Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Том 71
6
2017

Главный редактор
Микрин Е.А. — д.т.н., проф., академик РАН, ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Дегтярёв Ю.И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Осипова В.Г. — ООО «Изд-во Инновационное машиностроение» (заместитель главного редактора)
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во Инновационное машиностроение»
Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор — **Мымрина И.Н.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

УЧРЕДИТЕЛИ:

ОБЩЕСТВО
С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
"НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

Журнал зарегистрирован 29 мая 2014 г.
ПИ № ФС77-58102 в Роскомнадзоре

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

ООО "Издательство
"Инновационное машиностроение"

Адрес издательства:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (495) 661-03-36

© Издательство "Инновационное машиностроение",
"Автоматизация. Современные технологии", 2017

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Тугов В.В., Акимов И.А. Управление процессом теплообмена в многослойных конструкциях с фазовыми переходами 243

Дранников А.В., Костина Е.В., Дерканосова А.А., Бородовицын А.М. Управление процессом сушки высоковлажных дисперсных материалов при пониженном давлении сушильного агента 248

Ничков А.В., Ведерников М.А. Повышение коэффициента использования режущей способности червячной фрезы последовательным чередованием технологических схем и осевого смещения фрезы 251

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Шматков В.С., Тимохин Р.С., Шматкова А.В. Повышение объективности данных о работе оборудования с ЧПУ с использованием лог-файла (протокола станка) 254

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Мирзаханов В.Э. Робастное адаптивное управление объектом с неопределённостью в динамике 260

Мороз А.П., Поленов Д.Ю. Модель передачи телеметрической информации с разгонного блока в режиме реального времени 265

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Ефанов Д.Е., Поклад М.Н. Идентификация дискретной системы на основе матричных делителей нуля 269

Хубеев М.К. Энергосберегающий пропорционально-интегральный регулятор: рациональная пассивная адаптация . . 275

Кофанов Ю.Н., Сотникова С.Ю. Концепция виртуального моделирования бортовых электронных средств с применением автоматизированной системы АСОНИКА 281

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Микаева А.С. Необходимость интеграции стратегии технологического развития с корпоративной стратегией предприятия приборостроения 285

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 288

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Tugov V.V., Akimov I.A. Control of heat transfer in multilayer structures with phase transition 243

Drannikov A.V., Kostina E.V., Derkanosova A.A., Borodovitsyn A.M. Drying process control of the high-moisture disperced materials under reduced pressure of the drying agent 248

Nichkov A.V., Vedernikov M.A. The application coefficient increase of the hob cutting capacity through the use of successive alternation of technological schemes and axial displacement of the mill 251

MODERN TECHNOLOGY

Shmatkov V.S., Timokhin R.S., Shmatkova A.V. Increase the data objectivity about work of equipment with the CNC through the use of a log file (machine protocol) . . . 254

INFORMATION TECHNOLOGY

Mirzakhanov V.E. Robust adaptive control of an object with uncertainty in dynamics 260

Moroz A.P., Polenov D.Yu. Model of telemetric information transmission from the acceleration block stage in real time mode 265

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Mikrin E.A., Zubov N.E., Ryabchenko V.N., Efanov D.E., Poklad M.N. Identification of a discrete system based on matrix zero dividers 269

Khubeev M.K. Energy-saving proportional-integral regulator: rational passive adaptation 275

Kofanov Yu.N., Sotnikova S.Yu. The concept of virtual modeling of on-board electronic means with using of the automated system ASONIKA 281

ECONOMICS AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Mikaeva A.C. The necessity to integrate the strategy of technological development with the corporate strategy of the instrument-making enterprise 285

SURVEY OF PERIODICALS

On the journal pages 288

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 e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 30.03.2017.	Отпечатано в ООО "Канцлер"
Подписано в печать 25.05.2017.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.	119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2017

УДК 004.9:66.095.26-977

В.В. Тугов, канд. техн. наук, доц.
(Оренбургский государственный университет, Аэрокосмический институт),
И.А. Акимов, д-р техн. наук, доц.
(Оренбургский государственный педагогический университет)

sau@mail.osu.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТЕПЛООБМЕНА В МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

Рассмотрен процесс теплообмена в многослойных конструкциях при производстве композиционных материалов методом полимеризации. Выполнены математическое описание процесса и сопоставление аналитических моделей с экспериментальными данными. Разработаны алгоритм и система управления температурными процессами на всех участках поверхности изделий.

Ключевые слова: теплообмен; полимеризация; композиционные материалы; математическая модель; алгоритм; управление.

The process of heat exchange in multilayer structures during the production of composite materials by the polymerization method is considered. The mathematical description of the process and the comparison of analytical models with experimental data are performed. The algorithm and control system for temperature processes on all parts of the articles surface are carried out are developed.

Keywords: heat exchange; polymerization; composite materials; mathematical model; algorithm; control.

Процессы тепломассообмена в многослойных конструкциях имеют большое значение. Одним из примеров многослойных конструкций являются композиционные материалы (КМ). Они имеют существенные преимущества по сравнению с традиционно используемыми металлами и сплавами, обладая уникальными упругими и прочностными свойствами, а также долговечностью работы. Особенно это актуально для авиаконструкций, так как они работают в экстремальных условиях — при повышенных и пониженных температурах, высокой радиации, мощных электромагнитных полях, высоких нагрузках и др. Из КМ изготавливают корпусы или их отдельные детали, лонжероны лопастей вертолётов и ветроэнов и другие элементы. Использование таких материалов в авиаконструкциях позволяет минимизировать их массу, повысить удельную прочность, увеличить срок службы [1, 2].

Одним из путей совершенствования производства КМ является соблюдение определённых технических и технологических требований: учёт выделения тепла при полимеризации, исключение опасных остаточных термонапряжений и деформаций.

Учёт тепловыделения при полимеризации особенно актуален, когда КМ изготовляются в специальных установках, где режимы температуры и давления задаются заранее, без учёта выделения тепла и полимеризации, что вызывает изменения температурного режима производства и появление при остывании остаточных термонапряжений и деформаций [3]. Для устранения указанных недостатков требуется разработка математической модели, алгоритма и системы управления для реальных температурных процессов, которые происходят в многослойных изделиях, находящихся внутри установки.

При создании различных объёмных изделий применяются листы и плё0000нки из термопластических материалов, к которым относится стеклопластик. Этот материал является высокомолекулярным соединением и при повышенных температурах размягчается, т.е. происходит фазовый переход из твёрдого состояния в вязкотекучее. При этом если температура не превышает предел разложения полимера с выходом низкомолекулярных продуктов (для стеклопластика 150...160 °С), то при охлаждении полимер переходит в твёрдое состояние. Такой процесс называют процес-

сом полимеризации. Под влиянием повышенной температуры связующее, находящееся в пропитанном наполнителе, расплавляется и под давлением глубоко пропитывает листы наполнителя, образующего пакет, склеивая их друг с другом. В это же время смола из верхних слоёв пакета равномерно растекается по поверхности материала, образуя блестящую прозрачную плёнку. Затем связующее отверждается под воздействием высокой температуры и давления и окончательно склеивает друг с другом листы наполнителя, в результате чего образуется плотный и монолитный лист пластика.

Процесс полимеризации зависит от:

содержания связующего в пропитанном наполнителе;

содержания растворимой части смолы в пропитанном наполнителе;

температурного режима;

удельного давления;

времени выдержки, необходимого для равномерного распределения температуры по всему объёму создаваемой конструкции.

Таким образом, полимеризация является сложным многофакторным процессом, нуждающимся в строгом соблюдении режимов управления, что возможно при автоматизированном управлении.

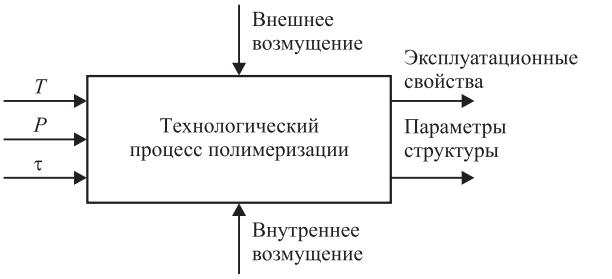


Рис. 1. Представление технологического процесса полимеризации как объекта управления в автоматизированной системе управления:
T — температура; *P* — удельное давление; τ — время выдержки

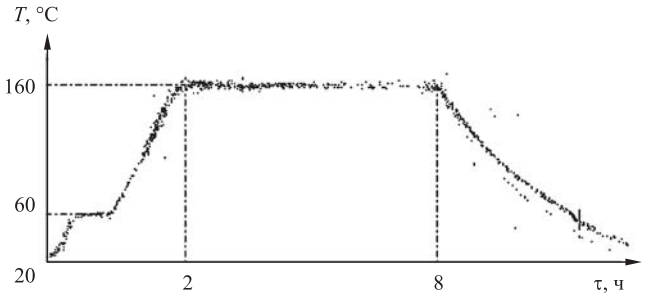


Рис. 2. Переходная характеристика процесса полимеризации, полученная в результате экспериментов

Основными управляющими параметрами процесса полимеризации являются температура *T*, удельное давление *P* и время выдержки τ. Поэтому строится трёхконтурная система управления, что способствует сведению к минимуму брака выпускаемой продукции, снижению затрат сырья, исключению влияния субъективных факторов (квалификации обслуживающего персонала, опыта работы и др.).

На рис. 1 представлен технологический процесс полимеризации как объект управления в автоматизированной системе управления.

Внутренние возмущения связаны с изменением свойств материала при полимеризации и являются достаточно детерминированными, в то время как внешние возмущения вызваны изменениями окружающей среды и имеют стохастический характер.

Для исследования объекта управления (ОУ) необходимо разработать математическую модель, которая может быть получена двумя способами [4, 5]:

аналитически, за счёт разработки математических зависимостей, однако в ряде случаев они лишь приближённо описывают ОУ, а при исследовании сложного ОУ, с большим числом элементов и связей между ними их невозможно применить;

с использованием экспериментальных данных, по которым строится переходная характеристика в виде графика.

На рис. 2 представлена переходная характеристика изменения температуры во времени при изготовлении лонжерона лопасти, полученная в результате экспериментов и построенная с использованием потенциометра КСП-4. Он предназначен для измерения, регистрации и регулирования температуры и работает в комплекте с несколькими термоэлектрическими преобразователями. Проанализируем эту переходную характеристику для определения вида и характера передаточных функций ОУ, а также получения математической модели ОУ.

Исследуем приведённую переходную характеристику с использованием графического метода.

Для определения параметров, характеризующих динамические свойства процесса полимеризации, были построены 20 циклограмм. Обобщённая теоретическая характеристика процесса полимеризации, построенная на их основе, представлена на рис. 3. Видно, что процесс полимеризации лонжерона имеет три

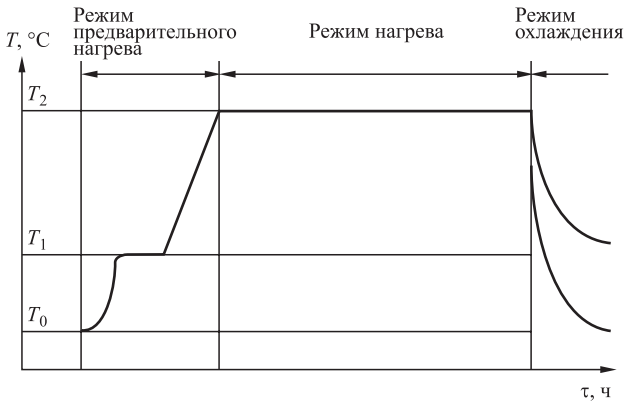


Рис. 3. Обобщённая теоретическая характеристика процесса полимеризации

режима: предварительного нагрева, нагрева и охлаждения. Рассмотрим более подробно эти режимы.

Температура предварительного нагрева начинается с T_0 (температуры окружающей среды) и повышается до T_1 (60 °С, заданной в технологической документации температуры). Повышение температуры происходит со скоростью 1,5...2 °С/мин в течение 30 мин.

Анализируя этот режим, получаем, что ОУ аппроксимируется последовательным соединением звена запаздывания $W''(P) = \mathbf{e}^{-\tau p}$ и апериодического звена первого порядка $W'(P) = \dfrac{k_0}{1 + T_0 p}$.

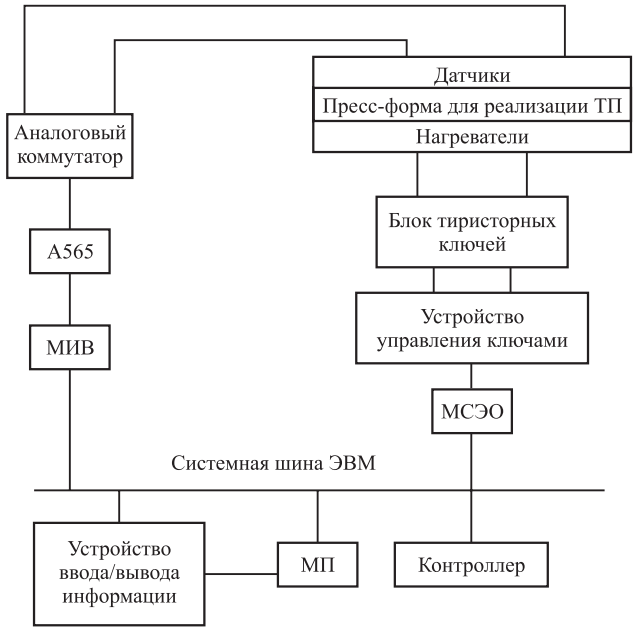


Рис. 4. Функциональная схема управления процессом полимеризации лонжеронов

Режим нагрева (полимеризации) начинается при достижении температуры T_2 (160...170 °С) и длится 6 ч. Рассматриваемый режим на циклограмме может быть описан интегрирующим звеном

$$Y = k\int x(t)dt + y_0, \qquad (1)$$

при этом передаточная функция имеет вид

$$W(p) = k/p. \qquad (2)$$

Параметр k определён в результате анализа циклограмм, и его среднее значение $k_{ср} = 1{,}21$.

В соответствии с условиями технологического процесса охлаждение происходит без подвода дополнительного воздуха, естественным способом. Скорость охлаждения составляет 2 °С/мин. Этот режим работы ОУ описывается иннерционным звеном

$$T\frac{dy}{dx} + y = k_1 x \qquad (3)$$

с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k_1}{Tp + 1}. \qquad (4)$$

Сравнивая рис. 2 и 3, можно сделать вывод, что отклонение экспериментальной кривой от теоретической не превышает 5 %. Это подтверждает правильность выбранной математической модели процесса теплообмена.

Разработанная функциональная схема, представленная на рис. 4, позволяет реализовать автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУТП) по контуру температур.

Информация о протекании технологического процесса (ТП) через интерфейсный модуль ввода-вывода (МИВ) и модуль сопряжения с электрооборудованием (МСЭО) поступает на ЭВМ. Сигналы с первичных измерительных преобразователей (термопар) проходят через коммутатор и обрабатываются цифровым термометром (А565) и МИВ, преобразуются в цифровой код и подаются на ЭВМ, в микропроцессор (МП). Устройство управления тиристорным блоком принимает управляющий сигнал, формируемый в ЭВМ, через МСЭО и другие устройства подает управляющие сигналы на исполнительные механизмы — нагреватели (ТЭНы).

Разработанная схема способствует выдерживанию необходимого температурного режима в процессе полимеризации, используя современные возможности ЭВМ. Разработанная управляющая программа отрабатывает следующий алгоритм:

через определённые промежутки времени осуществляется опрос термопар;

результаты измерений сравниваются со значением экспериментальной переходной характеристики;

в зависимости от результатов сравнения выдаётся управляющий сигнал на включение или выключение нагревателя.

В автоматизированной системе управления используется ПИ-закон регулирования. Он обеспечивает достаточно высокую точность регулирования за счёт организации возможности выключения и включения нагревателя при достижении заданной температуры, при этом средняя мощность нагрева зависит не только от заданной температуры, но и от величины рассогласования между заданной и измеренной температурами. ПИ-закон регулирования описывается уравнением вида

$$Y = k\left(X + \frac{1}{t_{\text{и}}}\int X dX\right), \qquad (5)$$

где Y — регулирующее воздействие регулятора; X — регулируемая величина; k — коэффициент пропорциональности; $t_{\text{и}}$ — постоянная времени интегрирования.

Применение данного закона способствует уменьшению или увеличению скорости изменения тока нагревателя при отклонении от заданного значения температуры $T_{\text{з}}$, что позволяет избежать перерегулирования при дестабилизирующем воздействии на ОУ.

Если происходит значительное отклонение текущего значения температуры T_n от заданного $T_{\text{з}}$ ($T_n < T_{\text{з}}$), то система управления вырабатывает максимальное значение тока на нагревательном элементе и при этом скорость нарастания температуры также имеет максимальное значение. При выравнивании температуры до $T_{\text{з}}$ значения тока и скорости уменьшаются.

Используя метод широтно-импульсной модуляции мощности нагревателя, получим пропорциональную часть закона регулирования.

Для определения интегральной составляющей закона регулирования был разработан алгоритм, реализованный в ЭВМ, на базе решения дифференциального уравнения апериодического звена

$$Y_{n+1} = y_n + \frac{k}{t_{\text{и}}}k\left(T_n - T_{\text{з}}\right), \qquad (6)$$

где $T_n - T_{\text{з}}$ — отклонение текущего значения температуры от заданного.

Для описания работы интегратора используется апериодическое звено. Разработан и реализован на ЭВМ алгоритм решения передаточной функции, которая описывается дифференциальным уравнением следующего вида:

$$t_{\text{и}}\frac{dy}{dx} + Y = kX. \qquad (7)$$

Проведём интегрирование уравнения по двум точкам, в результате получим

$$Y = \frac{1}{t_{\text{и}}}\int\left(kX - Y\right)dt. \qquad (8)$$

Представим текущее значение интеграла в дискретной форме как рекурсивное элементарное приращение площади (отклонение температуры от заданного на интервал дискретизации).

Так как система стабилизации обладает существенной тепловой инерционностью, то приращение рассчитывается по линейной форме (для повышения точности приращение рассчитывают по формулам трапеций или Симпсона):

$$Y_n = Y_{n-1} + \Delta Y_n;\ \Delta Y_n = \frac{\Delta t}{t_{\text{и}}}\left(kX_n - Y_{n-1}\right), \qquad (9)$$

где Y_n — интегральная составляющая управляющего воздействия; Δt — интервал дискретизации (время цикла); k — коэффициент усиления (пропорциональности); $X_n = T_n - T_{\text{з}}$ — текущее отклонение.

Тогда

$$Y_n = Y_{n-1} + \frac{\Delta t}{t_{\text{и}}}\left[k\left(T_n - T_{\text{з}}\right)\right]. \qquad (10)$$

При $T = \Delta t$ интегратор преобразуется в безынерционное (усилительное) звено с коэффициентом передачи $k = 1$. Интегратор исключают из контура управления "регулятор температуры — объект", если $T = \infty$.

При работе систем в различных режимах (нагрев, стабилизация, охлаждение) необходимо подбирать следующие параметры:

коэффициент усиления k;

постоянную времени интегрирования $t_и$, которая лежит в диапазоне от 0,1 до 0,9;

общий коэффициент передачи интегральной составляющей k_0.

Если k_p — коэффициент передачи пропорционального звена регулятора температуры, то общее управляющее воздействие имеет вид

$$U = k_p(T_з - T_n) + k_0 Y_n. \qquad (11)$$

Разработанная программа управляющего вычислительного комплекса на базе микроЭВМ содержит два компонента: основную и фоновую программы.

Основная программа работает в режиме прерывания и одновременно для нескольких объектов выполняет следующие функции:

поочередно включает в работу нагреватели в зависимости от алгоритма;

проводит опрос, усреднение и сравнение текущих значений температур с заданными, а также расчёт и выдачу интегральной составляющей управляющего воздействия, регистрацию получаемой информации от датчиков в памяти ЭВМ;

проводит анализ характеристик аварийных ситуаций (перегрева, обрыва цепи, неисправности и др.) и выдачу этой информации на дисплей.

Алгоритм управления нагревателями: сигналы с датчиков температуры поступают на ЭВМ, где происходит их сравнение. Если $T_n > T_з$, то система управления отключает нагреватель.

Фоновая программа служит для анализа признаков аварийного и оперативного контроля, а также управляет одной из подпрограмм:

выводит оперативную и аварийную информацию на экран;

печатает протокол результатов регулирования;

вводит служебную и технологическую информацию в режиме диалога;

осуществляет контроль, диагностику и отладку отдельных каналов и модулей системы.

Для запуска объекта в работу необходимо ввести в ЭВМ основные характеристики технологического процесса: уставки, время выдержки в режиме, коэффициент градуировочной характеристики каналов и др. Данные о ходе технологического процесса формируются при регулировании и обработке кодов различных каналов и поступают в буфер для печати.

Анализ существующих методов изготовления изделий из композиционных материалов показал, что они не поддерживают температурный режим полимеризации на всех участках поверхности нагрева. Проведены расчёты по разработанной математической модели и экспериментальные исследования процесса теплообмена в многослойных конструкциях из композиционных материалов. Сравнение полученных результатов показало их удовлетворительное соответствие. Авторами предложена схема автоматизированной системы управления процессом передачи тепла, которая обеспечивает установление и поддержание температуры нагревательных элементов на всей поверхности изделия.

Библиографические ссылки

1. **Акимов И.А., Тугов В.В.** Исследование влияния погрешностей технологий на эксплуатационные характеристики авиаконструкций из композиционных материалов // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 1. С. 58—61.

2. **Трофимов П.А.** Математическое моделирование взаимосвязанных нестационарных процессов тепломассообмена в многослойных конструкциях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013. 17 с.

3. **Козлов В.Н., Акимов И.А.** Управление энергетическими системами. Ч. 5. Математические модели и разностные задачи теплофизических процессов в многослойных конструкциях с фазовыми переходами. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2007. 205 с.

4. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория автоматического управления. СПб.: Профессия, 2004. 752 с.

5. **Карташов Э.М.** Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высш. шк., 2001. 550 с.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении,
а также непосредственно на сайте издательства
ООО «Инновационное машиностроение».

УДК 542.47:66.047:664.8

А.В. Дранников, д-р техн. наук, доц., **Е.В. Костина,** канд. техн. наук,
А.А. Дерканосова, канд. техн. наук, **А.М. Бородовицын**
(Воронежский государственный университет инженерных технологий)

evgeniya.kostina.74@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ВЫСОКОВЛАЖНЫХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА

Предложен способ автоматического управления процессом сушки высоковлажных дисперсных материалов при пониженном давлении сушильного агента, позволяющий увеличить выход готового продукта высокого качества, а также снизить теплоэнергетические затраты за счёт точности и надёжности управления процессом.

