержней с помощью недеформируемых косынок в различных стержневых системах. Для моделирования узловых соединений предложены матрицы жёсткости элементов, полученные переносом узловых сил и перемещений.

Ключевые слова: стержень, соединения стержней, косынка.

Rod nodal connections by means of not deformable kerchiefs in various rod systems are considered. For nodal connections modeling matrixes of rigidity of the elements rigidity matrixes, received by nodal forces and movements transfer for nodal connections modeling are proposed.

Key words: rod, rods connections, kerchief.

В реальных стержневых системах узлы соединения стержней не являются математической точкой. На практике в расчётной схеме соединение стержней задаётся в некотором узле (точке), расположенном в зоне их соединения, что приводит к определённым погрешностям. В стержневых системах соединения стержней в узлах часто выполняются с помощью косынок (фасонок), которые имеют некоторые размеры. Каждое такое соединение необходимо рассматривать как абсолютно твёрдое тело, так как между соседними стержнями расположены недеформируемые косынки.

Рассмотрим стержень плоской стержневой системы, концы которого соединены с недеформируемыми косынками (рис. 1). Приведены положительные направления трёх узловых сил, перемещений и принятая последовательность их нумерации.

Все узлы стержня расположены в плоскости осей $X-Y$ местной системы координат XYZ с началом в узле *1*. Ось X направлена вдоль оси стержня. Для моделирования плоской стержневой системы используется балочный конечный элемент (КЭ) 1–2, работающий на растяжение–сжатие и изгиб. Точки *1*, *2* являются узлами КЭ.

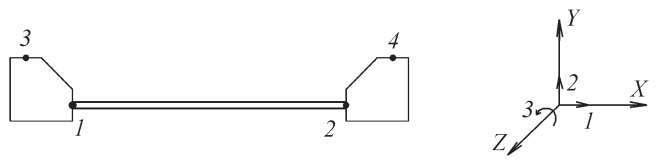


Рис. 1. Стержень *1–2* плоской стержневой системы:
3, *4* – узлы соседних стержневых конечных элементов

Получим матрицу жёсткости балочного КЭ с узлами *3* и *4*, учитывающую размеры недеформируемых косынок в соединении стержней, с помощью преобразований матрицы жёсткости КЭ 1–2.

Уравнение равновесия балочного КЭ 1–2

$$\{P_{1-2}\}=[K_{1-2}]\{Z_{1-2}\}$$

может быть сгруппировано и разбито на подматрицы по узлам КЭ [1]:

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}\times\begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{Bmatrix},$$

где $K_{11}, \ldots, K_{22}$ – подматрицы порядка 3; $\{P_1\}$, $\{Z_1\}$ и $\{P_2\}$, $\{Z_2\}$ – векторы сил и перемещений узлов *1* и *2* соответственно.

Перемножим сгруппированные элементы матриц:

$$\begin{aligned} \{P_1\}&=[K_{11}]\{Z_1\}+[K_{12}]\{Z_2\}; \\ \{P_2\}&=[K_{21}]\{Z_1\}+[K_{22}]\{Z_2\}. \end{aligned} \qquad (1)$$

Приведём 3-мерные векторы $\{Z_1\}$ и $\{Z_2\}$ узловых перемещений начала и конца балочного КЭ 1–2 соответственно к узлам *3* и *4*.

Согласно гипотезе плоских сечений вектор $\{Z_3\}$ перемещений в узле *3* запишется в виде

$$\{Z_3\}=\begin{Bmatrix} U_3 \\ V_3 \\ \varphi_z \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} -\varphi_z y_3+U_1 \\ \varphi_z x_3+V_1 \\ \varphi_z \end{Bmatrix},$$

где U, V – линейные перемещения в направлении осей X, Y соответственно; φ_z – угловое перемещение относительно оси Z; x_3, y_3 – координаты 3-го узла.

В матричной форме вектор $\{Z_3\}$ узловых перемещений определяется выражением:

$$\{Z_3\} = [h_3]\{Z_1\},$$

где $[h_3]$ – матрица переноса перемещений 3-го узла:

$$[h_3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_3 \\ 0 & 1 & x_3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Очевидно, вектор $\{Z_1\}$ узловых перемещений в узле *1* определяется выражением:

$$\{Z_1\} = [h_1]\{Z_3\}, \tag{2}$$

где $[h_1]$ – матрица переноса перемещений 1-го узла:

$$[h_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & y_3 \\ 0 & 1 & -x_3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

По аналогии вектор $\{Z_2\}$ узловых перемещений запишется в виде

$$\{Z_2\} = [h_2]\{Z_4\}, \tag{3}$$

где $[h_2]$ – матрица переноса перемещений 2-го узла:

$$[h_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & y_4 \\ 0 & 1 & -(x_4 - x_2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Из преобразований перемещений (2), (3) следуют преобразования сил:

$$\begin{aligned} \{P_3\} &= [h_1]^T \{P_1\}; \\ \{P_4\} &= [h_2]^T \{P_2\}. \end{aligned} \tag{4}$$

Подставив в выражения (4) уравнения (1) и с учётом формул (2) и (3) векторы $\{P_3\}$, $\{P_4\}$ сил узлов *3* и *4* определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \{P_3\} &= [h_1]^T [K_{11}] [h_1] \{Z_3\} + [h_1]^T [K_{12}][h_1] \{Z_4\}; \\ \{P_4\} &= [h_2]^T [K_{21}] [h_2] \{Z_3\} + [h_2]^T [K_{22}][h_2] \{Z_4\}. \end{aligned}$$

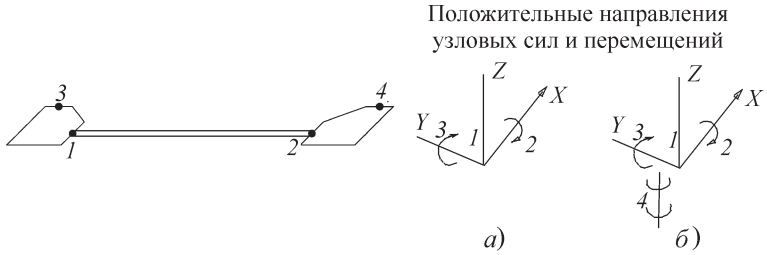


Рис. 2. Стержень *1–2* плоско-пространственной стержневой системы: *3*, *4* – узлы соседних стержневых конечных элементов

Отсюда следует матрица $[K_{3-4}]$ жёсткости балочного КЭ с узлами *3* и *4*:

$$[K_{3-4}] = \begin{bmatrix} h_1^T K_{11} h_1 & h_1^T K_{12} h_1 \\ h_2^T K_{21} h_2 & h_2^T K_{22} h_2 \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Если сформировать матрицу переноса сил

$$[H_{1-2}] = \begin{bmatrix} h_1 & 0 \\ 0 & h_2 \end{bmatrix},$$

то матрицу жёсткости балочного КЭ можно определить по формуле

$$[K_{3-4}] = [H_{1-2}]^T [K_{1-2}][H_{1-2}]. \tag{6}$$

Для моделирования плоскопространственной стержневой системы используются балочный и тонкостенный стержневой КЭ, работающие на изгиб и кручение. На рис. 2 приведён стержневой КЭ 1–2 плоскопространственной стержневой системы, расположенной в плоскости осей $X-Y$, концы которого соединены с недеформируемыми косынками.

Положительные направления узловых сил, перемещений балочного и тонкостенного стержневого КЭ и последовательность их нумерации приведены на рис. 2, *а* и *б*.

Согласно гипотезе плоских сечений вектор $\{Z_3\}$ перемещений в узле *3* запишется в виде

$$\{Z_3\} = \begin{Bmatrix} W_3 \\ \varphi_x \\ \varphi_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varphi_x y_3 - \varphi_y x_3 + W_1 \\ \varphi_x \\ \varphi_y \end{Bmatrix},$$

где W – линейные перемещения в направлении оси Z; φ_x, φ_y – угловые перемещения относительно осей X и Y.

В матричной форме вектор $\{Z_3\}$ узловых перемещений определяется выражением:

$$\{Z_3\} = [h_3]\{Z_1\},$$

где $[h_3]$ – матрица переноса перемещений 3-го узла:

$$[h_3]=\begin{bmatrix}1 & y_3 & -x_3\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}.$$

Согласно (2) матрица переноса перемещений 1-го узла вычисляется по формуле

$$[h_1]=\begin{bmatrix}1 & -y_3 & x_3\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix},$$

а матрица переноса сил 2-го узла (3):

$$[h_2]=\begin{bmatrix}1 & -y_4 & x_4-x_2\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}.$$

В узлах тонкостенного стержневого КЭ, кроме линейного и угловых перемещений, присутствует и депланация φ'_x сечения при кручении стержня, а в векторе узловых сил соответственно бимомент B_ω. В этом случае вектор $\{Z_3\}$ перемещений в узле *3* стержня плоскопространственной тонкостенной стержневой системы запишется в виде

$$\{Z_3\}=\begin{Bmatrix}W_3\\ \varphi_x\\ \varphi_y\\ \varphi'_x\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\varphi_x y_3-\varphi_y x_3+W_1\\ \varphi_x\\ \varphi_y\\ \varphi'_x\end{Bmatrix}.$$