Ключевые слова: высоковлажный дисперсный материал; сушка; пониженное давление; автоматическое управление.

An automatic control method of the drying process for high-moisture disperced materials under reduced pressure of the drying agent is proposed. This method allows to increase the yield of the high quality finished produc, as well as to reduce heat and energy costs due to the accuracy and reliability of process control.

Keywords: high-moisture disperced material; drying; low pressure; automatic control.

Проблема производства и применения нетрадиционных видов сырья, таких как отходы пищевой промышленности, а в частности — свекловичного жома, яблочных выжимок, пивной дробины и т.д., имеет важное значение для комбикормовой промышленности, что обусловлено снижением расхода зернового сырья при производстве комбикормов и повышением их кормовой и питательной ценности [1—3].

Широкое применение указанных видов сырья сдерживается из-за их высокой начальной влажности, что впоследствии вызывает быструю порчу и скисание. Установлено, что за счёт теплового воздействия получают готовый сухой продукт с длительным сроком хранения, который можно эффективно использовать в кормопроизводстве. Одним из перспективных способов стабилизации качества высоковлажных дисперсных материалов является сушка перегретым паром пониженного давления, которая в значительной степени обеспечивает получение высококачественного продукта без снижения интенсивности проведения процесса [4, 5].

Для повышения эффективности получения готовой продукции необходима реализация совокупности технических приёмов и методов, а также средств управления технологическими параметрами.

Ниже по результатам выполненных исследований предлагается способ автоматического управления процессом сушки высоковлажных дисперсных материалов при пониженном давлении сушильного агента (см. рисунок).

Исходный высоковлажный дисперсный материал с помощью шлюзового затвора *2* подают в герметичную сушильную камеру, где его сушат до конечной влажности в виброкипящем слое перегретым паром под разряжением. Материал в камере перемещается по наклонной перфорированной решётке, соединённой с вибропривода. Высушенный до требуемой влажности готовый продукт выводят из камеры с помощью шлюзового затвора *3*.

Отработанный перегретый пар из сушильной камеры отводят через патрубок *7* в делитель, который разделяет его на два потока. Один поток с помощью вентилятора направляют в конденсатор-пароперегреватель, где осуществляют его перегрев посредством рекуперативного теплообмена с греющим паром и возвращают в камеру через патрубок *6* с образованием контура рециркуляции.

Второй поток отработанного перегретого пара в количестве, равном количеству испарившейся из материала влаги, направляют в конденсатор через патрубок *12*. В конденсаторе происходит конденсация паров за счёт теплообмена без границы раздела поверхности фаз в противотоке с холодной водой, непрерывно подаваемой сверху в конденсатор через патрубок *14* насосом с достижением необходимого разряжения. Несконденсировавшиеся

газы выводят из конденсатора через патрубок *13*.

Образовавшийся конденсат удаляют из конденсатора через барометрическую трубу, которую используют для уравновешивания имеющегося в ней столба воды атмосферным давлением, в сборник конденсата, используемый для бесперебойного создания разряжения в установке. С помощью вентиля из сборника отводят избыток конденсата на технологические нужды. Барометрическая труба снабжена патрубком, через который отбирают такое количество образовавшегося конденсата, которое необходимо для создания разряжения, и подают на охлаждение в теплообменник-рекуператор *26*, а далее насосом возвращают в конденсатор *14* с образованием контура рециркуляции.

Охлаждение отведённого конденсата в теплообменнике-рекуператоре осуществляют за счёт рекуперативного теплообмена с парами хладагента пароэжекторной холодильной машины, состоящей из испарителя, теплообменника-рекуператора, эжектора, конденсатора-пароперегревателя, терморегулирующего вентиля и парогенератора с предохранительным клапаном.

В парогенераторе с электронагревательными элементами при затрате электроэнергии образуется рабочий пар, который направляют в эжектор, создавая при этом разряжение в испарителе. Причём потенциальная энергия рабочего пара превращается в кинетическую энергию струи, которая вытекает из эжектора с большой скоростью, и под действием энергии струи пары хладагента, в качестве которого используют воду, поступает из испарителя в теплообменник-рекуператор на охлаждение конденсата отведённого из барометрической трубы в результате рекуперативного теплообмена. Полученная после эжектирования смесь рабочего пара и паров хладагента образует греющий пар, который направляют в конденсатор-пароперегреватель. Конденсируясь, он отдаёт теплоту пару, который становится перегретым и поступает в сушильную камеру через патрубок *6*.

Образовавшийся при этом конденсат греющего пара насосом возвращают в пароэжек-

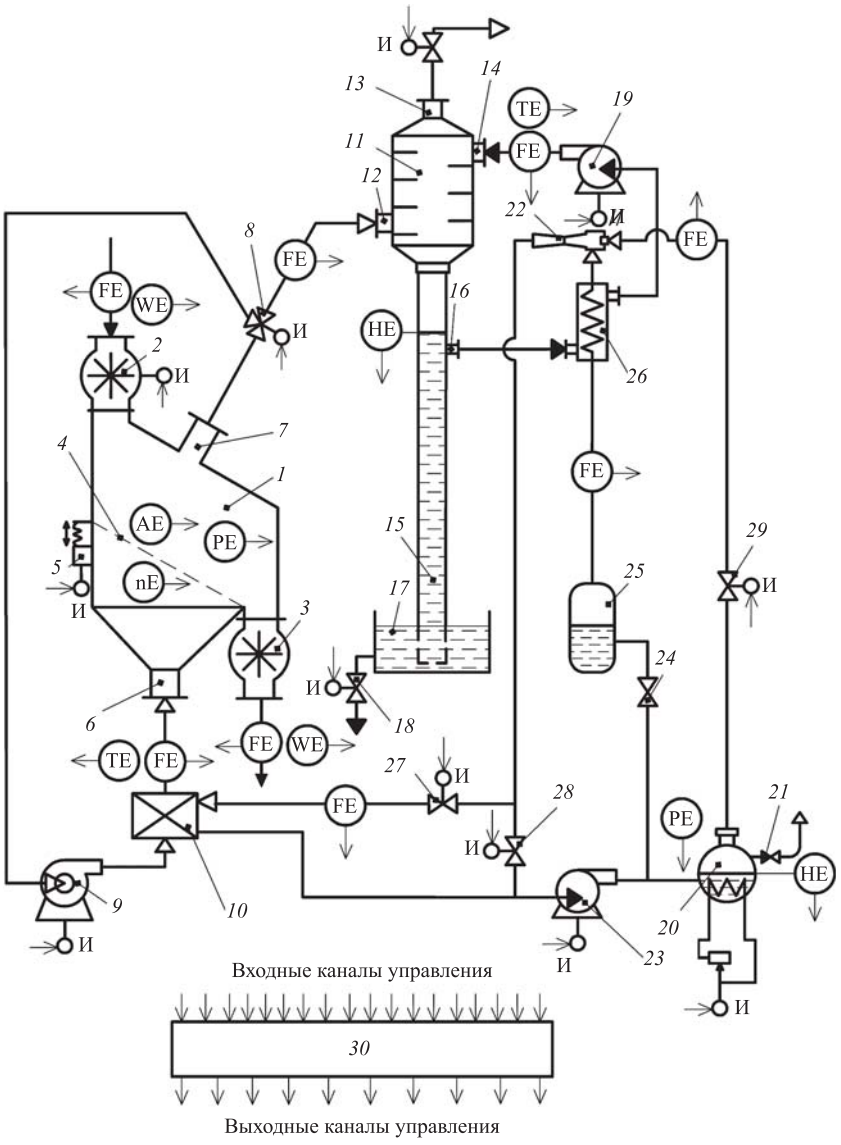


Схема управления процессом сушки высоковлажных дисперсных материалов при пониженном давлении сушильного агента:

1 — сушильная камера; *2*, *3* — шлюзовые затворы; *4* — наклонная перфорированная решётка; *5* — вибропривод; *6*, *7* — патрубки подвода и отвода перегретого пара; *8* — делитель потоков отработанного перегретого пара; *9* — вентилятор; *10* — конденсатор-пароперегреватель; *11* — конденсатор; *12—14* — патрубки подвода отработанного перегретого пара, отвода несконденсировавшихся газов и подвода холодной воды; *15* — барометрическая труба; *16* — патрубок отвода конденсата на охлаждение; *17* — сборник конденсата; *18* — вентиль для сброса избыточного конденсата; *19* — насос для холодной воды; *20* — парогенератор; *21* — предохранительный клапан; *22* — эжектор; *23* — насос; *24* — регулирующий вентиль; *25* — испаритель; *26* — теплообменник-рекуператор; *27—29* — регулирующие клапаны; *30* — микропроцессор; датчики: *FE* — расхода; *WE* — влажности; *TE* — температуры; *PE* — давления; *HE* — уровня; *AE* — амплитуды колебаний; *nE* — частоты колебаний

торную холодильную машину для подготовки рабочего пара и хладагента. Причём одну часть конденсата направляют через терморегулирующий вентиль в испаритель для пополнения воды, а другую часть отводят в парогенератор с образованием контура рециркуляции.

По текущей информации о влажности и расходе влажного исходного материала, получаемой с датчиков, микропроцессор с помощью исполнительного механизма вибропривода, соединённого с решёткой, устанавливает необходимые амплитуду и частоту колебаний виброкипящего слоя в сушильной камере, а также расход и температуру перегретого пара на входе в камеру воздействием на исполнительные механизмы соответственно вентилятора и регулирующего клапана. При этом коррекцию по влажности сухого материала микропроцессор осуществляет воздействием на расход исходного материала с помощью исполнительного механизма питателя *2*.

По текущим значениям расхода и влажности исходного и сухого материала, получаемых с датчиков, установленных на входе и выходе из сушильной камеры, микропроцессор определяет количество испарившейся из материала влаги, которую с помощью исполнительного механизма делителя потоков отводят в конденсатор. Причём по текущему расходу испарившейся из материала влаги микропроцессор устанавливает расход холодной воды в конденсатор посредством исполнительного механизма насоса.

По измеренному с помощью датчика давления значению разряжения в сушильной камере устанавливают температуру холодной воды, направляемой в конденсатор, воздействием на соотношение расходов рабочего пара и паров хладагента путём изменения расхода рабочего пара в эжектор с помощью исполнительного механизма регулирующего клапана *29*. Необходимый уровень конденсата в барометрической трубе поддерживают воздействием на его расход из сборника конденсата с помощью исполнительного механизма вентиля *18*.

Информация о текущем значении уровня конденсата в парогенераторе передаётся в микропроцессор. При изменении уровня конденсата микропроцессор осуществляет двухпозиционное регулирование исполнительным механизмом привода насоса *23*, включает питающий насос при достижении уровня конденсата в парогенераторе нижнего заданного значения и отключает его при достижении верхнего заданного значения.

В случае технологических и аварийных сбоев в работе парогенератора, связанных с возможным увеличением давления насыщенного водяного пара в его рабочем объёме, предусмотрен предохранительный клапан.

Таким образом, предлагаемый способ управления процессом сушки высоковлажных дисперсных материалов позволяет увеличить выход готового продукта высокого качества и снизить теплоэнергетические затраты вследствие обеспечения точности и надёжности управления процессом сушки высоковлажных дисперсных материалов.

Библиографические ссылки

1. **Лебедев Е.И.** Комплексное использование сырья в пищевой промышленности. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1992. 236 с.

2. **Гольденберг Я.М., Фан-Юнг А.Ф.** Использование отходов в консервной промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1971. 171 с.

3. **Цогоев Н.Д., Баев К.Д.** Дополнительные источники кормов для свиней. М.: Агропромиздат, 1987. 88 с.

4. **Гинзбург А.С.** Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1973. 528 с.

5. **Лыков А.В.** Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 470 с.

Уважаемые читатели!

Редакция предлагает руководителям организаций, ищущих новые рынки для реализации своей продукции, услуги по размещению рекламы и объявлений.
Цены за публикацию рекламы умеренные.

УДК 621.9.02

А.В. Ничков, канд. техн. наук, доц., **М.А. Ведерников**
(Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

nav8080@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЧЕРВЯЧНОЙ ФРЕЗЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ЧЕРЕДОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И ОСЕВОГО СМЕЩЕНИЯ ФРЕЗЫ

Рассмотрен один из вариантов управления процессом зубофрезерования сочетанием последовательного изменения направления подачи с осевым смещением фрезы, при котором достигается более полное использование режущих способностей её зубьев и сокращаются потери на холостые хода.

Ключевые слова: червячная модульная фреза; зубофрезерование; износ при зубофрезеровании.

One control variant of the gear milling process by the combination of a successive change in the direction of feed with an axial displacement of the mill is provided. In such a case the more fully application of the mill teeth is achieeved and the losses at idle running are reduced.

Keywords: modular hob; gear milling; wear during gear milling.

При нарезании цилиндрических зубчатых колёс зубья червячной фрезы изнашиваются неодинаково вследствие разных размеров срезаемых ими слоёв. В то время как три-четыре зуба фрезы достигли допустимого износа, остальные изношены либо значительно меньше, либо вообще не изношены, так как не участвовали в резании. Оценкой степени использования режущих способностей всех зубьев фрезы может служить коэффициент

$$K_{и} = F/(h_{доп}L_{р}), \qquad (1)$$

где F — площадь под графиком износа зубьев фрезы (см. рис. 3); $h_{доп}$ — допускаемый износ фрезы; $L_{р}$ — длина режущей части фрезы.

Как правило, этот коэффициент при обычном применении фрезы оказывается малым. Для его повышения предлагается сочетать периодическое изменение направления подачи после нарезания каждого колеса (или пакета колёс) с периодическим осевым смещением фрезы. Такой цикл работы позволяет использовать зубофрезерный станок с ЧПУ.

Для решения поставленной задачи необходимо располагать графиками распределения износа по зубьям червячной фрезы для каждой конкретной технологической схемы зубофрезерования, под которой понимается сочетание направления витков фрезы и зубьев колеса (одноимённое или разноимённое) с направлением подачи (попутная или встречная), и методикой определения оптимальной величины периодического осевого смещения $l_{п}$ с учётом полученных графиков износа.

Рассмотрим предложенное на примере нарезания цилиндрических зубчатых колёс (модуль m = 5 мм, число зубьев колеса z_1 = 37, угол наклона зубьев колеса β = 15°, материал — сталь 38ХС) червячной фрезой (m = 5 мм, число заходов z_{10} = 1, число стружечных канавок z_0 = 10, наружный радиус R_{ao} = 60 мм, материал Р6М5) с подачей S_{o} = 2 мм/об, скоростью резания v = 30,16 м/мин.

Для определения параметров зоны резания, размеров срезаемых слоёв и износа зубьев червячной фрезы использована расчётно-экспериментальная методика (Ничков А.В. Исследование износа червячных модульных фрез в технологических схемах зубофрезерования: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2004. 220 с.). На рис. 1, *а* показаны зоны резания технологической схемы зубофрезерования I, при которой направление витков фрезы и зубьев колеса разноимённое, подача встречная (фреза правая, колесо левое), и технологической схемы II (штриховая линия), когда фреза и колесо разноимённые, а подача попутная. Каждая зона резания ограничена контуром $OKK_{o}O$, в пределах которой зубья червячной фрезы участвуют в резании вершинными кромками.

Результаты расчёта размеров слоёв, срезаемых зубьями червячной фрезы, и соответствующих им износов показаны на рис. 1, *б* и сведены в табл. 1, где указаны: N — номер зуба

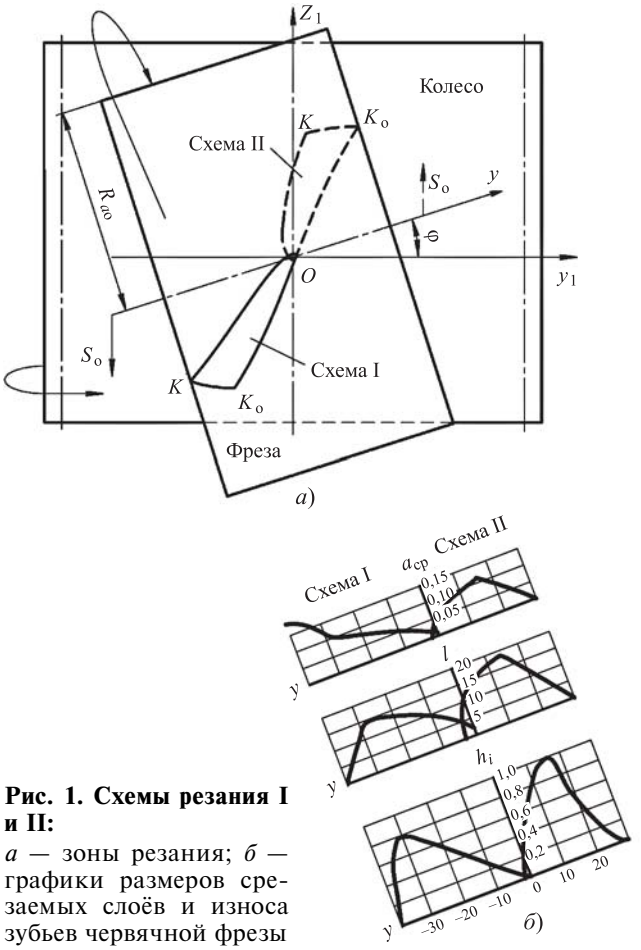


Рис. 1. Схемы резания I и II:
а — зоны резания; *б* — графики размеров срезаемых слоёв и износа зубьев червячной фрезы

Таблица 1

Результаты расчёта размеров срезаемых слоёв и соответствующих им значений износа зубьев червячной фрезы

Технологическая схема I					
N	*y*, мм	$a_{ср}$, мм	*l*, мм	*h*, мм	h_I, мм
4	−6,2	0,039	7,5	0,19	0,17
6	−9,4	0,050	9,2	0,30	0,32
8	−12,5	0,060	10,7	0,42	0,43
10	−15,7	0,069	12,0	0,54	0,52
12	−18,8	0,077	13,0	0,65	0,64
14	−22,0	0,085	18,8	0,76	0,77
16	−25,1	0,092	14,5	0,87	0,90
18	−28,2	0,104	14,2	0,97	0,98
20	−31,4	0,137	10,5	1,00	0,97
22	−34,5	0,165	6,6	0,79	0,79
Технологическая схема II					
N	*y*, мм	$a_{ср}$, мм	*l*, мм	*h*, мм	h_{II}, мм
2	3,1	0,066	13,8	0,46	0,45
4	6,2	0,082	15,8	0,65	0,64
6	9,4	0,093	17,2	0,80	0,82
8	12,5	0,103	18,2	0,94	0,94
10	15,7	0,114	17,2	1,00	0,92
12	18,8	0,091	13,4	0,62	0,67

фрезы; *y* — расстояние от межосевого перпендикуляра до зуба фрезы, мм; $a_{ср}$ — средняя толщина срезаемого слоя, мм; *l* — длина срезаемого слоя, мм; *h* — износ, вычисленный по формуле (2); h_I — износ, вычисленный по формуле (3); h_{II} — износ, вычисленный по формуле (4).

Износ *h* зубьев фрезы при обработке зубчатых колёс из стали 38ХС определяли по формуле (2) [1]:

$$h = 324 \cdot 10^{-8} a_{ср}^{1,05} l^{0,9} v^2 T, \qquad (2)$$

где *T* — машинное время механической обработки, мин.

Для выравнивания максимальных износов в схемах I и II скорость резания для схемы I была увеличена до 37,7 м/мин, при этом машинное время для схемы I сократилось в 1,25 раза.

На основе табличных данных для технологических схем I и II построены графики износа зубьев фрезы (см. рис. 1). Число нарезанных колёс в обеих схемах одинаково — 14, ширина каждого 79 мм.

Для аналитического определения величины перестановки в сочетании с изменением направления осевой подачи (встречная, попутная) в цикле обработки зубчатых колёс опишем с помощью метода наименьших квадратов графики износа зубьев фрезы некоторой степенной функцией $h = f(y)$. Для технологической схемы I эта функция примет вид:

$$h_1 = -0{,}00000848y^4 - 0{,}000596y^3 - \\ - 0{,}0147y^2 - 0{,}185y - 0{,}544, \qquad (3)$$

а для схемы II

$$h_п = -0{,}0000088y^4 - 0{,}0000087y^3 + \\ + 0{,}0018y^2 + 0{,}049y + 0{,}280. \qquad (4)$$

Подставляя в эти формулы расстояния *y* из табл. 1, получим расчётные износы (h_I и h_{II}) для всех зубьев фрезы и занесём их в табл. 1. На рис. 2 тонкой линией показаны графики износа зубьев фрезы, полученные с использованием, соответственно, уравнений (2)—(4). Как видно из рис. 2 и табл. 1, максимальные расхождения между износом, вычисленным по формулам (2)—(4), составляют для схемы I менее 12 %, а для схемы II — менее 9 %, что для практических расчётов, связанных с износом, вполне допустимо.