Тогда матрица переноса перемещений 3-го узла имеет вид

$$[h_3]=\begin{bmatrix}1 & y_3 & -x_3 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}.$$

По аналогии матрица переноса перемещений 1-го узла вычисляется по формуле

$$[h_1]=\begin{bmatrix}1 & -y_3 & x_3 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},$$

а матрица переноса перемещений 2-го узла:

$$[h_2]=\begin{bmatrix}1 & -y_4 & x_4-x_2 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}.$$

Так как в недеформируемых соединениях тонкостенных стержней в узлах *1* и *2* депланация $\varphi'_x=0$ [2], то после вычисления матрицы жёсткости $[K_{3-4}]$ КЭ по формуле (5) или (6) необходимо выполнить с элементами матрицы, расположенными на главной диагонали, следующие преобразования:

$$\overline{K}_{4,4}=K_{4,4}\cdot 10^8;\quad \overline{K}_{8,8}=K_{8,8}\cdot 10^8.$$

Это приближённый способ, но достаточно точный [1].

Если использовать принцип наложения для приведённых матриц плоской и плоскопространственной стержневых систем, то можно получить матрицы переноса перемещений 1-го и 2-го узлов пространственного балочного КЭ, используемого для моделирования пространственной стержневой системы:

$$[h_1]=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_3\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_3\\ 0 & 0 & 1 & -y_3 & x_3 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix};$$
$$[h_2]=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_4\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -(x_4-x_2)\\ 0 & 0 & 1 & -y_4 & x_4-x_2 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}. \qquad (7)$$

При расчёте пространственной тонкостенной стержневой системы в матрицах $[h_1]$, $[h_2]$ переноса сил (7) вводится седьмая строка и столбец, соответствующие бимоменту, а в матрице жёсткости $[K_{3-4}]$ пространственного тонкостенного стержневого КЭ выполняются следующие преобразования:

$$\overline{K}_{7,7}=K_{7,7}\cdot 10^8;\quad \overline{K}_{14,14}=K_{14,14}\cdot 10^8.$$

Моделирование недеформируемых косынок соединения стержней в узлах стержневых систем позволяет учитывать размеры узловых соединений в стандартной (для конечно-элементной процедуры) форме. Рассмотренный учёт размеров узловых соединений реализован в программах для ЭВМ [3–5].

Библиографические ссылки

1. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике / пер. с англ. под ред. Б.Е. Победри. М.: Мир, 1975. 541 с.

2. **Бычков Д.Б.** Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. М.: Госстройиздат, 1962. 475 с.

3. **Свидетельство** об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005611943. Статика произвольной плоской стержневой системы / С.А. Чернов, А.Н. Черный; заявитель и правообладатель Ульян. гос. техн. ун-т. № 2005611339; заявл. 7.06.2005 / зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 3.08.2005.

4. **Свидетельство** об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011616979. Статика произвольной плоскопространственной стержневой системы / С.А. Чернов; заявитель и правообладатель Ульян. гос. техн. ун-т. № 2011615360; заявл. 15.07.2011 / зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 8.09.2011.

5. **Свидетельство** об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610529. Статика произвольной пространственной стержневой системы / С.А. Чернов; заявитель и правообладатель Ульян. гос. техн. ун-т. № 2005613263; заявл. 9.12.2005 / зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 7.02.2006.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов

2012 г. Объём 304 с. Формат 60x88 1/16 ISBN 978-5-94275-657-4 Цена 500 р.

Рассмотрены общие сведения о резании материалов, вопросы стружкообразования, сложные схемы резания, тепловые явления, прочность, износ и стойкость инструментов, обрабатываемость материалов резанием и особенности процесса резания многолезвийными и абразивными инструментами.

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов: “Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств”.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 070

М.С. Голосовский
(Компания "Солотен", Москва)
mgolosovskiy@soloten.com

МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В РАМКАХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ

Рассмотрены проблемы, возникающие при разработке экспериментальных образцов программных продуктов. Предложена модель жизненного цикла программного обеспечения в рамках НИР.

Ключевые слова: модель жизненного цикла, гибкие процессы разработки, agile, итеративная разработка.

The problems arising at development of software products experimental samples are considered. The life cycle model of the software within scientifically-research works is offered.

Key words: life cycle model, flexible development processes, agile, iterative development.

Основные процессы разработки программного обеспечения (ПО) схожи с процессами разработки в других инженерных областях и состоят из следующих стадий: проектирование, разработка (создание образца изделия), испытание (тестирование), серийное производство, сопровождение. Но при этом программная инженерия, являясь относительно молодой областью инженерной науки, имеет очень мало успешных проектов (до 80 % терпят крах) [1].

Сложность разработки объясняется четырьмя основными причинами [2, 3]: неопределённостью предметной области, из которой исходит заказ на разработку; трудностью управления процессом разработки; необходимостью обеспечить достаточную гибкость программы; неудовлетворительными методами описания поведения больших дискретных систем.

В проектах, содержащих в основе научно-исследовательскую составляющую, трудность управления процессами разработки усиливается необходимостью поиска оптимального решения задачи НИР, высокой степенью неопределённости предметной области и отсутствием точных и неизменных требований при разработке программного образца.

Модель жизненного цикла разработки программного обеспечения в НИР. В рамках проведения НИР по разработке ПО основной моделью разработки является водопадная модель (ГОСТ 34-й серии), предложенная В. Роем в 1977 г. [4]. Модель подразумевает последовательный переход от этапа анализа предметной области к этапу снятия с эксплуатации. Но в условиях неопределённости предметной области часто приходится дорабатывать и изменять облик разрабатываемого ПО по следующим причинам: на начальных этапах допускаются ошибки в модели предметной области; проводится проверка гипотез, которые могут оказаться не состоятельными; проводится уточнение моделей на уровне человеко-машинного взаимодействия; отсутствие точного понимания свойств и характеристик результирующего продукта; использование новых технологий и инструментов, которые могут оказаться неприменимыми в исследуемой области.

В связи с этим классическая водопадная модель оказывается неприменимой, и поэтому необходимо использовать итеративную модель, ориентированную на частые изменения разрабатываемой системы. В мировой практике при разработке ПО в условиях изменяющихся требований и высокой неопределённости предметной области применяются такие итеративные гибкие процессы (методологии) разработки семейства Agile [5–8], как экстремальное программирование, scrum, kanban, OpenUP и др. Основной идеей, лежащей в основе этих процессов, является частая смена итераций с получением на каждой работающего программного образца (пусть и реализующего не весь функционал, заложенный на этапе постановки задачи и анализа требований). Основным достоинством этого подхода является возможность быстро реагировать на возникающие изменения и изменять направление разработки. Но перед внедрением

процессов семейства agile (гибкие процессы) имеется ряд препятствий:

при проведении НИР требуется полный комплект документации на разработанное ПО, что является противоречием основному принципу гибких процессов разработки "Работающий программный продукт важнее полной документации";

снижение качества получаемого программного продукта, когда невозможно получить новую версию за короткую итерацию;

все проекты в рамках выполнения НИР, как правило, выполняются в жёсткой функциональной структуре организации, что препятствует использованию принципа самоорганизующихся команд.

Для решения указанных выше проблем предложена модель разработки ПО, основанная на смеси инкрементной и итеративной разработки с параллельным формированием программной документации. Существует различие между итеративной и инкрементной разработкой ПО [9, 10].

Итеративная разработка подразумевает создание системы (пусть с ограниченным функционалом) и её последующее улучшение в течение нескольких итераций. Достоинством этой разработки является возможность получения работающего образца на каждой итерации с оценкой его соответствия требованиям и необходимости продолжения дальнейшей работы над программным образцом (модулем). Если требуется продолжение разработки, то всегда можно выбрать, продолжать работу с текущей итерацией или развивать альтернативное направление с одной из более ранних итераций. В этом кроется один из недостатков итеративного подхода – сложность управления итеративными проектами в связи с тем, что не всегда можно определить необходимое количество итераций для разработки программного образца.