Располагая формулами (3) и (4), определим величину оптимальной осевой перестановки

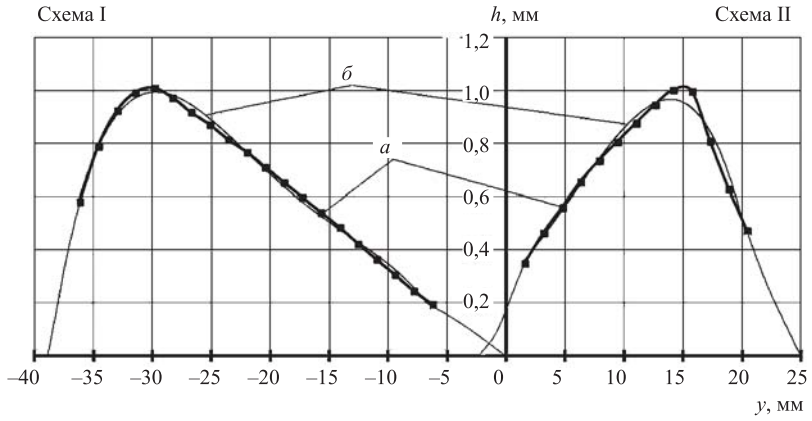


Рис. 2. Графики износа зубьев фрезы, построенные:
а — на основе формулы (2); *б* — на основе формул (3) и (4)

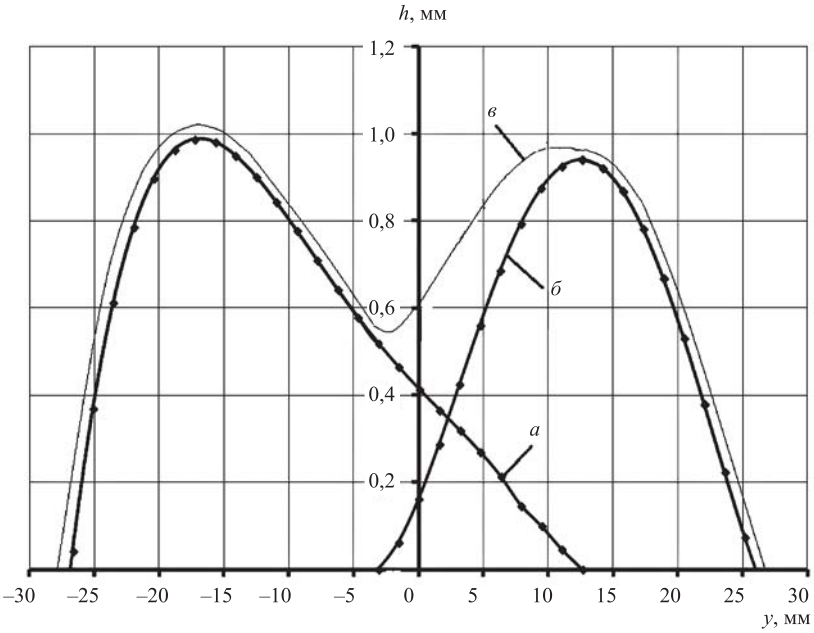


Рис. 3. Графики износа зубьев фрезы, полученные при чередовании схем резания I и II по циклу с применением осевой перестановки:
а — для схемы резания I; *б* — для схемы резания II; *в* — суммарный график износа зубьев фрезы

Таблица 2

Сводная таблица разных вариантов обработки зубчатых колёс

Вариант использования фрезы	Число нарезанных колёс, шт.	Максимальный износ фрезы h_{max}, мм	Длина фрезы $L_р$, мм	Коэффициент использования фрезы $K_и$
Схема II	14	1,0	44	0,35
Схема I	14	1,0	54	0,39
Схемы I и II без осевой перестановки	28	1,0	66	0,54
Схемы I и II с осевой перестановкой по циклу	28	1,0	54	0,70

фрезы следующим образом. Пусть после нарезания зубьев колеса по схеме I фреза смещается вдоль своей оси на величину $l_п$. В этом случае уравнение (3) графика износа зубьев фрезы в общем виде запишем следующим образом:

$$h = f(y + l_п). \qquad (5)$$

Задавая разные величины $l_п$ и складывая значения износов этого графика с износами второго графика на участках их совпадения, находим такую наибольшую величину $l_п$, при которой максимальный суммарный износ будет равен допустимому $h_{доп}$.

На рис. 3 изображены два графика износа зубьев червячной фрезы, соответствующие схемам резания I и II после осевого смещения червячной фрезы, и график суммарного износа. Как видно из рис. 3, величина максимального износа оказалась равной величине допустимого износа при осевой перестановке $l_п$ = = 12,5 мм, т.е. при переходе от одной схемы резания к другой необходимо смещать фрезу вдоль её оси на полученную величину.

Таким образом, при последовательном чередовании двух технологических схем зубофрезерования в сочетании с осевой перестановкой червячной фрезы будут задействованы в работе малоизношенные зубья и сократится время, затрачиваемое на холостые хода.

В табл. 2 показаны результаты применения данной методики эксплуатации червячной фрезы. Для каждого варианта обработки зубчатых колёс определён коэффициент $K_и$ использования режущих способностей всех зубьев червячной фрезы.

Как видно из табл. 2, наибольший эффект использования фрезы получен при чередовании схем резания по циклу с осевой перестановкой. Значения коэффициента $K_и$ в зависимости от варианта использования фрезы отличаются в 2 раза (0,35 и 0,70), что приведёт к сокращению затрат на эксплуатацию инструмента, а отсюда — и к рассмотрению вопроса о повышении режимов резания.

УДК 658.5:621.9.06

В.С. Шматков, Р.С. Тимохин
(Иркутский авиационный завод — филиал ПАО "Корпорация "Иркут"),
А.В. Шматкова, канд. техн. наук, доц.
(Иркутский национальный исследовательский технический университет)

annashmatkova@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ОБЪЕКТИВНОСТИ ДАННЫХ О РАБОТЕ ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОГ-ФАЙЛА (ПРОТОКОЛА СТАНКА)

Рассмотрены разные варианты мониторинга состояния оборудования с ЧПУ в процессе эксплуатации в целях повышения эффективности его использования. Проанализированы преимущества и недостатки готовой автоматизированной системы контроля за работой оборудования, использующегося на Иркутском авиационном заводе. Предложена альтернативная система, разработанная специалистами данного завода, которая основывается на дешифровании протокола станка (лог-файла) и разработке интерфейсов для операторов станков и других заинтересованных служб.

Ключевые слова: высокопроизводительное оборудование; лог-файл; протокол; OEE; автоматизированная система управления производственными процессами (АСУПП); Sinumerik; мониторинг.

Various monitoring versions of the CNC equipment state in the course of operation with the purpose of increasing the application efficiency are considered. The advantages and disadvantages of the finished automated system for the operation monitoring of equipment used at the Irkutsk aviation plant are analyzed. An alternative system developed by specialists of this plant is proposed. This system is based on deciphering the machine protocol (log-file) and interfaces developing for machine operators and other interested services.

Keywords: high-performance equipment; log file; protocol; OEE; the automated control system of production processes (ACSP); Sinumerik; monitoring.

Введение. Контролю эффективности производства на современных предприятиях уделяется особое внимание. В рыночных условиях это единственный путь обеспечения выживания предприятия и развития производства. Контролировать производство можно по-разному. В некоторых случаях для этого используется проверенная временем фотография рабочего дня. На более развитых предприятиях внедрены автоматизированные системы контроля. Независимо от способа контроля суть этого процесса неизменна и состоит в своевременном получении и обработке объективной информации о работе, например, оборудования.

Во второй половине 2000-х гг. на предприятиях начали активно использовать общую эффективность работы оборудования OEE, %, которая определяется по формуле

$$\text{OEE} = K_{\text{г}} K_{\text{п}} K_{\text{к}} \cdot 100,$$

где $K_{\text{г}}$ — коэффициент готовности оборудования; $K_{\text{п}}$ — коэффициент потерь; $K_{\text{к}}$ — коэффициент качества.

Коэффициенты OEE рассчитываются по методикам, предложенным Институтом комплексных стратегических исследований. В связи с этим резко вырос спрос на системы электронного мониторинга.

Так и на Иркутском авиационном заводе (ИАЗ) в 2009 г. была разработана и внедрена автоматизированная система учёта коэффициентов OEE. Принцип её работы состоит в сборе данных о времени работы и простоях высокопроизводительных станков с ЧПУ. Основной недостаток системы заключался в необходимости ручного сбора информации о времени работы станка и видах потерь с последующим её вводом в систему выделенным работником. Это снижало оперативность и достоверность полученных данных при достаточно большой трудоёмкости их сбора. Для устранения данного недостатка были опробованы готовые системы электронного контроля эффективности производства и разработана собственная система. Она базируется на данных, фиксируемых в лог-файлах станков, которые автоматически формируются в системе

ЧПУ станка в зашифрованном виде (так называемый протокол станка).

Предпосылки внедрения систем управления производством продукции в режиме реального времени. Одним из назначений автоматизированной системы управления производственными процессами (АСУПП) является обеспечение технологических процессов предприятия достоверной информацией об изготовлении деталей с помощью информационных технологий. АСУПП учитывает поступающие с информационных систем данные, интегрирует автоматические линии, независимые стойки ЧПУ и другое технологическое оборудование в один производственный комплекс, предоставляет данные о реализации технологического процесса по всей цепочке создания изделия.

Основные функции АСУПП [1]:

управление ресурсами производства, в том числе технологическим оборудованием. В рамках этой функции описывается детальная история ресурсов и контролируется правильность настройки оборудования в производственном процессе, а также отслеживается состояние оборудования в режиме реального времени;

расчёт производственных расписаний. В рамках этой функции обеспечивается оперативное и детальное планирование работы, а также детально и оптимально вычисляется загрузка оборудования при работе конкретной смены;

управление потоком изготавливаемых деталей. В рамках этой функции отслеживаются выполнение операций и занятость оборудования в режиме реального времени выполнения работ в соответствии с планом;

взаимодействие информационных подсистем в целях получения, накопления и передачи технологических и управляющих данных. В рамках этой функции данные о ходе производства могут вводиться автоматически с заданной периодичностью из стоек ЧПУ или непосредственно с контроллеров;

мониторинг производственных процессов, автоматическая корректировка либо диалоговая поддержка решений оператора;

визуализация информации о месте и времени выполнения работ по каждой детали, изделию. В рамках этой функции информация может включать отчёты об исполнителях-операторах, текущих условиях производства;

предоставление подробных отчётов о реальных результатах производственных операций. Представленные в рамках этой функции отчёты могут включать в себя данные об использовании и наличии ресурсов.

Из приведённых функций видно, что процесс получения достоверной информации о работе оборудования является основополагающим.

Внедрение АСУПП — процесс неизбежный. Предпосылками этому могут быть:

увеличение объёмов производства и мощности завода;

увеличение объёмов продукции, изготавливаемой по кооперации;

организация производственной деятельности по принципу изготовления изделий в расчётный срок;

сертификация производства, например, в соответствии с требованиями EN 9100:2003;

проведение работ по определению общей эффективности оборудования с расчётом коэффициентов OEE [2];

оптимизация использования производственных площадей за счёт повышения степени автоматизации и использования оборудования;

внедрение комплекса автоматизированных систем.

Основной ожидаемый эффект — повышение эффективности основных фондов за счёт увеличения загрузки и использования оборудования [3], а именно повышение оперативности учёта данных о доступности оборудования, снижение простоев по организационным причинам, уменьшение трудоёмкости и применение математических методов оптимизации цехового расписания и формирования сменных заданий.

Применение готовых решений при разработке АСУПП. Производителей систем контроля эффективности эксплуатации производственного оборудования (далее — систем) на рынке много. В качестве примера рассмотрим систему COSCOM (Германия), приобретённую ИАЗ.

Комплект поставки на 10 единиц оборудования с базовыми функциями представлен в табл. 1.

ПО COSCOM состоит из серверной и клиентской частей.

К серверной части относятся:

COMU Application Server — сервер приложения;

Accounting Server — сервер учётных записей;

COMU CCS;

License Service — менеджер лицензий.

К клиентской части относятся:

COMU Configuration (на немецком языке) — конфигуратор файлов настроек приложений;

Таблица 1

Комплектность и цена поставки системы

№ п/п	Обозначение	Количество	Цена, €
1	Программное обеспечение (ПО) COMU-Manager, первичная лицензия	1	20 500
2	ПО COMU — MDE-Basis, первичная лицензия	1	12 250
3	ПО COMU — онлайн-монитор, первичная лицензия	1	6000
4	ПО COMU — Zeitstrahl, первичная лицензия	1	4750
5	MDI — входной цифровой модуль	10	3750
6	MDI — процессорный модуль Ethernet	10	16 150
7	MDI — сенсорный дисплей, включая корпус для MDI-дисплея	10	10 000
8	ПО COMU — MDE — рабочее место	10	7350
9	Монтажные и наладочные работы "под ключ"	—	11 350
Итого:			92 100

Рис. 1. Отчёт о работе на станке за выбранный интервал времени — 10 дней:

1 — вспомогательное время; 2 — время изготовления детали; 3 — время обслуживания оборудования оператором; 4 — время ожидания; 5 — время простоя из-за организационных потерь; 6 — подготовительно-заключительное время (ПЗВ); 7 — время простоя при внедрении управляющих программ; 8 — время межоперационных перемещений; 9 — время простоя из-за аварийных остановок и ремонта; 10 — время планово-предупредительного ремонта (ППР), время обслуживания оборудования специалистами; 11 — время, отведённое на регламентированные перерывы

COMU Tools (на немецком языке) — просмотр общих настроек приложения;

COMU Manager (на русском языке) — модуль управления основными данными;

COMU Terminal (на русском языке) — рабочее место оператора станка.

По программным модулям системы заказчику — ИАЗ документация не была представлена.

Этапы внедрения:

1. Подключение к локально-вычислительной сети завода контроллеров по сбору информации о работе высокопроизводительного оборудования (ВПО) с ЧПУ (10 единиц). Занесение их в программу COSCOM COMU Manager.

2. Выделение персонального компьютера для использования в качестве сервера приложения и сервера базы данных (БД) системы. На сервер установлены ОС Windows 2003 Server R2; MS SQL Server 2005 Enterprise Edition.

3. Установка специалистами компании COSCOM сервера приложений системы, настройка БД системы.

4. Установка клиентских рабочих мест COSCOM COMU Manager. Настройка возможности задавать права на статусы, устанавливаемые оператором станка или техниками.

Следует отметить, что для внесения в ПО данных о запланированных к изготовлению деталях необходимо расширение ПО установкой новых модулей (ProXIA). Шаблоны отчётов создаются в стороннем ПО Crystal Reports, пример отчёта приведён на рис. 1. Для их создания необходимо знание данного ПО и структуры БД системы COSCOM.

Исходя из опыта эксплуатации данной готовой системы, можно сделать вывод о преимуществах и недостатках таких систем (табл. 2).

Разработка системы ПО "ПРОТОКОЛ". После проведённого анализа и опытной эксплуатации готовой системы на ИАЗ было принято решение о разработке собственной системы контроля эффективности эксплуатации производственного оборудования.

Цель проекта — создание системы автоматизированного мониторинга работы ВПО, которая бы удовлетворяла запросам производства завода и исключала все недостатки применения готовых систем (см. табл. 2).

В качестве основного источника информации системы взят протокол станка (лог-файл) [4—6], который автоматически формируется в системе ЧПУ станка в зашифрованном виде и содержит множество информации о состоянии станка. Такое решение безопас-

Таблица 2

Преимущества и недостатки готовой системы

Преимущества	Недостатки
Короткие сроки установки базовой версии системы (7 рабочих дней). Простота занесения на станке информации в базу данных. Онлайн-презентации информации с производства (режим работы, выполнения задания, сигнал тревоги по мобильной связи в виде СМС-сообщения и др.). Расчёт OEE, наглядные временные диаграммы и др. Универсальность. Возможность опционального расширения возможностей системы. Возможность поставки системы одновременно со станком	Высокая стоимость базового продукта (более 9000 у.е. на один станок) и опций. Система корректируется только специалистами фирмы-поставщика. Получение дополнительных возможностей системы через дополнительный контракт. Не предусмотрена фабричная установка на станки сенсорных дисплеев. Необходимость обновления лицензий. Риски, связанные со снятием продукта с рынка. Отсутствие документации к программным модулям системы

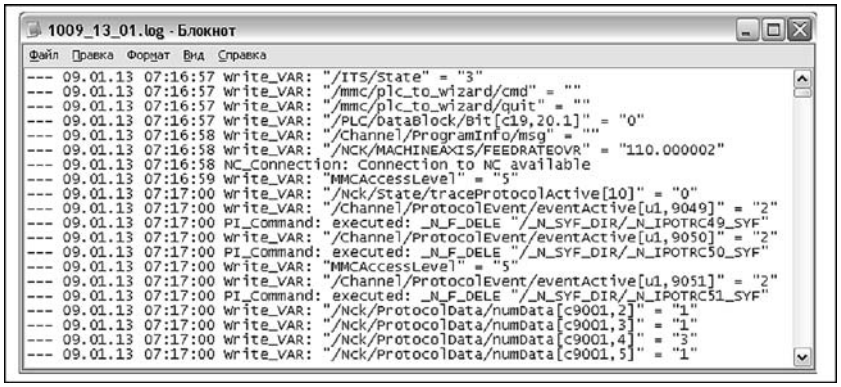


Рис. 2. Формируемый формат протокола станка в зашифрованном виде

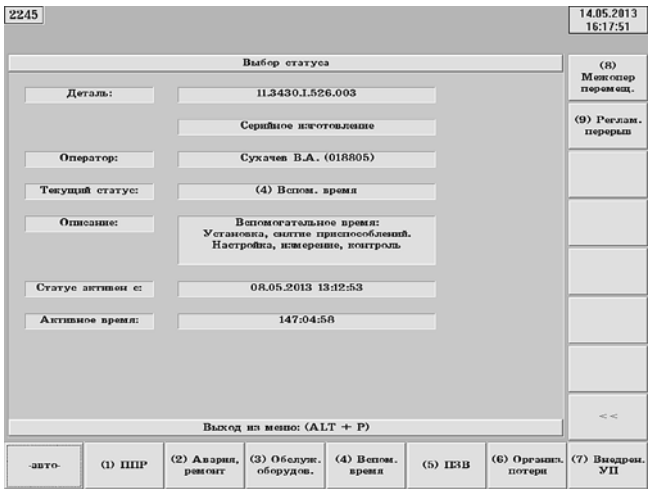


Рис. 3. Приложение на стойке ЧПУ станка

но для станка и не отражается на его работе. Из протокола станка можно в любой момент времени (в режиме "онлайн") узнать, что происходит на станке, и для этого не требуются дополнительные технические средства.

Формат протокола станка приведён на рис. 2.

При декодировании данной информации можно получить следующие данные: дату и время; номер управляющей программы с величиной занижения или завышения подач и шифр детали; аварийные сообщения; используемый инструмент и режим обработки.

В ходе реализации проекта обеспечены автоматический сбор, хранение и расшифровка следующих типов протоколов: Sinumerik 840D (DMF, DMC, FFQ, FSQ, MCFV, Gantry, DMG и пр.) версий от 05.xx.xx.xx до 07.60.59.10; есть возможность поддержки более поздних версий.

Для расширения информации, получаемой со станка, было разработано специальное приложение, устанавливаемое непосредственно на стойку ЧПУ станка, которое позволяет оператору, используя станочный интерфейс, регистрировать себя как пользователя при начале работы и указывать тип потери при простоях станка. Для станков, на которых автоматический протокол отсутствует (например, станки со стойкой ЧПУ MillPlus семейства DMU), данное приложение (рис. 3) позволяет вести полную отчётность по OEE.

В настоящее время автоматизированная система связывает станок, оператора, мастера, нормировщика, технолога и начальника цеха.

Предусмотренные функции системы:

точная и актуальная регистрация OEE станков;

предоставление средств для мониторинга работы станков и анализа потерь;

предоставление средств для финишного контроля показателей OEE нормировщиком;

своевременная доставка управляющих программ на станки;

обеспечение быстрой электронной связи между оператором, технологом и мастером;

Рис. 4. Веб-сайт системы

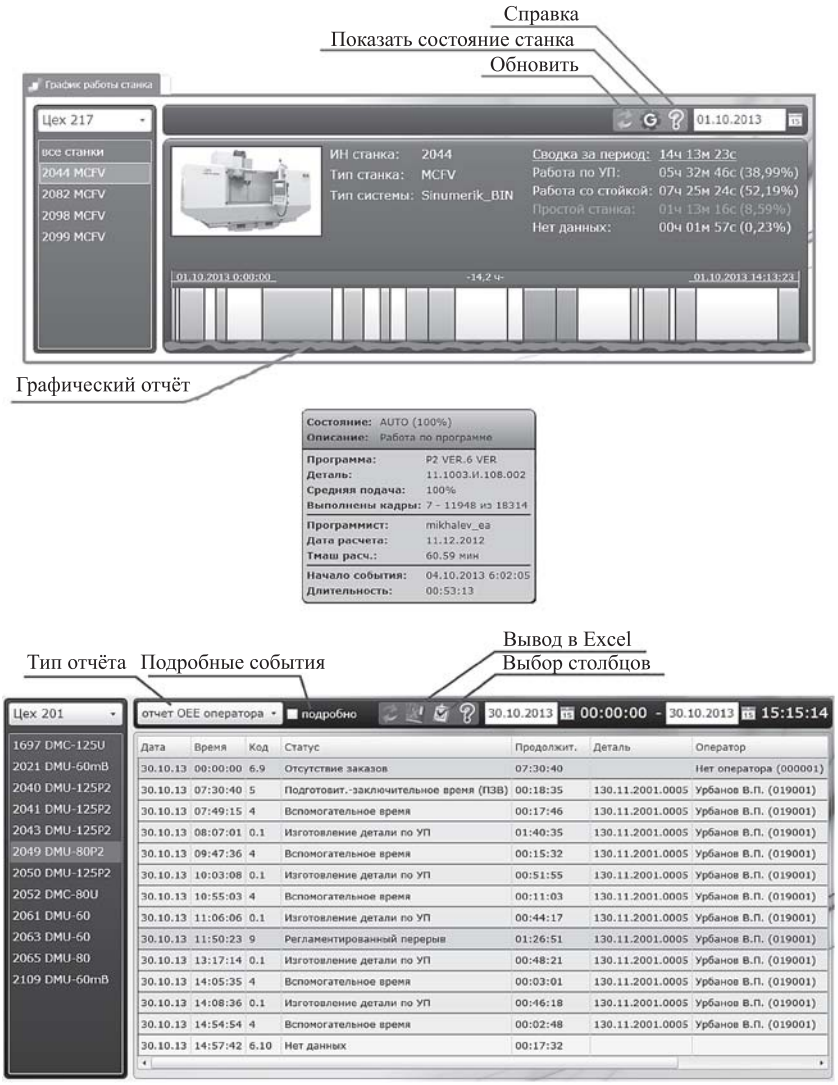


Рис. 5. Отчёт о работе станка

контроль управляющих программ на станках и автоматический расчёт фактического времени их выполнения;

хранение данных, полученных из протоколов станков, для расследования аварийных случаев и сбойных ситуаций.