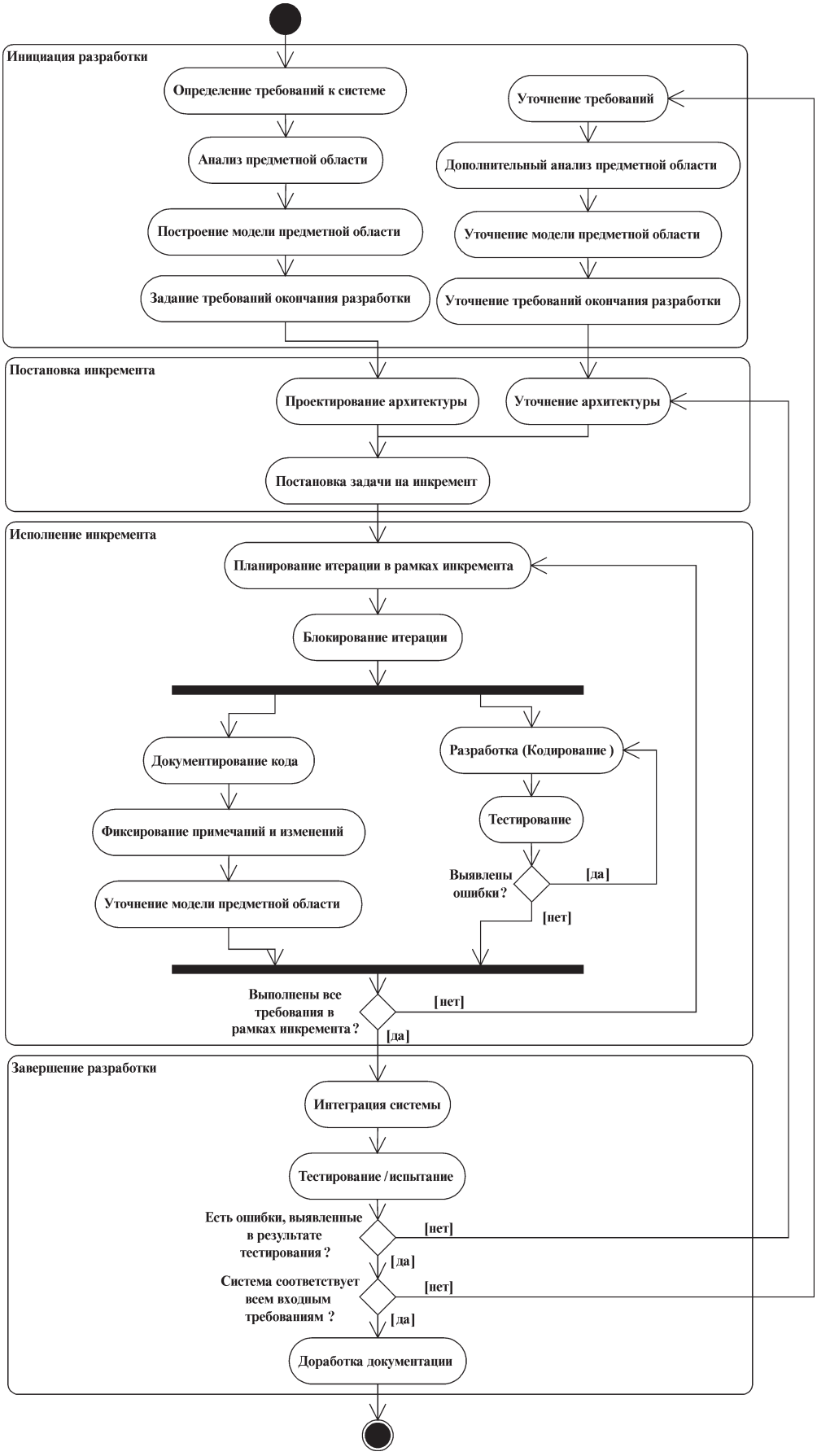
При *инкрементной разработке* программный продукт разбивается на несколько законченных функциональных частей, и в рамках каждого инкремента осуществляются разработка и тестирование одной функциональной части. Финальным инкрементом является интеграция всех модулей и тестирование всего программного продукта. Достоинством инкрементной стратегии разработки является лёгкое управление сроками и расписанием процесса разработки за счёт разбиения системы на части (количество частей известно, можно отслеживать разработку каждой части системы).

К недостаткам инкрементной разработки относятся: возможные ошибки в определении количества модулей на начальном этапе разработки, что может привести к срыву плана разработки; отсутствие возможности точного прогнозирования качества результирующего продукта, полученного в результате сборки исходных частей.

Модель разработки ПО в нотации диаграммы деятельности языка UML, представленная на рисунке, включает четыре основных этапа: инициация разработки, постановка инкремента, его исполнение и завершение разработки.

На этапе инициации разработки проводится определение требований к разрабатываемой системе; анализ предметной области, на основе результатов которого строится модель предметной области, формируются требования и критерии завершения разработки. На этапе постановки инкремента с использованием модели предметной области разрабатывается общая архитектура системы, выделяются модули, разрабатываемые в отдельных инкрементах. Определяются их интерфейсы для связи между собой и последующей интеграции. В крайнем случае, если систему нельзя разбить на несколько слабо связанных между собой частей (модулей), то модель выродится в итеративную систему. По завершении этапа постановки разрабатываются критерии достижения цели, определяющие, в каком случае можно считать инкремент завершённым.