В рамках проекта выполнено следующее:

обеспечены автоматическая расшифровка, сбор и хранение протоколов ЧПУ для наиболее распространённых типов станков;

разработано интерактивное меню для оператора, встроенное в стойку ЧПУ, через которое он может указывать состояние станка, получать задания, выводить управляющие программы на станок, отправлять заявки специалистам цеха и отделов;

разработан и запущен сайт системы так, чтобы пользователь мог получить информацию с любого компьютера на заводе через обычный веб-браузер (рис. 4);

разработаны специализированные диаграммы и отчёты (рис. 5), в которых возможны оперативные, в режиме "онлайн", мониторинг работы станков, расследование влияния различных факторов на потери, расчёт OEE, контроль действий оператора, запускаемых управляющих программ и многое другое;

разработаны специальные интерфейсы для нормировщиков (рис. 6), позволяющие контролировать и корректировать данные о потерях, получаемые от операторов, вычислять и уточнять нормы на изготовление детали с учётом особенностей станка (машинных потерь вследствие конструктивных особенностей станков, из-за которых увеличивается реальное время выполнения управляющей программы на станке);

разработаны интерфейсы и инструменты для ответственных подразделений и ремонтных служб (рис. 7);

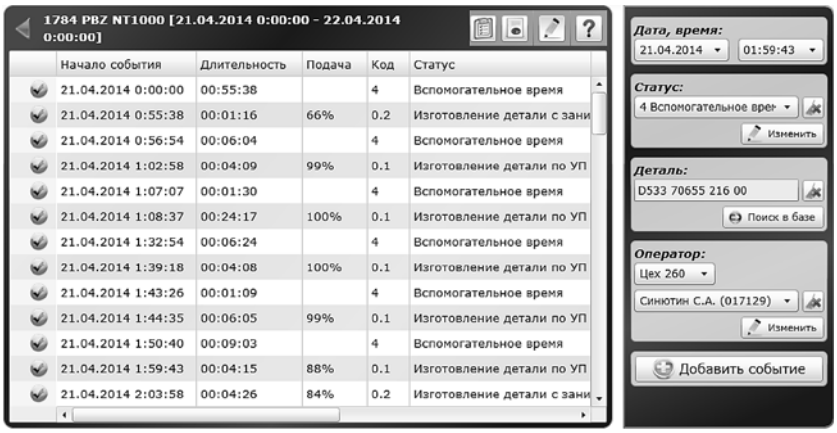


Рис. 6. Интерфейс для нормировщиков

Таблица 3

Показатели эффективности проекта

Ключевые показатели эффективности	Было	Цель	В настоящее время
Трудоёмкость работ по сбору данных для определения коэффициентов OEE, ч/год	25 000	5000	8000
Длительность цикла сбора данных для определения коэффициентов OEE	5 дней	10 мин	10 мин
Достоверность получаемой информации для расчёта коэффициентов OEE, %	80	99	99
Количество ВПО с автоматизированным получением данных о его состоянии в процессе эксплуатации для последующего расчёта коэффициентов OEE	10	85	70

разработаны средства по управлению и администрированию системы, позволяющие устанавливать систему на других предприятиях;

разработана пошаговая визуализированная инструкция по работе в системе.

Срок реализации проекта — 2 года.

В ходе реализации данного проекта уже получен серьёзный экономический эффект (табл. 3).

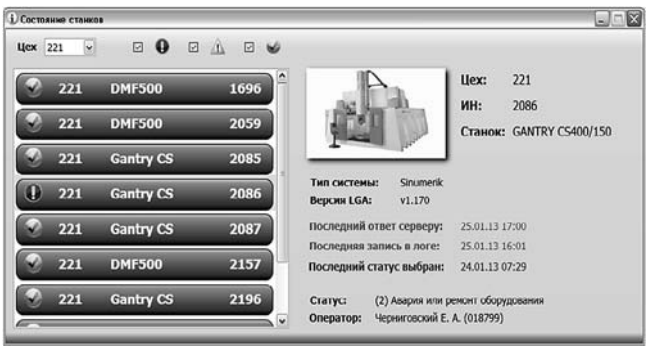


Рис. 7. Интерфейс для механика и ремонтных служб

Затраты на проект укрупнённо составили 2 млн руб., при этом стоимость готовых систем с учётом оснащённого числа станков составит примерно 40 млн руб.

Заключение. Для разработки собственной автоматизированной системы управления не требуются дополнительные средства в виде дорогостоящей электроники, которые обычно применяются зарубежными компаниями. На вопрос покупать или разрабатывать — ответ такой: в долгосрочной перспективе разработка собственной системы будет предпочтительным решением, если на предприятии большое число станков; в краткосрочном промежутке времени при наличии средств и небольшом парке оборудования правильнее будет купить готовую систему.

Есть и ограничения по реализации рассмотренного проекта, а именно на некоторых системах ЧПУ (обычно старых выпусков) очень сложно реализовать связь со станком через его протокол. Возможно, в этом случае будет целесообразным приобретение готовых продуктов.

В результате внедрения проекта дополнительно получен эффект, выражающийся в почти 10%-ном росте коэффициентов OEE только за счёт повышения объективности получаемых данных (дисциплины на местах).

Библиографические ссылки

1. **Латыпов В.Р.** Как повысить эффективность использования основных фондов? // Автоматизированные системы в управлении. 2003. № 5.

2. **Общая** эффективность оборудования / Пер. с англ. М., Институт комплексных стратегических исследований, 2007. 120 с.

3. **Фомин П.А., Хохлов В.В.** Основные направления повышения уровня использования основных фондов и производственных мощностей предприятия // Маркетинг в России и за рубежом. 2002. № 5.

4. **SIEMENS.** SINUMERIK 840D/840Di/810D. Управление программами ЧПУ DNC. 2003. № 3.

5. **SIEMENS.** SINUMERIK 840D/840Di/810D. Расширенное программирование. 2003. № 3.

6. **SIEMENS.** SINUMERIK 840D/840Di/810D. Системные переменные. 2006. № 3.

УДК 681.515.6

В.Э. Мирзаханов
(Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку)
mirzakhanv@inbox.ru

РОБАСТНОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОМ С НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬЮ В ДИНАМИКЕ

Осуществлён синтез робастного адаптивного нечёткого пропорционально-дифференциального закона управления объектом с неопределённостью в динамике. В качестве объекта управления рассматривается двухзвенный робот-манипулятор с нелинейным трением и воздействием внешних возмущений. Проведён сравнительный анализ синтезированного закона управления с классическим пропорционально-дифференциальным законом методом Циглер—Николс.

Ключевые слова: робастное адаптивное управление; нечёткий ПД-регулятор; генератор хаотических числовых величин; интервальная нечёткая логика второго порядка.

The synthesis of the robust adaptive fuzzy proportional-differential control law of the object with uncertainty in dynamics is carried out. As a control object, a double-link robot-manipulator with nonlinear friction and external disturbances is considered. Through the use of the Ziegler—Nichols method a comparative analysis of the synthesized control law with the classical proportional differential law is carried out.

Keywords: robust adaptive control; fuzzy PID-controller; chaotic numerical quantity generator; interval fuzzy logic of the second order.

Введение. На сегодняшний день практически во всех сферах человеческой деятельности наблюдаются интенсивное внедрение и эксплуатация робототехнических систем, наиболее распространёнными представителями которых, наряду с мобильными роботами, являются роботы-манипуляторы. Как правило, эксплуатация роботов-манипуляторов осуществляется в условиях наличия неопределённости, которая может быть обусловлена воздействием внешних возмущений, паразитной динамикой, нелинейным трением и т.п. Таким образом, эффективная эксплуатация роботов-манипуляторов требует разработки и внедрения законов управления объектами с неопределённостью в динамике.

Существуют две основные категории законов управления объектами с неопределённостью в динамике: законы робастного и адаптивного управлений. Робастное управление считается предпочтительным по отношению к адаптивному на начальных этапах эксплуатации системы, тогда как на более поздних этапах бóльшую эффективность, за счёт подстройки закона управления, демонстрирует адаптивное управление. Таким образом, выявляется потребность в синтезе комплексного робастного адаптивного закона управления, который на начальных этапах эксплуатации робота-манипулятора опирался бы более на робастную составляющую, а на более поздних — на адаптивную составляющую закона управления.

Математическая модель объекта управления. В качестве объекта управления рассматривается модель двухзвенного робота-манипулятора (two-link robot manipulator), способного осуществлять вращательное движение в двумерном пространстве (рис. 1).

Объект управления описывается следующим матричным уравнением динамики:

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) + \tau_d = \tau, \quad (1)$$

где $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^2$ — векторы углового положения, скорости и ускорения сочленений соответственно; $M(q) \in R^{2\times 2}$ — матрица инерции; $C(q, \dot{q}) \in R^{2\times 2}$ — матрица центробежных и кориолисовых сил; $G(q) \in R^2$ — гравитационный вектор; $F(\dot{q}) \in R^2$ — вектор трения; ограниченные неизвестные возмущения обозначены через $\tau_d \in R^2$; управляющий входной вращающий момент обозначен как $\tau(t) \in R^2$.

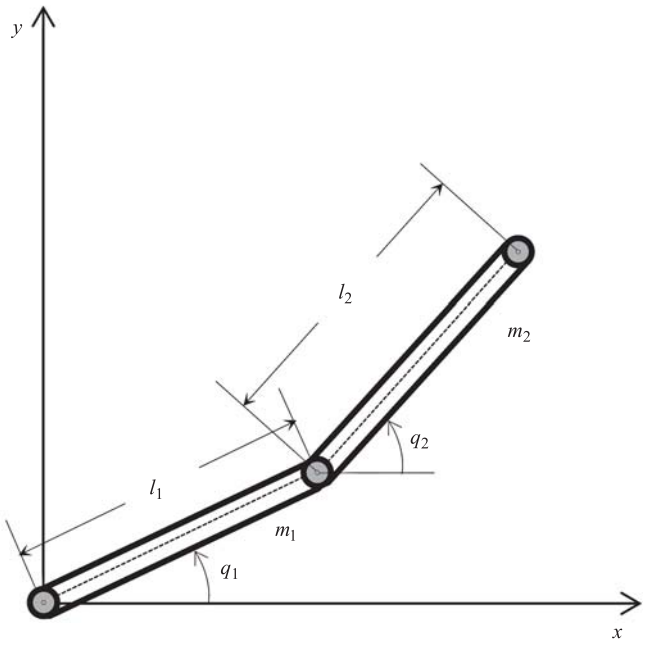


Рис. 1. Модель двухзвенного робота-манипулятора

Матричные коэффициенты уравнения (1) рассчитываются по следующим формулам, приведённым в работе [1]:

$$M(q) = \begin{bmatrix} \left(m_1 + m_2 l_1^2\right) & m_2 l_1 l_2 \left(s_1 s_2 + c_1 c_2\right) \\ m_2 l_1 l_2 \left(s_1 s_2 + c_1 c_2\right) & m_2 l_2^2 \end{bmatrix};$$

$$C(q,\dot{q}) = m_2 l_1 l_2 \left(c_1 s_2 + s_1 c_2\right) \begin{bmatrix} 0 & -\dot{q}_2 \\ -\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} -\left(m_1 + m_2\right) l_1 g s_1 \\ -m_2 l_2 g s_2 \end{bmatrix};$$

$$F(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 2\dot{q}_1 + 0,8 sgn\left(\dot{q}_1\right) \\ 4\dot{q}_2 + 0,1 sgn\left(\dot{q}_2\right) \end{bmatrix},$$

где $q = [q_1\ q_2]^T$; m_1 и m_2 — массы первого и второго звеньев манипулятора соответственно, кг; l_1 и l_2 — длины первого и второго звеньев манипулятора соответственно, м; $c_1 = \cos(q_1)$; $c_2 = \cos(q_2)$; $s_1 = \sin(q_1)$; $s_2 = \sin(q_2)$; g — ускорение свободного падения.

Номинальные физические параметры рассматриваемого объекта управления принимают следующие значения [1]: $m_1 = 4{,}6$ кг; $m_2 = 2{,}3$ кг; $l_1 = 0{,}5$ м; $l_2 = 0{,}2$ м; $g = 9{,}8$ м/с^2.

Постановка задачи синтеза управления и её решение. Управляющее устройство системы управления двухзвенным роботом-манипулятором реализовано в виде нечёткого ПД-регулятора, база правил которого имеет следующий вид:

$$IF\ e_i(t) is M_{e_i}^1\ AND \dot{e}_i(t) is M_{\dot{e}_i}^1$$
$$THEN\ \tau_i(t) = k_{p_i}^1 e_i + k_{d_i}^1 \dot{e}_i;$$
$$IF\ e_i(t) is M_{e_i}^1\ AND \dot{e}_i(t) is M_{\dot{e}_i}^2$$
$$THEN\ \tau_i(t) = k_{p_i}^2 e_i + k_{d_i}^2 \dot{e}_i;$$
$$IF\ e_i(t) is M_{e_i}^2\ AND \dot{e}_i(t) is M_{\dot{e}_i}^1$$
$$THEN\ \tau_i(t) = k_{p_i}^3 e_i + k_{d_i}^3 \dot{e}_i;$$
$$IF\ e_i(t) is M_{e_i}^2\ AND \dot{e}_i(t) is M_{\dot{e}_i}^2$$
$$THEN\ \tau_i(t) = k_{p_i}^4 e_i + k_{d_i}^4 \dot{e}_i,$$

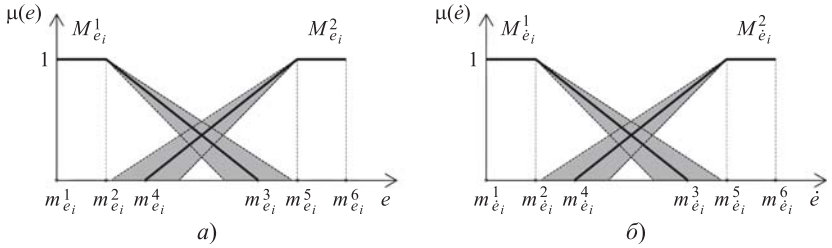
где $i = 1, 2$; $e_i(t)$ и $\dot{e}_i(t)$ — ошибка и производная ошибки управления i-м сочленением манипулятора; $M_{e_i}^j$ и $M_{\dot{e}_i}^j$ ($j = 1, 2$) — интервальные нечёткие множества второго порядка; $\tau_i(t)$ — вращающий момент, управляющий i-м сочленением манипулятора; $k_{p_i}^z$ и $k_{d_i}^z$ ($z = 1, ..., 4$) — пропорциональные и дифференциальные коэффициенты усиления, используемые для управления i-м сочленением манипулятора.

Графическое представление нечётких множеств $M_{e_i}^j$ и $M_{\dot{e}_i}^j$ ($j = 1, 2$) показано на рис. 2, где каждое интервальное нечёткое множество второго порядка описывается четырьмя параметрами:

$$M_{e_i}^1 = \left\{m_{e_i}^1, m_{e_i}^2, m_{e_i}^3, \alpha_i^1\right\};\ \ M_{e_i}^2 = \left\{m_{e_i}^4, m_{e_i}^5, m_{e_i}^6, \alpha_i^2\right\};$$
$$M_{\dot{e}_i}^1 = \left\{m_{\dot{e}_i}^1, m_{\dot{e}_i}^2, m_{\dot{e}_i}^3, \beta_i^1\right\};\ \ M_{\dot{e}_i}^2 = \left\{m_{\dot{e}_i}^4, m_{\dot{e}_i}^5, m_{\dot{e}_i}^6, \beta_i^2\right\},$$

где $\alpha_i^1, \alpha_i^2, \beta_i^1, \beta_i^2 (i = 1, 2)$ — параметры размывания нечётких множеств.

Механизм логического вывода, реализованный в нечётком ПД-регуляторе, использует алгоритм Карника—Менделя и описан в работе [2].



а) *б*)

Рис. 2. Нечёткие множества $M_{e_i}^j$ (*а*) и $M_{\dot{e}_i}^j$ (*б*) ($j = 1, 2$)

Задача синтеза управления предполагает оптимальную настройку параметров нечёткого ПД-регулятора. В качестве настраиваемых параметров регулятора рассматриваются 32 параметра нечётких множеств $M_{e_i}^j$ и $M_{\dot{e}_i}^j$ ($i = 1, 2$; $j = 1, 2$), 8 параметров $k_{p_i}^z$ ($i = 1, 2$; $z = 1, ..., 4$) и 8 параметров $k_{d_i}^z$ ($i = 1, 2$; $z = 1, ..., 4$).

Для оптимальной настройки параметров нечёткого ПД-регулятора используется генератор хаотических числовых величин (ГХЧВ), в основе которого лежит следующая модель логастической функции, представленная в работе [3]:

$$y'(t) = y\left(a - cy^{\frac{1}{2}}\right) -$$

непрерывная форма;

$$y_{l+1} = (1+a)\, y_l \left(1 - y_l^{\frac{1}{2}}\right) - \quad (2)$$

дискретная форма,

где $a \approx 5{,}7$; $y_l (l = 1, 2, ..., L) \in (0; 1)$.

Для генерирования хаотических значений $p_l (l = 1, 2, ..., L)$ параметра P нечёткого регулятора используется следующее преобразование:

$$p_l = (b - a) yl + a,$$

где (a, b) — область значений параметра $p_l (l = 1, 2, ..., L)$.

Для оценки качества управления используется значение средней нормированной *RMSE* (root-mean-square error):

$$\begin{cases} RMSE^{norm}(q_1) = \\ = \dfrac{1}{\left|q_1^{des}(0) - q_1(0)\right|} \sqrt{\dfrac{1}{H+1} \sum\limits_{h=0}^{H} \left(q_1^{des}(h) - q_1(h)\right)^2} \\ RMSE^{norm}(q_2) = \\ = \dfrac{1}{\left|q_2^{des}(0) - q_2(0)\right|} \sqrt{\dfrac{1}{H+1} \sum\limits_{h=0}^{H} \left(q_2^{des}(h) - q_2(h)\right)^2} \\ RMSE_{mean}^{norm}(q) = \\ = \dfrac{RMSE^{norm}(q_1) + RMSE^{norm}(q_2)}{2}, \end{cases}$$

где $q_1^{des}(h)$ и $q_2^{des}(h)$ ($h = 0, 1, ..., H$) — задающие воздействия сочленений манипулятора.

Моделирование синтезированной системы управления в среде MATLAB. Модель системы автоматического управления роботом-манипулятором (САУ РМ) синтезирована в среде MATLAB Simulink и представляет собой организованную совокупность ряда комплексных блоков. Общая структурная схема *S*-модели САУ РМ представлена на рис. 3.

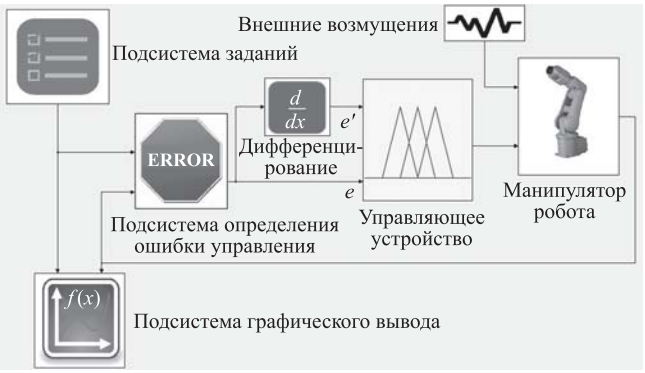


Рис. 3. Общая структурная схема *S*-модели САУ РМ

Для настройки нечёткого регулятора модели САУ РМ используется комплексный скрипт управления *S*-моделью САУ РМ через командное окно MATLAB, который представляет собой организованную совокупность шести программных модулей:

программный модуль "*Load_and_settings*" выполняет функции загрузки *S*-модели САУ РМ, определения общих параметров симуляции *S*-модели САУ РМ, определения временного интервала вычисления ошибки;

программный модуль "*Initial_conditions*" определяет начальные условия функционирования управляемого робота-манипулятора;

программный модуль "*Desired_trajectories*" выполняет функцию определения целевых траекторий сочленений управляемого робота-манипулятора;

программный модуль "*Chaos_based_generator_settings*" выполняет функции определения, загрузки и сохранения параметров ГХЧВ, используемого для настройки параметров САУ РМ;

программный модуль "*System_run*" выполняет функции циклического определения параметров *S*-модели САУ РМ посредством использования ГХЧВ, симуляции *S*-модели САУ РМ, определения (в режиме реального времени) *S*-модели САУ РМ с наилучшим качеством управления (наименьшей ошибкой управления);

программный модуль "*IT2FSs_show*" выполняет функцию графического отображения нечётких параметров управляющего устройства САУ РМ.

Настройка и симуляция *S*-модели САУ РМ. Запустим в командном окне MATLAB ком-

плексный скрипт управления *S*-моделью САУ РМ и введём ряд параметров симуляции (рис. 4), а затем введём ряд параметров генератора хаотических числовых величин:

интервалы значений параметров функций принадлежности $M_{e_i}^j$ и $M_{\dot{e}_i}^j$ ($i = 1, 2$; $j = 1, 2$) и параметров $k_{p_i}^z$ и $k_{d_i}^z$ ($i = 1, 2$; $z = 1, ..., 4$), которые потенциально содержат значения, обеспечивающие адекватность закона управления;

параметр a логастической функции (2) и начальные значения хаотических величин вычисляются с использованием функции MATLAB "*rand*".

После ввода параметров ГХЧВ запустится процесс настройки *S*-модели САУ РМ для определения оптимальных параметров нечёткого ПД-регулятора (рис. 5). Процесс настройки является циклическим, по окончании каждого витка цикла в командном окне MATLAB обновляется информация о симуляции *S*-модели САУ РМ, продемонстрировавшей наилучшее качество управления. При достижении требуемого качества управления, процесс настройки завершается пользователем посредством нажатия кнопки "stop".

В ходе проводимой настройки *S*-модели САУ РМ симуляция с наилучшим качеством управления была осуществлена в ходе эксперимента № 692. Ошибка управления первым сочленением робота-манипулятора составила 0,0492, вторым — 0,1388, а общая ошибка управления — 0,0940. Соответствующие параметры нечёткого ПД-регулятора, использованные в ходе симуляции, показаны на рис. 6.

Динамика управляемых координат робота-манипулятора, наблюдаемая в ходе симуляции в рамках эксперимента № 692, показана на рис. 7. Как видно из рисунка, на начальной стадии процесса симуляции управляемость координаты $q_2(t)$ значительно ниже управляемости координаты $q_1(t)$. Причиной является то, что угловое положение второго сочленения манипулятора зависит от углового положения первого сочленения, но не наоборот, так как первое звено одним концом связано с основанием робота-манипулятора.

```
>> main
Введите название Simulink-модели: pd_regulator
Загрузка модели...
Загрузка завершена.
 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
Общие параметры симуляции:
StartTime = 0
StopTime = 10
FixedStep = 0.01
Solver =  ode4
Длина временного интервала определения ошибки = 5
 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
Начальные условия:
q_1(0) = 0.5
q_2(0) = 0.5
q'_1(0) = 0
q'_2(0) = 0
 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
Задающие воздействия:
Desired q_1(t) = sin(2*t)
Desired q_2(t) = cos(2*t)
 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
fx Параметры генератора хаотических величин - ввод (1) или загрузка (2):
```

Рис. 4. Запуск комплексного скрипта управления *S*-моделью САУ РМ и ввод параметров симуляции

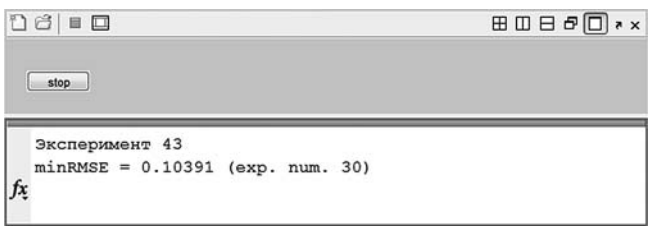


Рис. 5. Процесс настройки *S*-модели САУ РМ

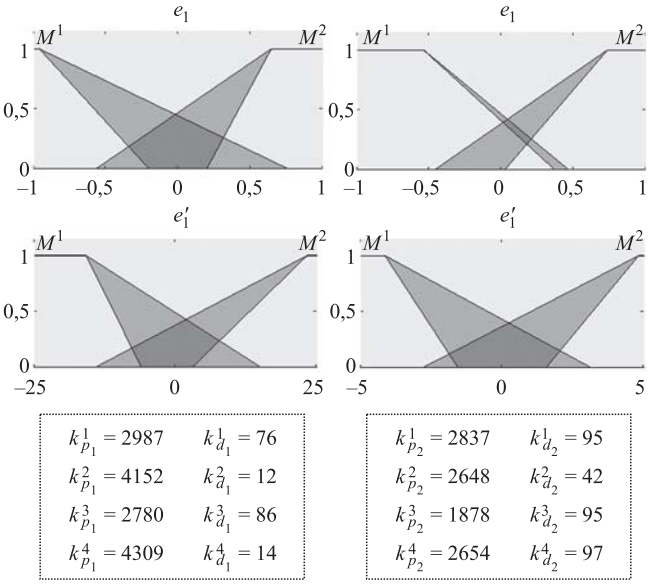


Рис. 6. Параметры нечёткого ПД-регулятора в эксперименте № 692

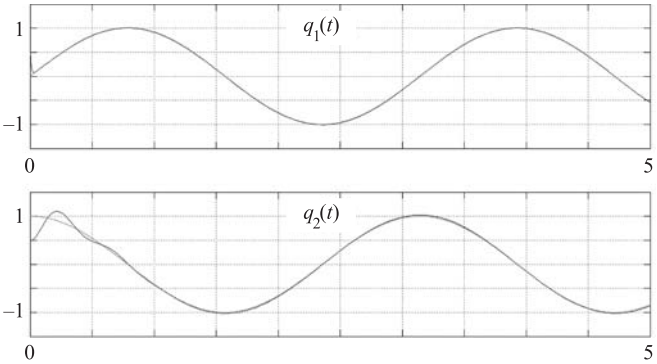


Рис. 7. Переходные процессы в ходе симуляции в рамках эксперимента № 692

Сравнительный анализ синтезированной и существующей систем управления. В работе [1] в качестве управляющего устройства, рассматриваемого в данной статье робота-манипулятора, среди прочих рассматривается ПД-регулятор, настраиваемый методом Циглер—Николс (Ziegler—Nichols), который является одним из наиболее известных методов настройки ПД- и ПИД-регуляторов. Динамика управляемых координат робота-манипулятора с настроенным ПД-регулятором показана на рис. 8. Ошибка управления первым сочленением робота-манипулятора составила 0,0543, вторым — 0,2436, а общая ошибка управления — 0,1490.

Сравнение качества управлений, осуществляемых существующей и синтезированной системами, показано на рис. 9.

На основании данных, приведённых на рис. 9, можно констатировать улучшение общего качества управления роботом-манипулятором на 36,9 % в случае использования синтезированного нечёткого ПД-регулятора.

Адаптивность синтезированной системы управления. Синтезированная система управления использует регулятор с интервальной

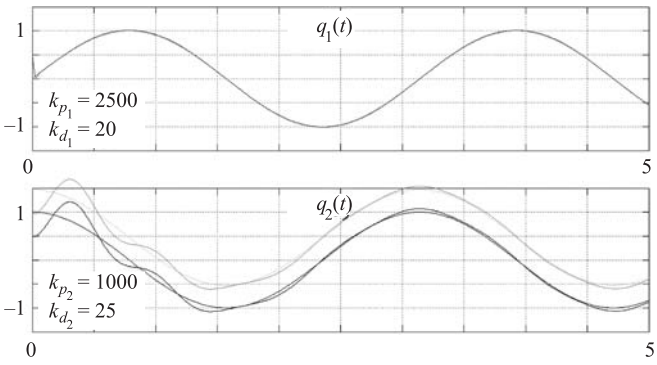
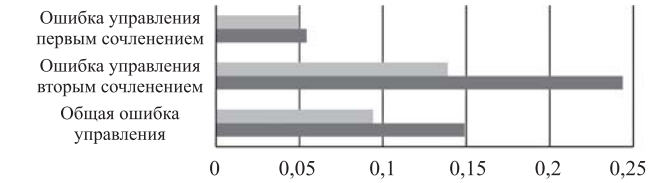


Рис. 8. Переходные процессы в ходе симуляции САУ с ПД-регулятором, настроенным методом Циглер—Николс



	Общая ошибка управления	Ошибка управления вторым сочленением	Ошибка управления первым сочленением
Синтезированная САУ	0,094	0,1388	0,0492
Существующая САУ	0,149	0,2436	0,0543

Рис. 9. Сравнение качества управлений, осуществляемых двумя САУ

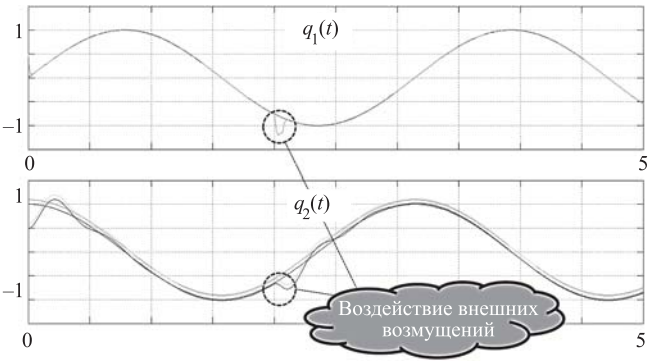


Рис. 10. Переходные процессы в ходе симуляции синтезированной САУ в условиях неопределённости

нечёткой логикой второго порядка. Нечёткий регулятор, в зависимости от величин ошибок и производных ошибок управления сочленениями РМ, осуществляет соответствующую адаптацию закона управления. Адаптация происходит на основе четырёх пропорционально-дифференциальных законов управления, полученных в результате настройки *S*-модели САУ РМ посредством ГХЧВ, и заключается в подстройке степени влияния каждого ПД-закона управления на формирование выхода регулятора в зависимости от ошибки и производной ошибки управления.

Робастность синтезированной системы управления. Проверим робастность синтезированной системы управления с помощью оценки качества управления роботом-манипулятором в условиях неопределённости, возникающей вследствие наличия внешних возмущений. Из рис. 10 видно, что в ходе симуляции синтезированной САУ на неё было оказано внешнее возмущающее воздействие, сместившее угловые положения сочленений робота-манипулятора со своих целевых траекторий. Однако после внешнего возмущающего воздействия угловые положения сочленений вновь вернулись на свои целевые траектории, что говорит о робастности синтезированной системы управления.

Заключение. Синтезирован ПД-регулятор на основе интервальной нечёткой логики второго порядка, настраиваемый посредством использования ГХЧВ и осуществляющий робастное адаптивное управление двухзвенным роботом-манипулятором с неопределённостью в динамике. Настройка с использованием ГХЧВ является автоматизированной и не требует от оператора наличия глубоких знаний о динамике объекта управления.

Проведённый сравнительный анализ демонстрирует значительное превосходство в качестве управления синтезированного и настроенного нечёткого ПД-регулятора над классическим регулятором, настроенным методом Циглер—Николс.

Библиографические ссылки

1. **Ngo T., Wang Y., Mai T.L., Nguyen M.H., Chen J.** Robust adaptive neural-fuzzy network tracking control for robot manipulator // Int. j. comput. commun. T. 7 (2012), No. 2 (Июнь). С. 341—352.

2. **Wu D.** Brief Tutorial on Interval Type-2 Fuzzy Sets and Systems [Электронный ресурс]. URL: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29006-functions-for-interval-type-2-fuzzy-logic-systems (дата обращения: 06.07.2016).

3. **Aliev R.A., Jafarov S.M., Babayev M.C., Huseynov B.Q.** Intellektual sistemlerin qurulma prinsipleri va layihelendirilmesi. Baku: Nargiz neşriyyati, 2005. 368 p.

УДК 621.398

А.П. Мороз, д-р техн. наук, **Д.Ю. Поленов**
(АО "Научно-производственное объединение измерительной техники", г. Королёв)

polenoff.mitya@yandex.ru

МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ С РАЗГОННОГО БЛОКА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Получение достоверной телеметрической информации с разгонного блока в режиме реального времени в настоящее время проблематично. Эту задачу предлагается решить с помощью системы радиосвязи, включающей разгонный блок, спутник-ретранслятор, беспилотный летательный аппарат и наземный измерительный пункт. Показана принципиальная возможность создания такой системы радиосвязи, рассмотрены основные особенности системы и прогнозируемый результат её применения.

Ключевые слова: система радиосвязи; информационно-телеметрическое обеспечение; приём телеметрической информации в режиме реального времени; разгонный блок; беспилотный летательный аппарат.

Obtaining reliable telemetric information from the acceleration block in real time mode is currently problematic. This problem is proposed to be solved by means of a radio communication system, including an acceleration block, a repeater satellite, an unmanned aerial vehicle and a ground measuring point. The principal possibility of creating such a radio communication system is shown, the main features of the system and the predicted result of its application are considered.

Keywords: radio communication system; information telemetry provision; reception of telemetric information in real time mode; acceleration block; unmanned aerial vehicle.

Одной из актуальных задач информационно-телеметрического обеспечения пусков ракет-носителей является получение достоверной телеметрической информации (ТМИ) с разгонных блоков (РБ) в режиме реального времени. В настоящее время эффективно решить данную задачу, используя отечественные приёмные средства, проблематично, так как участки работы маршевых двигательных установок (ДУ) РБ обычно находятся вне зон радиовидимости (ЗР) отечественных наземных измерительных пунктов (НИП).

Рассмотрим решение этой задачи на примере получения ТМИ с РБ "Бриз-М" с помощью предлагаемой системы радиосвязи (рис. 1). Её составными частями являются РБ, спутник-ретранслятор, беспилотный летательный аппарат (БПЛА) и НИП.

В качестве спутника-ретранслятора используем многофункциональную систему ретрансляции (МКСР) "Луч". Она предназначена для приёма информации с космических и наземных объектов на участках выведения космических аппаратов (КА), находящихся вне ЗР НИП, расположенных на территории России. Задачей БПЛА является сопряжение МКСР "Луч" и телеметрической аппаратуры РБ "Бриз-М" для обеспечения требуемой скорости ретрансляции ТМИ.

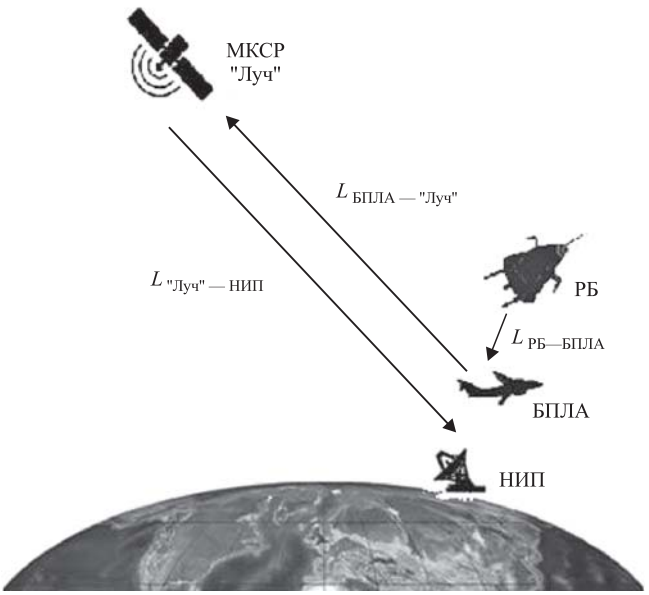


Рис. 1. Схема системы радиосвязи для получения ТМИ с РБ в режиме реального времени

Рис. 2. Местоположение БПЛА в начале и конце сеанса радиосвязи с РБ

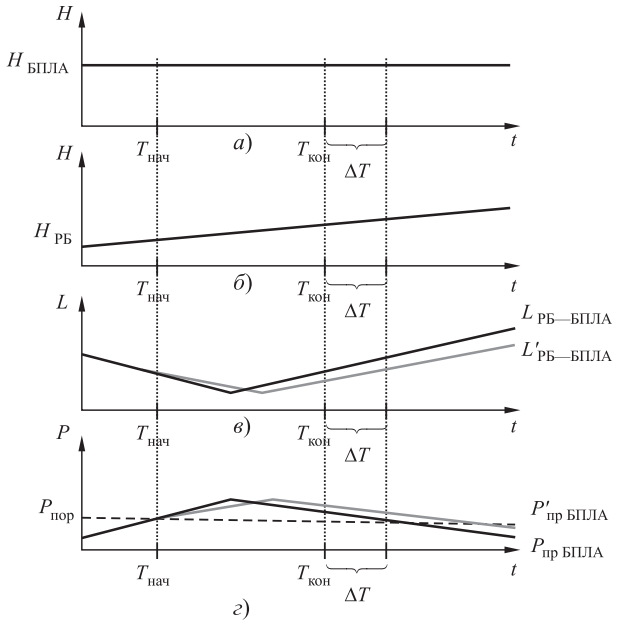


Рис. 3. Пространственно-временные зависимости характеристик элементов системы радиосвязи

Проанализируем основные характеристики рассмотренных составных частей системы радиосвязи. Мощности сигналов на входе их приёмников будут определяться выражениями

$$P_{\text{прБПЛА}} = \frac{P_{\text{перРБ}} G_{\text{перРБ}} G_{\text{прБПЛА}}}{4\pi L^2_{\text{РБ–БПЛА}}}, \qquad (1)$$

$$P_{\text{пр"Луч"}} = \frac{P_{\text{перБПЛА}} G_{\text{перБПЛА}} G_{\text{пр"Луч"}}}{4\pi L^2_{\text{БПЛА–"Луч"}}}, \qquad (2)$$

$$P_{\text{прНИП}} = \frac{P_{\text{пер"Луч"}} G_{\text{пер"Луч"}} G_{\text{прНИП}}}{4\pi L^2_{\text{"Луч"–НИП}}}, \qquad (3)$$

где $P_{\text{пр БПЛА}}$, $P_{\text{пр "Луч"}}$, $P_{\text{пр НИП}}$ — мощности сигналов, поступающих на вход приёмников БПЛА, МКСР "Луч" и НИП соответственно; $P_{\text{пер РБ}}$, $P_{\text{пер БПЛА}}$, $P_{\text{пер "Луч"}}$ — мощности выходных сигналов радиопередатчиков РБ, БПЛА и МКСР "Луч" соответственно; $G_{\text{пер РБ}}$, $G_{\text{пер БПЛА}}$, $G_{\text{пер "Луч"}}$ — коэффициенты усиления передающих антенн РБ, БПЛА и МКСР "Луч" соответственно; $L_{\text{РБ—БПЛА}}$, $L_{\text{БПЛА—"Луч"}}$, $L_{\text{"Луч"—НИП}}$ — расстояния между РБ и БПЛА, БПЛА и МКСР "Луч", МКСР "Луч" и НИП соответственно; $G_{\text{пр БПЛА}}$, $G_{\text{пр "Луч"}}$, $G_{\text{пр НИП}}$ — коэффициенты усиления приёмных антенн БПЛА, МКСР "Луч" и НИП соответственно.

Рассмотрим пространственно-временные характеристики элементов построенной системы радиосвязи. Для этого рассмотрим передачу ТМИ в режиме реального времени при включении маршевого двигателя (МД) РБ на примере третьего включения МД. Время начала $T_{\text{нач}}$ и окончания $T_{\text{кон}}$ сеанса радиосвязи показано на рис. 2.

Рассмотрим два варианта полёта БПЛА:

I. В течение всего сеанса радиосвязи БПЛА находится на высоте $H_{\text{БПЛА}}$ и неподвижен относительно поверхности Земли.

II. БПЛА движется на высоте $H_{\text{БПЛА}}$ в направлении проекции траектории полёта РБ на Землю со скоростью $V_{\text{БПЛА}}$.

Вариант I. В течение сеанса связи с РБ БПЛА будет находиться на постоянной высоте ($H_{\text{БПЛА}}$ = const, рис. 3, *а*), а высота орбиты РБ $H_{\text{РБ}}$ будет изменяться, а именно расти (рис. 3, *б*). Расстояние между РБ и БПЛА $L_{\text{РБ—БПЛА}}$ вначале будет уменьшаться — при приближении РБ к центру ЗР радиотелеметрической системы БПЛА, а затем расти — при удалении РБ от БПЛА (рис. 3, *в*). При этом значение мощности принимаемого сигнала $P_{\text{пр БПЛА}}$ зависит от дальности связи $L_{\text{РБ—БПЛА}}$ (рис. 3, *г*).

Вариант II. В случае перемещения БПЛА в направлении проекции траектории полёта РБ на Землю путь, пройденный БПЛА за вре-

мя сеанса радиосвязи РБ с БПЛА, будет равен $L_{\text{БПЛА}}$ (см. рис. 2). Значения параметров элементов предложенной системы радиосвязи, приведённые на рис. 3, *а*, *б*, по сравнению с вариантом I останутся неизменными, а расстояние между РБ и БПЛА $L'_{\text{РБ–БПЛА}}$ и значение мощности принимаемого БПЛА сигнала $P'_{\text{прБПЛА}}$ изменятся, что показано на рис. 3, *в*, *г* соответственно. На рис. 3, *г* показано значение $P_{\text{пор}}$ — минимальное значение мощности $P_{\text{пр БПЛА}}$, необходимое для достоверного приёма ТМИ с РБ. На рис. 3, *г* отчётливо видно, что увеличение границы ЗР БПЛА (в связи с перемещением БПЛА по траектории движения РБ) ведёт к увеличению длительности сеанса связи БПЛА с РБ — точка пересечения линии $P'_{\text{прБПЛА}}$ с $P_{\text{пор}}$ находится на ΔT дальше от $T_{\text{кон}}$.

Определим время сеанса радиосвязи составных частей предлагаемой системы и ЗР для двух вариантов полёта БПЛА, а также для НИП.

НИП. При системе радиосвязи НИП—РБ диаметр ЗР (рис. 4) $D_{\text{ЗР НИП–РБ}}$ и длина дуги орбиты $L_{\text{ЗР НИП–РБ}}$, пролетаемой РБ в ЗР, для рассматриваемого варианта определяются выражениями

$$D_{\text{ЗР НИП–РБ}} = 2L_1 = \\ = 2\sqrt{L_5^2 - R_3^2} = 2\sqrt{\left(R_3 + H_{\text{РБ}}\right)^2 - R_3^2}, \quad (4)$$

где $L_5 = R_3 + H_{\text{РБ}}$; R_3 — радиус Земли,

$$L_{\text{ЗР НИП–РБ}} = \frac{2\pi L_5 \cdot 2\gamma}{360} = \frac{2\pi\left(R_3 + H_{\text{РБ}}\right)\cdot 2\gamma}{360}; \quad (5)$$

$$\gamma = \arccos\frac{R_3}{R_3 + H_{\text{РБ}}}. \quad (6)$$

Таким образом, длительность сеанса связи (СС) РБ с НИП

$$\tau_{\text{СС НИП–РБ}} = \frac{L_{\text{ЗР НИП–РБ}}}{V_{\text{РБ}}}, \quad (7)$$

где $V_{\text{РБ}}$ — орбитальная скорость РБ.

Неподвижный БПЛА. Используем полученные для НИП зависимости и определим аналогичные показатели для варианта I полёта БПЛА (см. рис. 4).

При системе радиосвязи неподвижный БПЛА — РБ диаметр ЗР $D_{\text{ЗР БПЛА–РБ I}}$ и длина дуги орбиты $L_{\text{ЗР БПЛА–РБ I}}$, пролетаемой РБ в ЗР, определяются выражениями

$$D_{\text{ЗР БПЛА–РБI}} \cong 2L_3 \cong 2\left(L_1 + L_2\right) \cong \\ \cong 2\left(\sqrt{\left(R_3 + H_{\text{РБ}}\right)^2 - R_3^2} + \sqrt{\left(R_3 + H_{\text{БПЛА}}\right)^2 - R_3^2}\right), \quad (8)$$

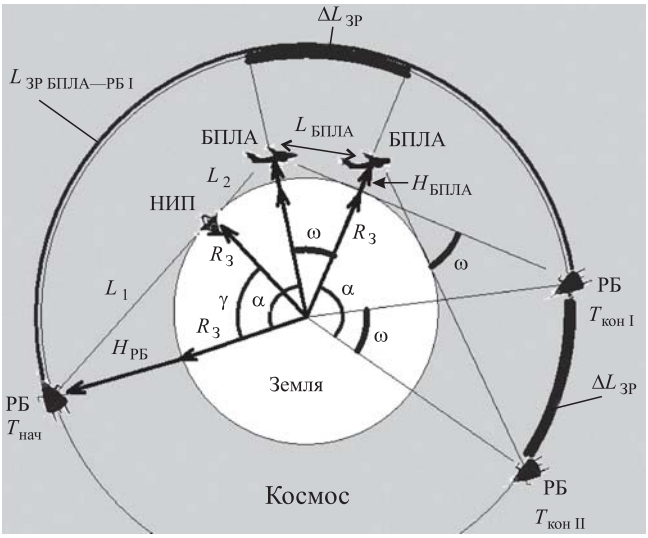


Рис. 4. Расположение элементов системы в начале и конце сеанса радиосвязи

где $L_3 = L_1 + L_2$,

$$L_{\text{ЗР БПЛА–РБI}} = \\ = \frac{2\pi L_5 \cdot 2\alpha}{360} = \frac{2\pi\left(R_3 + H_{\text{РБ}}\right)\cdot 2\alpha}{360}. \quad (9)$$

Таким образом, длительность сеанса радиосвязи РБ с неподвижным БПЛА определяется выражением

$$\tau_{\text{СС БПЛА–РБI}} = \frac{L_{\text{ЗР БПЛА–РБI}}}{V_{\text{РБ}}}. \quad (10)$$

Подвижный БПЛА. Приведём полученные для НИП зависимости для варианта II полёта БПЛА (см. рис. 4).