Следующим идёт этап исполнения, на котором разрабатывается образец по итеративной стратегии. Начинается этап с планирования итерации, когда описываются возможные пути решения задачи и необходимые для их реализации инструменты и методы. На этой стадии можно применять различные методы коллективной генерации идей. После планирования проводится блокирование итерации, при котором выбирается один, наиболее подходящий вариант плана, методов и инструментов. При необходимости для выбора могут использоваться различные методы экспертных оценок (голосование, ранжирование, МАИ и др.). В общем случае в литературе по гибким процессам разработки рекомендуется применение итераций от одной до четырёх недель. На практике в рамках проведения НИР наиболее эффективной длительностью итерации оказались две недели. При этом завершение итерации совпадает с еженедельным подведением итогов. В связи с тем, что планируемая длительность итерации оказывается равной десяти рабочим дням, на планирование и блокировку итерации отводится порядка 4–8 ч. На выходе процесса блокировки итерации формируется план выполнения, содержащий задачи на итерацию, список исполнителей с указанием их задач,



Модель жизненного цикла разработки программного образца в рамках НИР

приоритеты или последовательность выполнения задач. После блокировки итерации выполнение осуществляется по двум параллельным ветвям: разработка программного образца и написание документации.

При разработке экспериментального образца рекомендуется применять стандарты кодирования, единые в рамках организации, а также выполнять комментирование программного кода. Для быстрого получения документированного программного кода рекомендуется использовать системы документирования исходных текстов Doxygen или PHPDocumentor. Также в процессе разработки возникают идеи: как можно сделать эту итерацию другими способами или улучшить разрабатываемый программный образец в рамках итерации. При выполнении этой модели должно выполняться основное правило: любые изменения в рамках итерации запрещены. Это связано с тем, что новые идеи могут возникать довольно часто, при этом частые изменения состава задач и инструментов в течение итерации могут привести к тому, что ничего не будет реализовано. Но возникающие идеи могут нести рациональное зерно, к тому же в результате разработки можно обнаружить ранее не учтённые пробелы в предметной области. Все предложения фиксируются в журнале предложений и изменений, там же фиксируются все выполненные за время итерации запланированные изменения. При необходимости вносятся изменения в модель предметной области. Ветка разработки (написания кода) завершается тестированием. Если программный код не проходит тестирование, то возвращается на этап разработки. Рекомендуется в процессе тестирования использовать технологии TDD (Test Drive Development) [11] или модульное тестирование (Unit Testing). После прохождения тестирования проверяются, выполнены или нет все требования, поставленные на инкремент. Если все требования не выполнены, проводится новая итерация, но при планировании и блокировке итерации учитываются предложения и изменения, полученные на предыдущей итерации.

За этапом исполнения инкремента следует этап завершения разработки, т. е. проводится интеграция модулей, полученных в рамках предыдущих инкрементов. По завершении интеграции осуществляется тестирование и проверка всей системы на наличие ошибок. Если выявляются ошибки, то система дорабатывается, начиная с этапа постановки инкремента, на котором уточняется архитектура системы и выполняется одна или несколько итераций по доработке. Тестирование на соответствие исходным требованиям (проведение испытаний) проводится после устранения ошибок, возникших в результате интеграции модулей.

Недостатки и несоответствия, выявленные в процессе испытаний, могут носить более глобальный характер и потребовать проведения уточнения требований, дополнительного анализа предметной области, уточнения требований окончания разработки. По результатам выполненных испытаний формируется акт проведения испытаний. Заключительный процесс завершения разработки – процесс доработки документации.

Заключение. Предложенная модель жизненного цикла разработки ПО применена при разработке экспериментального образца программного комплекса (ЭО ПК) Платформы в рамках НИР "Исследование и оптимизация модели сетевого взаимодействия участников распределённой редакционной коллегии в процессах создания, редактирования, рецензирования и публикации материалов электронных изданий".

Использование модели позволило получить работающий ЭО ПК Платформы, сократить время на разработку отчётной и программной документации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Библиографические ссылки

1. **Брукс Ф.** Мифический человеко-месяц, или как создаются программные системы / пер. с англ. СПб.: Символ-Плюс, 2010. 304 с.

2. **Brooks F.** No Silver Bullet – Essence and Accident in Software Engineering // Proceedings of the IFIP Tenth World Computing Conference. 1986. P. 1069–1076.

3. **Буч Г.** Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений. М.: ИД "Вильямс", 2008. 720 с.

4. **Royce W.** Managing the Development of Large Software Systems // TRW. August 1970. P. 328–338.

5. **Beck K.** Embracing Change with Extreme Programming // IEEE Computer. 1999. Vol. 32. № 10. P. 70–77.