При системе радиосвязи подвижный БПЛА — РБ диаметр ЗР $D_{\text{ЗР БПЛА—РБ II}}$ и длина дуги орбиты $L_{\text{ЗР БПЛА—РБ II}}$, пролетаемой РБ в ЗР, определяются выражениями

$$D_{\text{ЗР БПЛА–РБII}} \cong D_{\text{ЗР БПЛА–РБI}} + \Delta D, \quad (11)$$

$$L_{\text{ЗР БПЛА–РБII}} = \frac{2\pi L_5\left(2\alpha + \omega\right)}{360}, \quad (12)$$

где

$$\Delta D = \tau_{\text{СС БПЛА–РБI}} V_{\text{БПЛА}} \quad (13)$$

или

$$\Delta D = \frac{2\pi L_4 \omega}{360} = \frac{2\pi\left(R_3 + H_{\text{БПЛА}}\right)\omega}{360}; \quad (14)$$

$$L_4 = R_3 + H_{\text{БПЛА}}.$$

Вычислим угол α, зная три стороны (L_3, L_4, L_5) треугольника:

$$\alpha = \arccos\frac{L_4^2 + L_5^2 - L_3^2}{2L_4L_5} =$$

$$= \arccos\frac{L_4^2 + L_5^2 - (L_1 + L_2)^2}{2L_4L_5} =$$

$$= \arccos\left\{(R_3 + H_{\text{БПЛА}})^2 + (R_3 + H_{\text{РБ}})^2 - \right.$$

$$-(\sqrt{(R_3 + H_{\text{РБ}})^2 - R_3^2} +$$

$$+\sqrt{(R_3 + H_{\text{БПЛА}})^2 - R_3^2})^2/[2(R_3 +$$

$$\left. + H_{\text{БПЛА}})(R_3 + H_{\text{РБ}})]\right\}. \qquad (15)$$

Вычислим угол ω из выражения (13):

$$\omega \cong \frac{2\pi(R_3 + H_{\text{БПЛА}})}{360\Delta D}. \qquad (16)$$

Длительность сеанса радиосвязи РБ с подвижным БПЛА определяется выражением

$$\tau_{\text{СС БПЛА–РБII}} = \frac{L_{\text{ЗР БПЛА–РБII}}}{V_{\text{РБ}}}. \qquad (17)$$

Сравним системы связи с использованием БПЛА с двумя вариантами полёта, описанными выше, и с использованием НИП, располагающегося в районе нахождения БПЛА (при этом высотой нахождения приёмной антенны пренебрежём ($H_{\text{пр НИП}} \cong 0$)), по диаметру ЗР и длительности сеанса радиосвязи.

В качестве исходных данных примем: $R_3 =$ = 6371 км; средняя скорость РБ $V_{\text{РБ}} = 7{,}9$ км/с; средняя скорость БПЛА (RQ-4 Global Hawk производства США) $V_{\text{БПЛА}} = 800$ км/ч; $H_{\text{БПЛА}} =$ = 18 км; $H_{\text{РБ}} = 270$ км.

В таблице представлены результаты, полученные на основе вычислений, проведённых с использованием выражений (5), (7), (9), (10), (12) и (17).

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о нецелесообразности применения только НИП при организации радиосвязи с РБ, так как получаемая длительность сеанса радиосвязи меньше длительности третьего включения МД РБ, которая равна 689 с [1]. Что касается вариантов с неподвижным и подвижным БПЛА, то их применение оправдывает себя ввиду удовлетворения требованию по длительности сеанса радиосвязи во время третьего включения МД РБ в режиме реального времени (длительность сеанса радиосвязи увеличивается на 1305 и 2273 с соответственно).

Данные для сравнения вариантов систем связи

Вариант системы радиосвязи	Диаметр ЗР, км	Длительность сеанса радиосвязи, с
НИП — РБ	~3749	~604
Неподвижный БПЛА — РБ	~4707	~1994
Подвижный БПЛА — РБ	~4840	~2962

Таким образом, для рассматриваемого случая третьего включения МД РБ предлагаемая система радиосвязи позволит обеспечить приём ТМИ в режиме реального времени на всём участке его работы [2, с. 131].

Выводы:

1. Предложена модель системы передачи информации с РБ, позволяющая обеспечить приём ТМИ с РБ в режиме реального времени на всём участке работы его маршевого двигателя.

2. Рассмотрены вопросы получения ТМИ в режиме реального времени на примере третьего включения маршевого двигателя РБ "Бриз-М". Получены зависимости для зон радиовидимости составных частей предлагаемой системы радиосвязи, а также длительности сеанса радиосвязи для двух вариантов связи с использованием БПЛА и для варианта связи с использованием приёмной телеметрической станции наземного базирования.

3. Проведено сравнение схем связи с использованием двух вариантов полёта БПЛА: БПЛА неподвижен относительно Земли и БПЛА, двигающийся в направлении проекции траектории полёта РБ на Землю, со схемой, когда используется только НИП (располагающийся в районе нахождения БПЛА), по зонам их радиовидимости и длительностям сеанса радиосвязи. Показана нецелесообразность применения НИП без БПЛА. Кроме того, установлено, что применение БПЛА, как подвижного, так и неподвижного, удовлетворяет требованию осуществления передачи ТМИ на протяжении всего участка третьего включения маршевого двигателя РБ.

Библиографические ссылки

1. **Интернет-ресурс**: http://coopi.khrunichev.ru/main.php?id = 666 (дата обращения: 03.05.2016).

2. **Поленов Д.Ю., Мороз А.П.** О применении беспилотного летательного аппарата для ретрансляции телеметрической информации разгонного блока // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2015. № 3. Т. 19. С. 131—135.

УДК 681.51

Е.А. Микрин, д-р техн. наук, проф., **Н.Е. Зубов, В.Н. Рябченко, Д.Е. Ефанов, М.Н. Поклад**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
ОАО РКК "Энергия", г. Королёв)

Nikolay.Zubov@rsce.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ НУЛЯ

Рассмотрен детерминированный подход к параметрической идентификации линейной дискретной системы на основе матричных делителей нуля. Определены условия разрешимости данной задачи идентификации, приведена формулировка критерия идентифицируемости и построена формула решения (алгоритм идентификации). На числовых примерах продемонстрированы возможности подхода.

Ключевые слова: параметрическая идентификация; линейная дискретная система; матричные делители нуля.

A deterministic approach to the parametric identification of a linear discrete system based on matrix zero dividers is considered. The solvability conditions of this identification problem are determined, the formulation of the identifiability criterion is adduced and a solution formula (identification algorithm) is constructed. Numerical examples demonstrate the possibilities of the approach.

Keywords: parametric identification; linear discrete system; matrix zero dividers.

Введение и постановка задачи. При разработке сложных систем управления на различных этапах используют разнообразные методы, среди которых можно отметить аналитические расчёты и исследования, моделирование и натурный эксперимент. Часто возникает задача: по данным натурного эксперимента сделать вывод о соответствии функционирования системы её математической модели, т.е. идентифицировать модель с реально существующей (функционирующей) системой. В наиболее широкой постановке проблемы идентификации, которая в научном плане активно развивается как у нас в стране, так и за рубежом [1—4], предполагается наличие случайных факторов, при которых точные измерения невозможны. В самой простой постановке идентификацией линейной динамической системы, заданной в пространстве состояний, называется определение элементов матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ в уравнении динамики

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t);\ \ \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \qquad (1)$$

по детерминированным данным измерений компонент вектора состояний $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$. В уравнении (1) $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^r$ — вектор входных величин (сигналов) системы; $\mathbf{x}_0$ — начальные условия; $\mathbb{R}$ — вещественная ось. Такая идентификация также называется *параметрической*.

Такая простая постановка задачи предполагает использование вычислительной техники, работающей с дискретными величинами. Поэтому вместо дифференциального уравнения (1) используют эквивалентное рекурсивное соотношение

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k;\ \ k = \overline{0, N-1} \qquad (2)$$

или систему уравнений

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= \mathbf{A}\mathbf{x}_0 + \mathbf{B}\mathbf{u}_0; \\ \mathbf{x}_2 &= \mathbf{A}\mathbf{x}_1 + \mathbf{B}\mathbf{u}_1; \\ &\vdots \\ \mathbf{x}_N &= \mathbf{A}\mathbf{x}_{N-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{N-1}, \end{aligned} \qquad (3)$$

где N — число шагов измерений.

Каждое уравнение системы (3) равносильно n скалярным равенствам. Таким образом, для определения $n^2 + nr$ коэффициентов матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ имеется $N \times n$ уравнений.

Если в (2) положить $\mathbf{u}_k = 0$, то, записывая систему (3) в виде равенства строк с векторными компонентами или с учётом очевидных подстановок

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_2 & \dots & \mathbf{x}_{N-1} & \mathbf{x}_N \end{pmatrix} = \\ = \mathbf{A}\begin{pmatrix} \mathbf{x}_0 & \mathbf{A}\mathbf{x}_0 & \dots & \mathbf{A}^{N-2}\mathbf{x}_0 & \mathbf{A}^{N-1}\mathbf{x}_0 \end{pmatrix},$$

можно убедиться [5, 6] в том, что для идентифицируемости системы (точнее, определения матрицы **A**) при $N = n$ достаточно, чтобы матрица

$$\begin{pmatrix}\mathbf{x}_0 & \mathbf{x}_1 & \dots & \mathbf{x}_{N-2} & \mathbf{x}_{N-1}\end{pmatrix} \qquad (4)$$

или

$$\begin{pmatrix}\mathbf{x}_0 & \mathbf{A}\mathbf{x}_0 & \dots & \mathbf{A}^{n-2}\mathbf{x}_0 & \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{x}_0\end{pmatrix}$$

была невырожденной, т.е.

$$\det\begin{pmatrix}\mathbf{x}_0 & \mathbf{x}_1 & \dots & \mathbf{x}_{N-2} & \mathbf{x}_{N-1}\end{pmatrix} \neq 0 \qquad (5)$$

или

$$\det\begin{pmatrix}\mathbf{x}_0 & \mathbf{A}\mathbf{x}_0 & \dots & \mathbf{A}^{n-2}\mathbf{x}_0 & \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{x}_0\end{pmatrix} \neq 0.$$

Однако этот частный случай редко встречается в практических задачах, и более общая ситуация приводит к необходимости решения уравнений вида

$$\begin{pmatrix}\mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_2 & \dots & \mathbf{x}_{N-1} & \mathbf{x}_N\end{pmatrix} = \mathbf{A}\begin{pmatrix}\mathbf{x}_0 & \mathbf{x}_1 & \dots & \mathbf{x}_{N-2} & \mathbf{x}_{N-1}\end{pmatrix} + \mathbf{B}\begin{pmatrix}\mathbf{u}_0 & \mathbf{u}_1 & \mathbf{u}_2 & \dots & \mathbf{u}_{N-2} & \mathbf{u}_{N-1}\end{pmatrix};\ N \neq n. \qquad (6)$$

В данной работе рассматривается идентификация линейной дискретной системы (2) как задача определения условий совместности или *условий разрешимости*, формулировки *критерия идентифицируемости* и построения формулы решения или *алгоритма идентификации* алгебраического уравнения (6). Неизвестными здесь считаются матрицы **A** и **B**. В основу получения приводимых далее результатов положен *метод матричных делителей нуля* [7, 8].

Методическая основа работы. Рассмотрим матричное уравнение вида

$$\mathbf{XZ} + \mathbf{YQ} = \mathbf{C}, \qquad (7)$$

где **Z**, **Q**, **C** — заданные в общем случае комплексные матрицы; **X**, **Y** — искомые матрицы.

Условно данное уравнение можно назвать *правосторонним*.

Рассмотрим процедуру получения решения (7) на основе метода канонизации [7].

Вообще говоря, метод канонизации оперирует понятиями так называемых матричных канонизаторов и делителей нуля. Напомним, что (*левым* $\mathbf{A}_L^{\perp}$ и *правым* $\mathbf{A}_R^{\perp}$) *делителями нуля* максимального ранга и (*левым* $\mathbf{A}^L$ и *правым* $\mathbf{A}^R$) *канонизаторами* некоторой матрицы **A** размера $m \times n$ и ранга r называются матрицы, удовлетворяющие блочному матричному равенству

$$\begin{pmatrix}\mathbf{A}^L \\ \mathbf{A}_L^{\perp}\end{pmatrix}\mathbf{A}\begin{pmatrix}\mathbf{A}^R & \mathbf{A}_R^{\perp}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\mathbf{I}_r & 0_{r\times(n-r)} \\ 0_{(m-r)\times r} & 0_{(m-r)\times(n-r)}\end{pmatrix}, \qquad (8)$$

где $\mathbf{I}_r$ — единичная матрица порядка r.

Сводным канонизатором (*полуобратной*) называют матрицу, получаемую из левого и правого канонизаторов по формуле

$$\mathbf{A}^- = \mathbf{A}^R\mathbf{A}^L$$

и удовлетворяющую условиям регулярности фон Неймана

$$\mathbf{AA}^-\mathbf{A} = \mathbf{A};\ \mathbf{A}^-\mathbf{AA}^- = \mathbf{A}^-.$$

Формулы решения левосторонних и правосторонних линейных матричных уравнений методом канонизации представлены в таблице, где матрицы $\boldsymbol{\mu}$, $\boldsymbol{\eta}$ имеют соответствующие размеры и произвольные элементы.

Заметим, что изучаемое уравнение (6) с точностью до обозначений имеет вид именно правостороннего уравнения (7).

Перепишем (7) в эквивалентном виде:

$$\mathbf{XZ} = \mathbf{C} - \mathbf{YQ} \qquad (9)$$

и рассмотрим его как уравнение относительно неизвестной матрицы **X**. В соответствии с таблицей это уравнение разрешимо, если выполняется условие

$$(\mathbf{C} - \mathbf{YQ})\mathbf{Z}_R^{\perp} = 0. \qquad (10)$$

Это условие можно рассматривать как ограничение на выбор неизвестной **Y**. Действительно, запишем (10) в виде правостороннего уравнения, но теперь уже относительно матрицы **Y**:

$$\mathbf{YQZ}_R^{\perp} = \mathbf{CZ}_R^{\perp}. \qquad (11)$$

Метод канонизации

Вид уравнения		Условие разрешимости	Формульное представление
Название	Формула		
Левостороннее	$\mathbf{AX} = \mathbf{C}$	$\mathbf{A}_L^{\perp}\mathbf{C} = 0$	$\mathbf{X} = \mathbf{A}^-\mathbf{C} + \mathbf{A}_R^{\perp}\boldsymbol{\mu}$
Правостороннее	$\mathbf{XB} = \mathbf{C}$	$\mathbf{CB}_R^{\perp} = 0$	$\mathbf{X} = \mathbf{CB}^- + \boldsymbol{\eta}\mathbf{B}_L^{\perp}$

Это уравнение оказывается разрешимым, если выполняется тождество

$$\mathbf{C}\mathbf{Z}_R^{\perp}\left(\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}\right)_R^{\perp} = 0, \qquad (12)$$

где $\left(\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}\right)_R^{\perp}$ — правый делитель нуля произведения матриц $\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}$.

При выполнении условия (12) множество решений уравнения (11) имеет вид

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{Z}_R^{\perp}\left(\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}\right)^{-} + \boldsymbol{\mu}\left(\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}\right)_L^{\perp}, \qquad (13)$$

где $\left(\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}\right)^{-}$, $\left(\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}\right)_L^{\perp}$ — соответственно сводный канонизатор и левый делитель нуля произведения матриц $\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}$.

Подставляя решение (13) в соотношение (9), получаем уравнение

$$\mathbf{X}\mathbf{Z} = \mathbf{C} - \left(\mathbf{C}\mathbf{Z}_R^{\perp}\left(\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}\right)^{-} + \boldsymbol{\mu}\left(\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}\right)_L^{\perp}\right)\mathbf{Q}, \qquad (14)$$

которое всегда оказывается разрешимым относительно матрицы **X**, поскольку выполнены условия выбора (11) и (12). При этом его решение имеет вид

$$\begin{aligned}\mathbf{X} &= \left[\mathbf{C} - \left(\mathbf{C}\mathbf{Z}_R^{\perp}\left(\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}\right)^{-} + \right.\right.\\ &\left.\left. + \boldsymbol{\mu}\left(\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}\right)_L^{\perp}\right)\mathbf{Q}\right]\mathbf{Z}^{-} + \boldsymbol{\chi}\mathbf{Z}_L^{\perp} =\\ &= \mathbf{C}\left(\mathbf{I} - \mathbf{Z}_R^{\perp}\left(\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}\right)^{-}\mathbf{Q}\right)\mathbf{Z}^{-} -\\ &- \boldsymbol{\mu}\left(\mathbf{Q}\mathbf{Z}_R^{\perp}\right)_L^{\perp}\mathbf{Q}\mathbf{Z}^{-} + \boldsymbol{\chi}\mathbf{Z}_L^{\perp}, \qquad (15)\end{aligned}$$

где **I** — единичная матрица соответствующего размера.

Повторяя аналогичные операции в отношении уравнения (7), переписанного в виде

$$\mathbf{Y}\mathbf{Q} = \mathbf{C} - \mathbf{X}\mathbf{Z},$$

можно получить эквивалентное (12) условие разрешимости

$$\mathbf{C}\mathbf{Q}_R^{\perp}\left(\mathbf{Z}\mathbf{Q}_R^{\perp}\right)_R^{\perp} = 0 \qquad (16)$$

и эквивалентное формулам (13) и (15) решение

$$\begin{aligned}\mathbf{X} &= \mathbf{C}\mathbf{Q}_R^{\perp}\left(\mathbf{Z}\mathbf{Q}_R^{\perp}\right)^{-} + \boldsymbol{\eta}\left(\mathbf{Z}\mathbf{Q}_R^{\perp}\right)_L^{\perp};\\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\left(\mathbf{I} - \mathbf{Q}_R^{\perp}\left(\mathbf{Z}\mathbf{Q}_R^{\perp}\right)^{-}\mathbf{Z}\right)\mathbf{Q}^{-} -\\ &- \boldsymbol{\eta}\left(\mathbf{Z}\mathbf{Q}_R^{\perp}\right)_L^{\perp}\mathbf{Z}\mathbf{Q}^{-} + \boldsymbol{\phi}\mathbf{Q}_L^{\perp}. \qquad (17)\end{aligned}$$

Заметим, что аналогичные результаты могут быть получены при рассмотрении уравнения (7) в блочно-матричном виде

$$\begin{pmatrix}\mathbf{X} & \mathbf{Y}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\mathbf{Z}\\ \mathbf{Q}\end{pmatrix} = \mathbf{C}$$

с использованием метода блочного решения алгебраических задач [7], в котором при решении уравнений общего вида фактически рассматривается канонизация блочной матрицы. Очевидно, что различные формы конечных решений (13), (15), (17) определяются неединственностью тройки матриц

$$\left(\begin{pmatrix}\mathbf{Z}\\ \mathbf{Q}\end{pmatrix}_L^{\perp}, \begin{pmatrix}\mathbf{Z}\\ \mathbf{Q}\end{pmatrix}_R^{\perp}, \begin{pmatrix}\mathbf{Z}\\ \mathbf{Q}\end{pmatrix}^{-}\right).$$

Теперь обратимся к задаче идентификации в смысле разрешения уравнения относительно матриц **A** и **B**.

Формулировка подхода к идентификации. Предположим, что наблюдения за системой ведутся на протяжении N шагов. Для компактности формул введём обозначения для известных по постановке задачи матриц

$$\begin{aligned}\mathbf{X}_{N-1} &= \begin{pmatrix}\mathbf{x}_0 & \mathbf{x}_1 & \dots & \mathbf{x}_{N-2} & \mathbf{x}_{N-1}\end{pmatrix};\\ \mathbf{X}_N &= \begin{pmatrix}\mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_2 & \dots & \mathbf{x}_{N-1} & \mathbf{x}_N\end{pmatrix};\\ \mathbf{U} &= \begin{pmatrix}\mathbf{u}_0 & \mathbf{u}_1 & \mathbf{u}_2 & \dots & \mathbf{u}_{N-2} & \mathbf{u}_{N-1}\end{pmatrix}\end{aligned} \qquad (18)$$

и перепишем уравнение (6) с учётом (18) в виде

$$\mathbf{X}_N = \mathbf{A}\mathbf{X}_{N-1} + \mathbf{B}\mathbf{U}. \qquad (19)$$

Условие разрешимости уравнения (19) относительно неизвестных матриц **A** и **B** согласно (12) и (16) можно сформулировать в эквивалентных формах

$$\mathbf{X}_N\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)_R^{\perp} = 0, \qquad (20)$$

$$\mathbf{X}_N\mathbf{U}_{N-1}^{\perp R}\left(\mathbf{X}\mathbf{U}_{N-1}^{\perp R}\right)_R^{\perp} = 0. \qquad (21)$$

Другими словами, уравнение (6) является совместным, а система (2) — идентифицируемой, если и только если известные матрицы (18) удовлетворяют эквивалентным алгебраическим соотношениям (20), (21).

Далее, если условия (20), (21) выполняются, то решение (*алгоритм идентификации* по

рекурсивным данным) в соответствии с (13), (15), (17) имеет вид

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}_N\left(\mathbf{I} - \mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)^{-}\mathbf{U}\right)\mathbf{X}_{N-1}^{-} -$$
$$- \boldsymbol{\mu}\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)_L^{\perp}\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{-} + \boldsymbol{\chi}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp L}; \quad (22)$$
$$\mathbf{B} = \mathbf{X}_N\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)^{-} + \boldsymbol{\mu}\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)_L^{\perp},$$

или

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}_N\mathbf{U}_R^{\perp}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)^{-} + \boldsymbol{\eta}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)_L^{\perp}; \quad (23)$$
$$\mathbf{B} = \mathbf{X}_N\left(\mathbf{I} - \mathbf{U}_R^{\perp}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)^{-}\mathbf{X}_{N-1}\right)\mathbf{U}^{-} -$$
$$- \boldsymbol{\eta}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)_L^{\perp}\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}^{-} + \boldsymbol{\phi}\mathbf{U}_L^{\perp},$$

где $\boldsymbol{\mu}$, $\boldsymbol{\chi}$, $\boldsymbol{\eta}$, $\boldsymbol{\phi}$ — произвольные матрицы соответствующего размера.