6. **Agile** – манифест разработки программного обеспечения. URL: http://agilemanifesto.org/iso/ru/ (дата обращения: 24.01.2013).

7. **Кон М.** Scrum: гибкая разработка ПО = Succeeding with Agile: Software Development Using Scrum. М.: ИД "Вильямс", 2011. 576 с.

8. **Larman C.** Agile and Iterative Development // A Manager's Guide. Addison-Wesley, 2004. 27 p.

9. **Ларман К., Базилию В.** Итеративная и инкрементальная разработка: краткая история // Открытые системы. 2003. № 9. С. 43–53.

10. **Cockburn A.** Using both incremental and iterative development // Cross Talk. The journal of defense software Engineering. May 2008. P. 27–30.

11. **Beck K.** Test Driven Development: By Example // Addison-Wesley Professional. 2002. 252 p.

КОМПАНИЯ 3М РАСШИРЯЕТ ЛОКАЛИЗАЦИЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ БАЗЫ В РОССИИ

Международная компания 3М, объединяющая более тридцати бизнес-направлений в области электроники, энергетики, здравоохранения, безопасности, промышленности и др., объявила о планах по углублению процесса локализации научно-исследовательской базы в России, расположенной на производственном комплексе компании в Волоколамске.

Подразделение компании 3М в России на протяжении 20 лет внедряет эффективные решения на российском рынке, способствующие повышению производительности труда, сокращению издержек производства, охрану здоровья работников предприятий. Товары компании с успехом применяются в таких отраслях, как промышленность, автомобильное, нефтехимическое производство, добыча нефти, газа и полезных ископаемых, а также в медицине, стоматологии и многом другом. Наиболее известными среди россиян остаются потребительские бренды 3М – Scotch®, Post-it®, Scotch-Brite®.

В 2008 г. компания запустила собственное производство, открыв свой первый завод в Волоколамске. С 2012 г. на этом производственном комплексе работают три лаборатории, специализирующиеся на средствах индивидуальной защиты, продукции для авторемонта и антикоррозионных покрытиях. Лаборатория по средствам индивидуальной защиты сертифицирована на глобальном уровне, создана инфраструктура, позволяющая производить и разрабатывать новые продукты и поддерживать локальное производство собственными силами. Научно-исследовательская лаборатория в России стала четвёртой лабораторией компании 3М в мире, разрабатывающей новые продукты в области респираторной защиты. До этого вся продукция компании 3М для защиты органов дыхания разрабатывалась в лабораториях США, Англии, Южной Кореи.

Главное преимущество сертифицированной локальной лаборатории – возможность самостоятельной разработки абсолютно новых продуктов с учётом специфики российского рынка. Один из примеров такой специфики – атомная промышленность России. На атомных станциях разработчики часто заходят в зону заражения, и им необходим одноразовый и мощный респиратор, так как после пребывания в заражённой зоне он сразу выбрасывается. На сегодняшний день в лаборатории уже ведутся проекты по разработке такого респиратора.

В лаборатории по авторемонту разработана новая универсальная шпатлёвка, состав ингредиентов которой соответствует стандартам качества компании и учитывает требования и особенности работы в автосервисах России.

В лаборатории антикоррозионных покрытий идёт работа над локализацией производства нового антикоррозионного покрытия Scotchkote. Этот материал позволяет добиться существенных требований к антикоррозионным покрытиям без использования хроматирования и изменения существующих технологических процессов на российских трубных заводах.

В 2014 г. планируется запуск второго завода на территории ОЭЗ "Алабуга" в республике Татарстан. Во второй половине 2014 г. компания вместе с российским партнёром планирует локализовать производство уникального продукта ACCR – высокотемпературного композитного провода для воздушных линий электропередач. Этот продукт является качественно новой заменой стандартным сталеалюминиевым проводам и позволяет значительно (до двух раз) увеличить пропускную способность существующих ЛЭП.

Локализация заложена в стратегию дальнейшего развития компании в России. Основным фактором развития станет дальнейшая локализация продукции. В 2011 г. доля локально произведённой продукции в продажах компании составляла 11 % (сегодня эта цифра составляет более 15 %), а к 2017 г. должна вырасти до 50 %. Инвестиции в развитие локального производства в течение 2012–2014 гг. должны составить в общей сложности 17,8 млн долларов. В лаборатории также разрабатываются новые антикоррозионные покрытия, которые в будущем помогут клиентам сократить энергетические затраты при применении, а также расширить свой портфель продукции под новые температурные и другие условия эксплуатации и строительства трубопроводов.