Ясно, что однозначность решений (отсутствие произвола в решениях (22) и (23)) существует, когда искомые матрицы выражаются формулами

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}_N\left(\mathbf{I} - \mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)^{-}\mathbf{U}\right)\mathbf{X}_{N-1}^{-}; \quad (24)$$
$$\mathbf{B} = \mathbf{X}_N\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)^{-},$$

или

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}_N\mathbf{U}_R^{\perp}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)^{-}; \quad (25)$$
$$\mathbf{B} = \mathbf{X}_N\left(\mathbf{I} - \mathbf{U}_R^{\perp}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)^{-}\mathbf{X}_{N-1}\right)\mathbf{U}^{-},$$

и достигается, если и только если строго выполняются тождества

$$\mathbf{X}_{N-1}^{\perp L} = 0;\ \left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)_L^{\perp} = 0 \quad (26)$$

или

$$\mathbf{U}_L^{\perp} = 0;\ \left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)_L^{\perp} = 0. \quad (27)$$

Но тогда это и есть алгебраическая форма *критерия идентифицируемости.*

Поясним сделанное утверждение. Согласно (18), (26) и (27) линейная рекурсивная система (2) идентифицируема тогда и только тогда, когда не только матрицы

$$\mathbf{X}_{N-1} = (\mathbf{x}_0\ \ \mathbf{x}_1\ \ \ldots\ \ \mathbf{x}_{N-2}\ \ \mathbf{x}_{N-1}); \quad (28)$$
$$\mathbf{U} = (\mathbf{u}_0\ \ \mathbf{u}_1\ \ \mathbf{u}_2\ \ \ldots\ \ \mathbf{u}_{N-2}\ \ \mathbf{u}_{N-1})$$

не имеют линейно зависимых строк (т.е. их левые делители нуля равны нулю), но не имеют линейно зависимых строк и произведения матриц

$$\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R} =$$
$$= (\mathbf{u}_0\ \mathbf{u}_1\ \mathbf{u}_2\ \ldots\ \mathbf{u}_{N-2}\ \mathbf{u}_{N-1})(\mathbf{x}_0\ \mathbf{x}_1\ \ldots\ \mathbf{x}_{N-2}\ \mathbf{x}_{N-1})_R^{\perp};$$
$$\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp} =$$
$$= (\mathbf{x}_0\ \mathbf{x}_1\ \ldots\ \mathbf{x}_{N-2}\ \mathbf{x}_{N-1})(\mathbf{u}_0\ \mathbf{u}_1\ \mathbf{u}_2\ \ldots\ \mathbf{u}_{N-2}\ \mathbf{u}_{N-1})_R^{\perp}.$$

В указанном выше частном случае (4), (5), когда матрица $\mathbf{X}_{N-1}$ (28) имеет квадратный вид ($N = n$), согласно (26) для идентифицируемости системы (2), действительно, необходимо и достаточно обеспечить невырожденность матрицы:

$$\det(\mathbf{x}_0\ \ \mathbf{x}_1\ \ \ldots\ \ \mathbf{x}_{N-2}\ \ \mathbf{x}_{N-1}) \neq 0.$$

Объединение выражений (22), (23), (26) и (27) в силу их эквивалентности позволяет записать формулы решения задачи идентификации в более компактном виде:

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}_N\mathbf{U}_R^{\perp}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)^{-} + \boldsymbol{\eta}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)_L^{\perp}; \quad (29)$$
$$\mathbf{B} = \mathbf{X}_N\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)^{-} + \boldsymbol{\mu}\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)_L^{\perp}.$$

Тогда *критерий идентифицируемости матрицы* **A** запишется в виде условия

$$\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)_L^{\perp} = 0, \quad (30)$$

а *критерий идентифицируемости матрицы* **B** — условия

$$\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)_L^{\perp} = 0. \quad (31)$$

При удовлетворении соответствующих критериев (30), (31) идентифицируемые матрицы **A** и **B** определяются выражениями

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}_N\mathbf{U}_R^{\perp}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)^{-}, \quad (32)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{X}_N\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)^{-}. \quad (33)$$

Рассмотрим некоторые характерные примеры решения задачи идентификации на основе полученных соотношений, при этом в силу эквивалентности условий разрешимости задачи идентификации (20), (21) в дальнейшем будем использовать, например, условие (21).

Расчётные примеры. Пусть требуется идентифицировать матрицы **A** и **B** линейной MIMO-системы, представимой уравнением (2), по дискретно заданным последовательностям сигналов

$$\mathbf{X}_{N-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (34)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{X}_N = \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Вычислим канонизатор и делители нуля: матрицы $\mathbf{X}_{N-1}$:

$$\mathbf{X}_{N-1}^{\perp L} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad (36)$$

$$\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \ \mathbf{X}_{N-1}^{-} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

матрицы **U**:

$$\mathbf{U}_L^{\perp} = 0; \ \mathbf{U}_R^{\perp} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}; \ \mathbf{U}^{-} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (37)$$

произведений матриц:

$$\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 \end{pmatrix}; \ \left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)_L^{\perp} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad (38)$$

$$\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)_R^{\perp} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \ \left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)^{-} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

произведений матриц:

$$\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \ \left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)_L^{\perp} = 0; \quad (39)$$

$$\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)_R^{\perp} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}; \ \left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)^{-} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Подставляя соответствующие матрицы из (35), (37), (38) в условие (21), получаем нулевую результирующую матрицу $\mathbf{X}_N\mathbf{U}_R^{\perp}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)_R^{\perp} = 0$. Таким образом, задача идентификации в данном случае является разрешимой.

Из (38) и (39) следует, что критерий идентифицируемости матрицы **B** (31) выполняется и сама матрица может быть вычислена по формуле (33):

$$\mathbf{B} = \mathbf{X}_N\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)^{-} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix},$$

однако критерий идентифицируемости матрицы **A** (30) не выполняется $\left(\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)_L^{\perp} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \end{pmatrix}\right)$, тогда согласно формуле (29) имеем

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}_N\mathbf{U}_R^{\perp}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)^{-} + \boldsymbol{\eta}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)_L^{\perp} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} +$$

$$+ \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_1 & \eta_1 \\ \eta_2 & \eta_2 \end{pmatrix}. \quad (40)$$

Действительно, при любых элементах η_1, η_2 пара матриц

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \eta_1 & \eta_1 \\ \eta_2 & \eta_2 \end{pmatrix}; \ \mathbf{B} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

при заданных сигналах (34) и (35) обращает уравнение (2) в тождество:

$$\begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_1 & \eta_1 \\ \eta_2 & \eta_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} +$$

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

Заметим, что числовые последовательности (34) и (35) были получены при моделировании переходной характеристики системы с матрицами

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0{,}1 & 0{,}1 \\ 0{,}1 & 0{,}1 \end{pmatrix}; \ \mathbf{B} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

и начальными условиями

$$\mathbf{x}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}.$$

Необходимо отметить, что исходная матрица **A** принадлежит найденному множеству (40).

Усложним задачу. Предположим, что нам доступны следующие данные:

$$\mathbf{X}_{N-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (41)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (42)$$

$$\mathbf{X}_N = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (43)$$

Канонизация матриц $\mathbf{X}_{N-1}$, $\mathbf{U}$, $\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}$ и $\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}$ приводит к равенствам

$$\mathbf{X}_{N-1}^{\perp L} = 0;$$

$$\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R} = \begin{pmatrix} -1 & -2 \\ 1 & 2 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \ \mathbf{X}_{N-1}^{-} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{U}_L^{\perp} = 0; \ \mathbf{U}_R^{\perp} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -2 & 1 & 0 \end{pmatrix}; \ \mathbf{U}^{-} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp} = \begin{pmatrix} -1 & 2 & 1 \\ -2 & 0 & 1 \\ 4 & -2 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)_L^{\perp} = 0; \ \left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)_R^{\perp} = 0;$$

$$\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)^{-} = \left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)^{-1} = \frac{1}{14}\begin{pmatrix} 2 & -4 & 2 \\ 3 & -5 & -1 \\ 4 & 6 & 4 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R} = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)_L^{\perp} = 0; \ \left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)_R^{\perp} = 0;$$

$$\left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)^{-} = \left(\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}\right)^{-1} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{7} & \frac{4}{7} \\ \frac{2}{7} & -\frac{1}{7} \end{pmatrix}.$$

Отметим, что в данном случае матрицы $\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}$ и $\mathbf{U}\mathbf{X}_{N-1}^{\perp R}$ имеют нулевые матрицы в качестве левых делителей нуля и, значит, в соответствии с условием разрешимости (21) и критериями идентифицируемости (30), (31) решение задачи идентификации согласно (32), (33) имеет однозначный вид:

$$\mathbf{A} = \frac{1}{14}\begin{pmatrix} 4 & -8 & 4 \\ 12 & -3 & 5 \\ -4 & 15 & 3 \end{pmatrix}; \ \mathbf{B} = \frac{1}{7}\begin{pmatrix} 4 & 5 \\ -9 & 1 \\ 3 & -5 \end{pmatrix}.$$

Если же вместо последовательности (42) задана, например, матрица

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

то оказывается, что последняя имеет ненулевой левый делитель нуля (линейно зависимые строки):

$$\mathbf{U}_L^{\perp} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Более того, условие разрешимости (21) при неизменных матрицах (41), (43)

$$\mathbf{X}_N\mathbf{U}_R^{\perp}\left(\mathbf{X}_{N-1}\mathbf{U}_R^{\perp}\right)_R^{\perp} = \frac{1}{4}\begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ -5 \end{pmatrix} \neq 0$$

не выполняется, что, в свою очередь, означает принципиальную неразрешимость задачи идентификации по имеющимся данным.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-11-00046).

Библиографические ссылки

1. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш.** и др. Идентификация положения равновесной ориентации международной космической станции как задача матричного пополнения с устойчивостью // Изв. РАН. ТиСУ. 2012. № 2. С. 130—144.

2. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н.** и др. Применение адаптивного полосового фильтра в качестве наблюдателя в контуре управления международной космической станции // Изв. РАН. ТиСУ. 2012. № 4. С. 88—100.

3. **Aarts R.G.** System Identification and Parameter Estimation. Twente University, 2012.

4. **Bedoui S., Ltaief M., Abderrahim K.** New Results on Discrete-time Delay Systems Identification //

Intern. J. of Automation and Computing. 2012. Vol. 9 (6). P. 570—577.

5. **Гроп Д.** Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979.

6. **Машиностроение:** Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. Автоматическое управление. Теория. Т. I-4 / Е.А. Федосов, А.А. Красовский, Е.П. Попов и др.; под общ. ред. Е.А. Федосова. М.: Машиностроение, 2000.

7. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н.** Матричные методы в теории и практике систем автоматического управления летательных аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. 672 с.

8. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Олейник А.С., Рябченко В.Н.** Терминальное релейно-импульсное управление линейными стационарными динамическими системами // Изв. РАН. ТиСУ. 2014. № 3. С. 134—149.

УДК 681.513.6

М.К. Хубеев, д-р техн. наук, проф.
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)

atp@pstu.ru

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР: РАЦИОНАЛЬНАЯ ПАССИВНАЯ АДАПТАЦИЯ

Предлагается подход к синтезу рациональной пассивной адаптивной системы, встроенной в энергосберегающий пропорционально-интегральный регулятор, который способствует экономии энергоресурсов и повышает точность системы автоматического регулирования в различных условиях эксплуатации. Главное достоинство регулятора — уменьшение объёма работы, выполняемой исполнительным устройством. Алгоритмы апробированы на математических моделях объектов регулирования, отличающихся линейной частью и относительным запаздыванием.

Ключевые слова: адаптация; регулятор; передаточная функция; транспортное запаздывание; энергосбережение; точность; исполнительное устройство.

An approach to the synthesis of a rational passive adaptive system incorporated into an energy-saving proportional-integral regulator is proposed. This approach helps to save energy resources and improves the accuracy of the automatic control system under various operating conditions. The main advantage of the regulator is a reduction in the amount of work performed by the actuator. The algorithms are tested on mathematical models of control objects that are distinguished by a linear part and a relative delay.

Keywords: adaptation; regulator; transmission function; transport lag; energy saving; accuracy; actuator.

Введение. Многократно возросшие возможности современной вычислительной техники открывают перспективы для реализации сложных алгоритмов функционирования регуляторов. Наиболее приемлемыми с практической точки зрения являются пассивные адаптивные системы регулирования [1].

Предположим, что задача пассивной адаптации решена и существует адаптивный пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, позволяющий мгновенно находить оптимальные по точности настройки регулятора. Такой регулятор назовём оптимальным адаптивным ПИ ($ПИ^{ОА}$)-регулятором. Для обозначения параметров этого регулятора будем использовать нижний индекс "*o*", во всех случаях для обозначения начальных параметров будем применять нижний индекс "*p*", а конечных — "*l*".

В работе [1] исходя из требований точности определения параметров объектов регулирования (ОР) с погрешностью $\Delta < 5$ % высказано сомнение в разрешимости задачи пассивной адаптации. Дополнительные трудности возникают для ОР, имеющих транспортное запаздывание. Определённые проблемы связаны с наличием шума измерений, квантования сигнала по амплитуде на выходе средства измерения, люфта исполнительного устройства (ИУ) и т.д. О сложности задачи говорит и тот факт, что в распределённых системах управления ведущих производителей отсутствует система, тем более встроенная в регулятор,

которая решает задачу пассивной адаптации с достаточно высокой точностью.

В этих условиях представляет интерес следующий подход. Необходимо выполнить синтез такой адаптивной системы, которая обеспечит превосходство в реальных условиях эксплуатации по сравнению с системой автоматического регулирования (САР), содержащей ПИ^{ОА}-регулятор. Такую систему назовём рациональной адаптивной системой, а энергосберегающий ПИ (ЭПИ)-регулятор с такой системой обозначим ЭПИ^{РА}-регулятор.

Рациональный подход к адаптации. Рассмотрим сущность рационального подхода к адаптации на конкретном примере.

Пусть на САР, содержащую ПИ-регулятор и линейный ОР не ниже первого порядка с транспортным запаздыванием, на интервале времени $\Delta t = t - t_0 \in T$, где t — текущее время; t_0 — начальный момент времени; T — множество интервалов времени, действует случайное возмущающее воздействие по каналу стабилизации $f \in F$, где F — множество возмущающих воздействий. При этом качество функционирования САР можно охарактеризовать значениями максимальной ошибки регулирования (МОР) ε_{max} и суммарным (по модулю) изменением сигнала на выходе регулятора (СИСВР) $u_с$. Предположим, что при $t_0 \leqslant 0$ настройки пропорциональной и интегральной составляющих регулятора $k_{E\,p}$ и $k_{I\,p}$ оптимальны по точности. Тогда, если коэффициент передачи ОР в начальный момент времени $t_0 = 0$ изменить в n раз, то на этом же интервале времени Δt получим следующие значения параметров САР с ПИ^{ОА}-регулятором:

$$k_{E\,o} = k_{E\,p}/n;\ k_{I\,o} = k_{I\,p}/n;$$
$$\varepsilon_{max\ o} = \varepsilon_{max\ p} n;\ u_{с\,o} = u_{с\,p}.$$

Покажем, что эти результаты противоречат практическим потребностям производства:

условие А. Если $n > 1$, то МОР возрастёт и значение регулируемого параметра может превысить технологический допуск, поэтому необходимо обеспечить более высокую точность регулирования по сравнению с ПИ^{ОА}-регулятором. Отметим, что увеличение МОР может возникнуть за счёт изменения и других параметров ОР. Примем, что этому условию соответствуют настройки регулятора, одна из которых больше оптимальной, а другая не меньше оптимального значения (сильные настройки);

условие Б. При $n < 1$ величина МОР уменьшится, поэтому нет необходимости увеличивать значения настроек регулятора для ещё большего уменьшения МОР, лучше не изменять настройки регулятора. Это позволит уменьшить СИСВР и тем самым уменьшить энергетические затраты на регулирование и снизить объём работы, выполняемой ИУ, что способствует экономии его ресурса. Необходимость в этом возникает ещё и потому, что в целях снижения энергетических затрат и экономии ресурса ИУ первоначальные настройки регулятора часто задают меньше оптимальных значений. Этому условию соответствуют настройки регулятора, одна из которых меньше оптимальной, а другая не больше оптимального значения (слабые настройки);

условие В. К этому случаю отнесём все настройки регулятора, не удовлетворяющие условиям А и Б (неопределённые настройки).

Таким образом, рациональный подход к адаптации заключается в следующем: если текущие настройки регулятора удовлетворяют условию А, то их необходимо уменьшить до определённого предела, в случае Б настройки необходимо оставлять неизменными либо обеспечивать сбалансированность настроек в целях уменьшения СИСВР или повышения точности регулирования. При выполнении условия В целесообразно обеспечить сбалансированность настроек. Отметим, что если обеспечивается решение задачи в соответствии с условием Б (обеспечение сбалансированности настроек), то решается и задача, соответствующая условию В.

Рассмотрим один из путей создания ЭПИ^{РА}-регулятора, превосходящего ПИ^{ОА}-регулятор. Сущность рассматриваемого подхода заключается в следующем. В связи с тем что разработка пассивной адаптивной системы для ПИ-регулятора связана со значительными трудностями, после ввода в строй канала регулирования с ПИ-регулятором необходимо изменить алгоритм его функционирования таким образом, чтобы упростить создание рациональной пассивной адаптивной системы.

Перспективы для создания адаптивного регулятора открываются благодаря разработке ЭПИ-регулятора [2], выходной сигнал которого можно представить следующим образом:

$$u(t_i) = u(t_{i-1}) + a_i u_E(t_i) + b_i u_I(t_i), \qquad (1)$$

где $(a_i,\ b_i) \in R$, R — множество действительных чисел; $i \in N$, N — множество натуральных чисел; $t_i - t_{i-1} = h < h_m$ — период квантования; h_m — предельное значение такта квантования, при котором цифровая система работает практически

не хуже аналоговой; $u_E(t_i) = k_E(\varepsilon_d(t_i) - \varepsilon_d(t_{i-1}))$ — приращение пропорциональной составляющей управляющего воздействия; $u_I(t_i) = k_I(\varepsilon_d(t_i) + \varepsilon_d(t_{i-1}))$ — приращение интегральной составляющей управляющего воздействия; k_E, k_I, h — настроечные параметры регулятора; $\varepsilon_d(t_i) = \varepsilon(t_i) + \upsilon_i$ — измеренное значение ошибки регулирования; $\upsilon_i \in V$; V — множество, характеризующее ошибки измерений, обусловленные в основном шумом средства измерений и квантованием по уровню его выходного сигнала; $\varepsilon(t_i) = g(t_i) - x(t_i)$ — ошибка регулирования; $g(t_i)$ — задающее воздействие; $x(t_i)$ — выходной сигнал ОР; при необходимости для обозначения переменных, относящихся к ЭПИ-регулятору, используется верхний индекс "e".

Выходной сигнал (1) отличается от выходного сигнала ПИ-регулятора наличием коэффициентов a_i и b_i. ЭПИ-регулятор изменяет их значение относительно 1. Значения коэффициентов a_i и b_i зависят от q_c, где q_c — расчётное значение функции $Q(t_i)$, введённой в работе [3].

Использование уравнения (1) позволяет улучшить основные технические характеристики САР, функционирующих в стабилизирующем режиме (задающее воздействие не изменяется), в том числе выделим:

повышение точности регулирования технологических параметров, оцениваемое величиной МОР на заданном интервале времени;

уменьшение расхода сжатого воздуха, используемого пневматическим ИУ, зависящее от СИСВР. За счёт этого обеспечивается экономия энергии и ресурса ИУ [2].

Алгоритм адаптации. Постановка задачи рационального подхода к адаптации формулируется следующим образом.

Пусть имеется САР, содержащая линейный ОР не ниже первого порядка с относительным транспортным запаздыванием $\tau < \tau_d$, где τ_d — допустимое значение относительного транспортного запаздывания, и ЭПИ-регулятор. Необходимо найти алгоритм изменения настроек ЭПИ-регулятора $K^e = \varphi\left(\varepsilon_d(t_i), k^e_{Ep}, k^e_{Ip}, h\right)$, где $K^e = \left(k^e_E, k^e_I\right)$, который для случайного возмущающего воздействия f и интервала времени Δt обеспечит: при выполнении условий А:

$$\varepsilon^e_{\max} < \varepsilon_{\max o}, \qquad (2)$$

$$u^e_c < u_{c o}; \qquad (3)$$

при выполнении условия Б:

$$\varepsilon^e_{\max} < \varepsilon_{\max p}, \qquad (4)$$

$$u^e_c < u_{c p}. \qquad (5)$$

Методика решения включает следующие этапы:

1. Оценка области настроек k^e_{Ep} и k^e_{Ip} ЭПИ-регулятора, в которой гарантированно выполняются условия (2) и (3).

Оценим размеры этой области для САР, содержащей ОР с передаточной функцией третьего порядка и транспортным запаздыванием (обозначим его ОР3, нумерация ОР здесь и далее соответствует табл. 2), который можно считать типичным объектом с самовыравниванием [1], при следующих условиях:

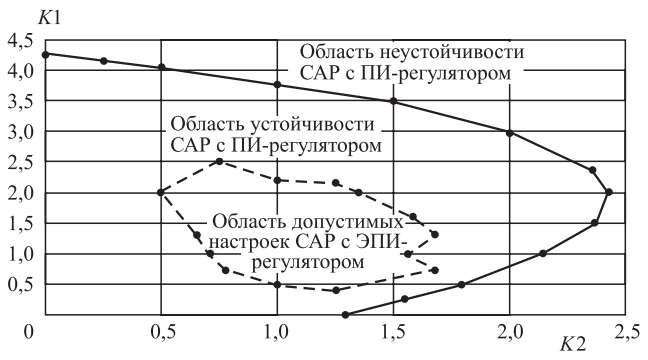
параметры ОР p, τ и оптимальные по точности настройки регулятора взяты из работы [1];

период квантования $h = 0{,}1h_m$;

на вход ОР действует случайное возмущающее воздействие, которое получено путём преобразования дискретного нормально распределённого случайного сигнала с математическим ожиданием, равным нулю, линейным формирующим фильтром второго порядка, частота среза которого равна доминирующей частоте колебаний [1] САР с ПИ-регулятором;

моделирование выполняется на временном интервале $\Delta t = 1000\ T_d$, где T_d — период колебаний на доминирующей частоте САР с ПИ-регулятором, что позволяет получить результаты, близкие к вероятностным.

Полученные результаты представлены на рисунке. Если настройки k^e_E и k^e_I ЭПИ-регулятора (после нормирования) находятся внутри области допустимых настроек, то необходимость в адаптации в принципе отсутствует. Из рисунка следует, что использование ЭПИ-регулятора позволяет значительно упростить задачу пассивной адаптации. Вместо поиска координат точки на плоскости (1, 1) необходимо найти область, в которой максимальное значение настройки превышает минимальное



Область допустимых настроек ЭПИ-регулятора:
$K1$, $K2$ — нормированные относительно настроек ПИ^{ОА}-регулятора настройки k_E, k_I

для k_E в 6,2 раза, а для k_I в 3,3 раза. При этом для случаев, соответствующих сильным настройкам, обеспечиваются значительные преимущества по величине МОР (уменьшается до 1,8 раз), а для слабых — по величине СИСВР (уменьшается до 1,3 раз). Сходные результаты получаются и для других ОР.

2. Обеспечение сбалансированности настроек k_E^e и k_I^e ЭПИ-регулятора.

Установлено, что о несбалансированности настроек регулятора свидетельствует значение q_c, поэтому найден диапазон изменения q_c для оптимальных по точности САР. Если значение q_c выходит за пределы этого диапазона, то одна из настроек ЭПИ-регулятора уменьшается, а другая увеличивается, что обеспечивает уменьшение степени несбалансированности.