В 2013 г. компанией принята политика по стимулированию патентных сотрудников, которая служит дополнительным стимулом для инновационной и исследовательской деятельности. Данная политика предусматривает материальное стимулирование авторов инноваций, изобретений, полезных моделей, ноу-хау. Авторам выплачиваются вознаграждения за передачу всех прав интеллектуальной собственности, авторское вознаграждение за получение патента и авторское вознаграждение за использование зарегистрированных изобретений.

Новый генеральный директор подразделения компании 3М в России Тим Кениг сообщил: "В период с 2014 по 2018 гг. компания планирует 11-процентное увеличение продаж. Наряду с развитием местного производства продукции 3М мы расширим локализацию научно-исследовательской базы, так как осознаём высокий научный потенциал Российской Федерации".

Опыт компании 3М показывает, что локализация НИОКР, тесно связанных с реальным промышленным сектором, может быть эффективной моделью развития бизнеса, выгодной как для компании, так и для экономики страны в целом.

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Металлокерамический припой. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2012. № 12.

Рассмотрены керамические припои, предназначенные для пайки металлов с керамикой. Предложен новый состав металлокерамического припоя. Даны рекомендации по его применению для натриевых ламп высокого давления.

Экспериментальная оценка активационных параметров повреждаемости и разрушения деформируемых поверхностей. *Трение и смазка в машинах и механизмах.* 2012. № 12.

Приведены результаты экспериментальной оценки методами склерометрии и рентгеноструктурного анализа связи удельной энергии деформации поверхностей металлических образцов после различных видов механической обработки с уровнем повреждаемости тонкой структуры материала поверхностных слоёв.

Влияние обменного взаимодействия между частицами трибоплазмы на её структуру. *Трение и смазка в машинах и механизмах.* 2012. № 12.

На базе данных экспериментальных исследований предложена модель квантового строения оболочек трибоплазмы. В основе модели лежит представление трибоплазмы в виде проводящего газа, составленного фермионами и бозонами. Модель позволяет проследить динамику формирования оболочечной структуры трибоплазмы, центральное наинизшее энергетическое состояние которой занимает, предположительно, бозонный конденсат, образуя ядро, поле которого, подобно атомному ядру, структурирует всё трибоплазменное пространство, определяя строение трибофермионных оболочек. Результаты расчётов дают оценку эффективной массе частиц каждой из оболочек, температуры оболочек их плотности, а также распределения частиц внутри каждой из оболочек. Высокая плотность материи бозонного конденсата позволяет взглянуть на него с позиций релятивистской физики.

Технология лазерного удаления износостойких покрытий с поверхности металлорежущего инструмента из твёрдых сплавов. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2012. № 12.

Рассмотрена возможность удаления нанесённого защитного покрытия (TiAl)N с режущих пластин из твёрдых сплавов с помощью лазерного излучения и его преимущества перед химическим способом удаления покрытий. Приведены результаты эксперимента и вид полученной поверхности путём рентгеноспектрального анализа обработанных участков, а также рассмотрены проблемы применения данного метода.

О выборе оптимального метода модификации поверхности режущего инструмента, исходя из его служебного назначения. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2012. № 12.

Рассмотрена систематизация различных методов поверхностной обработки (нанесение покрытий, поверхностное легирование, термическое воздействие, деформационное воздействие и комбинированная обработка) по механизму взаимодействия с поверхностью и поверхностным слоем режущего инструмента. Описаны мероприятия, которые необходимо выполнить для выбора рационального метода при научно-исследовательских работах и производственном внедрении.

Использование нейронной технологии при моделировании работоспособности АТС. *Автомобильная промышленность.* 2013. № 1.

Рассмотрены возможности использования нейронной технологии при моделировании работоспособности автотранспортных средств на основе теории множеств. Разработана модель нагрузочного режима движения, влияющая на работоспособность автомобиля на основе генетического алгоритма, сигмоидальной функции и методов теории игр.

Технология формовки многоэлементного профиля обрамления кузова автомобильного рефрижератора. *Автомобильная промышленность.* 2013. № 1.

Рассмотрены основные этапы разработки формовки методом интенсивного деформирования многоэлементного профиля кузова рефрижератора.

Математическая модель системы электромагнитного управления гибридными магнитными подшипниками. *Вестник машиностроения.* 2013. № 1.

Предложена математическая модель динамики электромеханических преобразователей энергии на гибридных магнитных подшипниках (ГМП). Разработана компьютерная модель для реализации и исследований ГМП. Представлены математические модели для определения сил в ГМП и магнитных подшипниках на постоянных магнитах.