3. Обеспечение выполнения условия А.

Проводится анализ процесса регулирования по ряду косвенных критериев, которые оценивают избыточность затрат на регулирование. Исследования показали, что число таких критериев значительно. В алгоритме адаптации использовано 9 критериев. Например, если средняя скорость уменьшения ошибки регулирования становится больше средней скорости увеличения ошибки регулирования, то это свидетельствует о том, что настройки регулятора могут отличаться от оптимальных значений в бóльшую сторону. Приведём ещё один пример. Если в сходных точках локальных максимумов управляющих воздействий, рассчитанных по формуле (1) $u_{l\,m}^e$ и с использованием алгоритма ПИ-регулятора $u_{l\,m}$, выполняется условие $u_{l\,m}^e > u_{l\,m}$, то это свидетельствует о том, что настройки регулятора могут отличаться от оптимальных значений в бóльшую сторону. Для повышения достоверности оценки проводится анализ ситуации по нескольким критериям.

4. Обеспечение выполнения условия Б.

Достигается тем, что при адаптации не проводится увеличение обеих настроек ЭПИ-регулятора.

Таблица 1

Результаты пассивной адаптации при выполнении условий А и В

№ п/п	Настройки ЭПИ-регулятора				СИСВР	МОР
	Начальные		Конечные			
	k_{Ep}^e/k_{Eo}	k_{Ip}^e/k_{Io}	k_{El}^e/k_{Eo}	k_{Il}^e/k_{Io}	u_{co}/u_c^e	$\varepsilon_{max\,o}/\varepsilon_{max}^e$
1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,231	1,361
2	3,77	1,0	1,24	1,00	1,213	1,374
3	3,0	2,0	1,33	1,61	1,071	1,752
4	2,37	2,37	1,31	1,41	1,111	1,683
5	2,0	2,44	1,56	1,49	1,090	1,712
6	1,0	2,16	1,24	1,34	1,130	1,610
7	0,5	1,8	1,23	1,39	1,117	1,503
8	4,05	0,5	1,16	0,60	1,267	1,219

Основные результаты. Рассмотрим особенности функционирования ЭПИ$^{\text{РА}}$-регулятора для САР, содержащей ОР3. Моделирование выполнялось для условий, соответствующих п. 1 приведённой методики, при этом принято, что к моменту времени, равному Δt, адаптация в основном завершается, поэтому оценка выполнялась на интервале от Δt до $2\Delta t$.

В табл. 1 представлены следующие случаи:

а) результаты моделирования при оптимальных настройках ЭПИ$^{\text{РА}}$-регулятора и ПИ$^{\text{ОА}}$-регулятора приведены в строке 1;

б) в начальный момент времени настройкам k_{Ep}^e и k_{Ip}^e ЭПИ$^{\text{РА}}$-регулятора задавались значения, находящиеся за пределами области устойчивости САР с ПИ-регулятором. Такой вариант возможен в двух случаях:

выбраны настройки регулятора, находящиеся за пределами области устойчивости САР с ПИ-регулятором, что маловероятно;

имелся объект с настройками, представленными в табл. 1, который за счёт изменения его параметров преобразовался в ОР3.

При этом получены следующие результаты моделирования (во всех таблицах параметры представлены в безразмерном виде):

результаты при выполнении условия А представлены в строках 2...6. Для всех случаев выполняются условия (2) и (3), так как все значения СИСВР и МОР больше единицы, причём САР с ПИ$^{\text{ОА}}$-регулятором существенно уступает по точности (до 1,752 раза) и всегда обеспечивается преимущество по величине СИСВР (до 1,213 раза);

строки 7 и 8 соответствуют условию В, при этом уменьшается несбалансированность настроек, наблюдается преимущество по величине СИСВР и МОР.

Разработанный алгоритм ЭПИ$^{\text{РА}}$-регулятора является в достаточной степени универсальным, о чём свидетельствуют результаты, приведённые в табл. 2 для семи различных

Таблица 2

Результаты пассивной адаптации для различных ОР

Номер ОР	Конечные настройки ЭПИ-регулятора		СИСВР	МОР
	k^e_{El}/k_{Eo}	k^e_{Il}/k_{Io}	u_{co}/u^e_c	$\varepsilon_{max\,o}/\varepsilon^e_{max}$
1	1,01	1,01	1,091	1,290
2	1,21	2,32	1,100	2,079
3	1,35	1,56	1,089	1,657
4	0,96	0,80	1,221	1,283
5	0,79	0,95	1,185	1,113
6	0,87	1,64	1,113	1,832
7	1,37	0,99	1,149	1,447

линейных ОР, введённых в работе [2]. Они получены для случая, когда в начальный момент времени коэффициенты передачи ОР увеличены в 2 раза. При этом три САР с ПИ-регуляторами становятся неустойчивыми (ОР4, ОР5 и ОР7), для ОР1 и ОР6 запас устойчивости меньше 5 % от первоначального. Для всех ОР выполняются условия (2) и (3), так как все значения СИСВР и МОР больше единицы.

У рассмотренных ОР максимальное относительное транспортное запаздывание (ОР5) $\tau = 1{,}4$, поэтому исследования охватывают весь заявленный в постановке задачи интервал, так как ряд авторов считает, что $\tau_d = 1$.

При выполнении условия Б для ОР3 получены результаты, показанные в табл. 3 в строках 1...3. Во всех рассмотренных случаях выполняются условия (4) и (5), так как все значения в последних двух столбцах таблицы больше единицы.

Таким образом, САР с ЭПИ^{РА}-регулятором превосходит САР с идеальной системой адаптации. Так как создать ПИ^{ОА}-регулятор невозможно, то сравним предлагаемый регулятор с ПИ-регулятором для условий, близких к реальным условиям эксплуатации.

Пусть ОР3 содержит элементы, имеющие следующие характеристики:

люфт ИУ составляет 1 % от диапазона изменения управляющего сигнала $u(t_i)$;

шум на выходе средства измерения представляет собой дискретный нормально распределённый случайный сигнал с математическим ожиданием, равным нулю, и средним квадратичным отклонением σ. В соответствии с современным уровнем техники выбрано $3\sigma = 1$ % от диапазона изменения ошибки регулирования $\varepsilon(t_i)$;

шаг квантования сигнала на выходе средства измерения составляет 1 % от диапазона изменения $\varepsilon(t_i)$;

шаг квантования сигнала на входе ИУ составляет 0,2 % от диапазона изменения управляющего сигнала $u(t_i)$. Эта величина характеризует суммарное влияние ошибок аналого-цифрового преобразования и зону нечувствительности ИУ;

параметры апериодического фильтра выбраны такими, при которых в САР с ПИ-регулятором обеспечивается незначительное влияние шума измерений на величину СИСВР (не более 1 % от СИСВР).

Рассмотрим случаи, аналогичные приведённым в табл. 1, но отклонения настроек регуляторов уменьшим примерно в 2 раза. Результаты представлены в строках 4...10 табл. 3.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

объём работы, выполняемый ИУ САР с ПИ-регулятором, может быть в 2,199 раза больше, чем САР с ЭПИ^{РА}-регулятором (см. строку 4 табл. 3). Положительный эффект от

Таблица 3

Сравнительный анализ САР с ЭПИ^{РА}- и ПИ-регулятором

№ п/п	Настройки регуляторов				СИСВР	МОР
	Начальные		Конечные			
	k_{Ep}/k_{Eo}	k_{Ip}/k_{Io}	k^e_{El}/k_{Eo}	k^e_{Il}/k_{Io}	u_c/u^e_c	$\varepsilon_{max}/\varepsilon^e_{max}$
1	1,0	0,5	0,83	0,53	1,154	1,220
2	0,5	0,5	0,66	0,48	1,228	1,312
3	0,5	1,0	0,94	1,00	1,345	1,631
4	2,87	1,0	0,90	1,09	2,199	0,880
5	2,0	1,5	0,87	1,03	1,548	0,854
6	1,68	1,68	0,86	0,96	1,503	0,918
7	1,5	1,71	0,80	0,96	1,543	0,938
8	1,0	1,57	0,90	1,09	1,482	1,038
9	0,75	1,40	0,81	0,93	1,386	1,173
10	2,52	0,75	0,97	0,96	1,620	0,925
11	2,0	1,5	1,26	1,83	1,307	1,000
12	2,0	1,5	0,81	0,87	1,669	0,782

применения адаптации весьма убедителен, так как расход сжатого воздуха уменьшается в 1,599 раза и обеспечивается значительная экономия ресурса ИУ (ИУ САР с ЭПИ^{PA}-регулятором выполняет существенно меньший объём работы);

объём работы, выполняемый ИУ САР с ПИ-регулятором, в среднем в 1,6 раза больше, чем САР с ЭПИ^{PA}-регулятором;

конечные настройки ЭПИ^{PA}-регулятора находятся в области допустимых настроек, поэтому обеспечивают бóльшую точность, чем ПИ^{OA}-регулятор. Снижение точности по сравнению с САР с ПИ-регулятором незначительно и составляет в среднем 4 %. Причём если наблюдается снижение точности, то величина СИСВР увеличивается более чем в 1,5 раза.

В некоторых случаях (см. строку 3 табл. 3) обеспечиваются как уменьшение объёма работы, выполняемой ИУ (в 1,345 раза), так и значительное повышение точности (в 1,631 раза). Этот результат можно отнести к разряду весьма значимых и труднодостижимых, так как в САР с ПИ-регулятором уменьшение объёма работы, выполняемой ИУ, приводит к снижению точности.

ЭПИ^{PA}-регулятор может функционировать в режиме высокой точности. Для исходных данных, соответствующих строке 5 табл. 3 (имеем минимальное значение $\varepsilon_{\max}/\varepsilon^{e}_{\max}$), получены результаты, представленные в строке 11, а в энергосберегающем режиме — в строке 12, при этом по величине МОР результаты не уступают ПИ^{OA}-регулятору. Преимущества, обеспечиваемые ЭПИ^{PA}-регулятором в этих случаях, очевидны.

Разработанный алгоритм рациональной пассивной адаптивной системы можно реализовать следующим образом:

1. Встроить его в ЭПИ-регулятор.

2. Использовать одну систему для множества регуляторов.

Первый вариант предпочтителен по следующим причинам:

адаптивная система функционирует в одном из наименее загруженных вычислениями тактов квантования по времени, поэтому максимальное значение интервала времени, необходимого для формирования управляющего воздействия ЭПИ-регулятором, не увеличивается;

обмен информацией между адаптивной системой и ЭПИ-регулятором производится в заранее не предсказуемые моменты времени. Поэтому во втором случае алгоритм обработки информации усложнится из-за возможности возникновения очереди, что может привести к запаздыванию при изменении настроек регулятора;

в адаптивной системе используется значительное число переменных, обеспечивающих функционирование ЭПИ-регулятора, которые придётся передавать в общую систему.

Заключение. Представленные результаты подтверждают высокую эффективность рациональной пассивной адаптивной системы для ЭПИ-регулятора даже по сравнению с оптимальной адаптивной системой с ПИ-регулятором, реализовать которую невозможно. Преимущества по сравнению с реальными системами более значимы. Использование разработанной системы позволяет повысить основные преимущества ЭПИ-регулятора (сокращение энергетических затрат, повышение точности регулирования и экономия ресурса ИУ) в реальных условиях эксплуатации.

Выполненная работа демонстрирует тот факт, что появились новые возможности для совершенствования регуляторов САР, поэтому она может представлять интерес для производителей распределённых систем управления. Работа в этом направлении позволит повысить конкурентоспособность их продукции, так как потребители заинтересованы в использовании энергосберегающих технологий, которые, очевидно, в ближайшее время вытеснят традиционные. Внедрение ЭПИ^{PA}-регулятора отечественными производителями будет способствовать решению проблемы импортозамещения.

Библиографические ссылки

1. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М., МЭИ, 2008. 400 с.

2. **Хубеев М.К.** Энергосберегающий ПИ-регулятор // Автоматизация в промышленности. 2015. № 3. С. 37—39.

3. **Хубеев М.К.** Энергосберегающий пропорционально-интегральный регулятор // Энергобезопасность и энергосбережение. 2014. № 5. С. 29—33.

УДК 004.416.6

Ю.Н. Кофанов, д-р техн. наук, проф., **С.Ю. Сотникова,** канд. техн. наук
(Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва)
yurykofanov@mail.ru

КОНЦЕПЦИЯ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АСОНИКА

Рассмотрена новая концепция формирования виртуальной модели разрабатываемого бортового электронного средства с учётом комплексного моделирования протекающих в нём физических процессов. Данная модель является ядром при разработке теории виртуального моделирования и используется при создании виртуального проекта.

Ключевые слова: виртуальная модель; бортовые электронные средства; проектирование; физические процессы; моделирование.

A new concept of the formation of the developed on-board electronic means virtual model, taking into account the complex modeling of the physical processes taking place in it is considered. This model is the core in the development of the theory of virtual modeling and is used when creating a virtual project.

Keywords: virtual model; on-board electronic means; design; physical processes; modeling.

К бортовым электронным средствам (БЭС), особенно разрабатываемым для авионики и ракетно-космической техники, предъявляются высокие требования по показателям назначения и надёжности, и поэтому разработка БЭС невозможна без применения автоматизированных средств математического моделирования протекающих в них физических процессов [1]. Часто БЭС подвержены одновременному воздействию разнородных внешних факторов, характеризующихся большими значениями температуры окружающей среды и параметрами механических воздействий (вибраций, ударов, линейных ускорений и акустических шумов). При этом обнаруживается усиление взаимного влияния физических процессов друг на друга.

Например, как показывает моделирование, изменение температуры стеклотекстолитовой платы на 20 °С приводит к увеличению амплитуды ускорений и деформаций при резонансе в 1,5...2 раза и сдвигу резонансной частоты в сторону низких частот, что очень опасно. Тепловые процессы зависят от тепловыделений в радиоэлектронных компонентах, а повышенная температура их корпусов и *p—n*-переходов изменяет электрические характеристики БЭС. Следствием этого являются системные отказы, вызываемые одновременным воздействием тепловых и механических факторов на работоспособность электрических схем и несущих конструкций [2].

Данная статья посвящена концепции такого компьютерного моделирования схемно-конструкторских решений БЭС, которое позволит на ранних этапах автоматизированного проектирования объёмно представить конструкцию и количественно оценить электрические, тепловые и механические нагрузки радиоэлектронных компонентов и несущих конструкций. В таком случае можно говорить о *виртуальном моделировании* БЭС, которое позволяет получить проект, состоящий из базового информационного набора документов: технического задания, разработанных принципиальных схем, 2D- и 3D-чертежей конструкций, компьютерных программ и результатов виртуального моделирования комплекса протекающих физических процессов в виде цветных изображений распределений температур, деформаций, ускорений и других характеристик [3, 4].

Компьютерные программы, входящие в виртуальный проект, позволяют в течение жизненного цикла БЭС решать возникающие задачи, такие как:

при проектировании по результатам моделирования физических процессов в БЭС выявлять места потенциальных отказов по близости нагрузок на радиокомпонентах к предельно допустимым и сравнивать эффективность различных вариантов изменений в схеме и конструкции;

при производстве применять методики диагностики изготовленных печатных узлов, модулей и блоков путём сравнения результатов измерения с правильными значениями, полученными при предварительном виртуальном моделировании взаимосвязанных электрических, тепловых, аэродинамических и других физических процессов, протекающих в диагностируемом изделии;

при эксплуатации применять методики мониторинга (а также ручной или автоматической регулировки и настройки) БЭС для продления сроков их использования.

При этом виртуальное моделирование может быть реализовано на конкретном реальном или виртуальном предприятии [5]. *Виртуальное предприятие* может быть создано путём интеграции отдельных групп специалистов, программных, технологических и прочих ресурсов из различных проектных и научных организаций с использованием компьютерных сетей. Это позволяет сформировать гибкий и динамичный проектный коллектив, наиболее способный обеспечить скорейший выпуск и оперативную поставку новых БЭС [6, 7].

Моделирование проводят на основе предварительно построенной виртуальной модели БЭС. *Виртуальная модель изделия* — это структурированные, определённым образом взаимосвязанные математические модели электрических, тепловых, аэродинамических (гидравлических, в случае усиленного принудительного охлаждения) и механических процессов.

Предлагаемая концепция формирования виртуальной модели подразумевает учёт взаимосвязи физических процессов, одновременно протекающих в реальной конструкции БЭС, путём передачи соответствующих данных из одного расчёта в другой. Пример такой взаимосвязи в виртуальной модели БЭС показан на рис. 1.

Если рассматривать отдельно электрические, тепловые, аэродинамические и механические модели, то они описываются разнородными по структуре математическими уравнениями [8, 9]. Так, электрические цепи принципиальных схем БЭС описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями с сосредоточенными параметрами, тепловые поля несущих конструкций — уравнениями в частных производных 2-го порядка, а механические поля печатных плат — бигармоническими уравнениями в частных производных 4-го порядка и т.д.

Возможны два принципа синтеза виртуальной модели взаимосвязанных физических процессов в БЭС:

1. Для небольших и несложных проектов виртуальная модель может быть создана разработчиком БЭС вручную на основе унифицированного описания физических процессов эквивалентными цепями с использованием электротепловой, электроаэродинамической и электромеханической аналогий [10]. Связь указанных подмоделей осуществляется через зависимые источники токов, э.д.с. и через зависимые параметры ветвей модели. Расчёт модели происходит одновременно для всех входящих в неё процессов.

2. Модели отдельных физических процессов строятся вручную или автоматически в соответствующих специализированных программных комплексах (ПК). При моделировании обмен данными между моделями производится автоматизировано с помощью конверторов.

Рассмотрим более подробно второй принцип. В настоящее время существует много программных средств, позволяющих моделировать физические процессы, протекающие в схемах и конструкциях БЭС [11, 12]. Моделирование проводится с помощью проблемно ориентированных и/или универсальных ПК. К первой группе относятся специализированные ПК: OrCAD, Altium Designer, Micro-Cap, BETASoft-Board, HyperLynx Thermal, Pro/ENGINEER и др. Ко второй — универсальные ПК, такие как ANSYS, NX Nastran, COSMOS и др.

Большинство из указанных программ, позволяющих моделировать тепловые и механические процессы в изделиях, предназначены для проектирования машиностроительных конструкций. Поэтому при применении их при проектировании электронных средств анализ возможен только на макроуровне, без возможности получения температур и механических ускорений на каждом радиокомпоненте. Для моделирования физических процессов именно в электронных средствах предназначена автоматизированная система АСОНИКА [11, 13]. Именно её рекомендуют использовать совместно с программами электрического

Рис. 1. Концепция формирования виртуальной модели БЭС

моделирования и конструкторского проектирования в концепции виртуального моделирования.

Таким образом, можно констатировать, что виртуальное моделирование электрического, теплового, аэродинамического и механического процессов в БЭС (до уровня радиокомпонентов) с использованием одного программного средства провести невозможно. Для этого требуется несколько моделирующих программ, между которыми предлагается организовать и поддерживать связь на уровне входных/выходных данных с помощью специально разработанных конвертеров (рис. 2). В результате получается специальный программный комплекс, позволяющий реализовать концепцию виртуального моделирования взаимосвязанных электрических, тепловых, аэродинамических и механических процессов в БЭС.

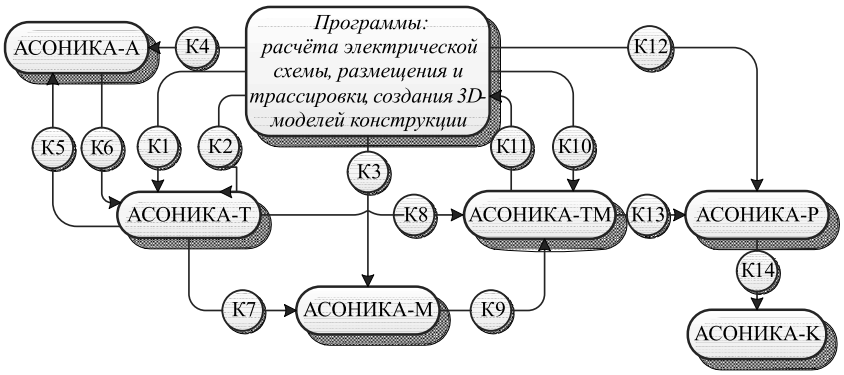


Рис. 2. Схема взаимодействия программ для виртуального моделирования физических процессов в БЭС

Рисунок 2 ясно демонстрирует механизм передачи данных при виртуальном моделировании совокупности физических процессов, а также для расчёта показателей надёжности. В блоках схемы находятся подсистемы автоматизированной системы АСОНИКА, а также программы для моделирования электрических процессов, протекающих в БЭС, и программы конструкторского проектирования. Стрелками показано, какой информацией обмениваются программы математического моделирования в процессе анализа виртуальной модели и расчёта надёжности.

Рассмотрим более подробно процесс передачи данных в процессе моделирования физических процессов, которое осуществляется с помощью конвертеров данных, обозначенных на схеме К1...К14. Отметим, что все данные, полученные при виртуальном моделировании, сохраняются в специализированной подсистеме АСОНИКА-УМ (УМ расшифровывается как управление моделированием) и составляют виртуальный проект разрабатываемого БЭС [13].

С помощью программ создания и моделирования электрических схем (например, PSpice, Mentor Graphics, Altium Designere) разрабатывается электрическая схема БЭС, далее проводятся размещение элементов и трассировка печатных плат в большинстве случаев с помощью тех же программ. Графическая 3D-модель конструкции БЭС строится с помощью программ SolidWorks, КОМПАС, ProEngineer, AutoCAD, Inventor, T-FLEX CAD и т.п.

В соответствии с иерархическим подходом в начале виртуального моделирования анализируются тепловые и механические процессы в шкафах и блоках БЭС. Вектор рассчитанных мощностей радиокомпонентов из программы электрического моделирования через конвертер К1 и графические модели через конвертер К2 импортируются в подсистему АСОНИКА-Т для анализа тепловых и через конвертер К3 в подсистему АСОНИКА-М для анализа механических процессов.

При наличии принудительного охлаждения графические модели через конвертер К4, а также температуры воздуха на входах в аэродинамические каналы и температуры стенок каналов, полученные при тепловом моделировании блока, через конвертер К5 передаются в подсистему АСОНИКА-А для анализа аэродинамической модели исследуемой конструкции. Рассчитанный вектор скоростей воздуха (воды или другого жидкого вещества) в каналах передается через конвертер К6 опять в модель тепловых процессов блока, в подсистему АСОНИКА-Т для корректировки параметров ветвей, учитывающих вынужденную конвекцию и массоперенос.

Вектор температур конструктивных узлов БЭС в результате повторного расчёта в подсистеме АСОНИКА-Т с уточнёнными данными передаётся через конвертер К7 в подсистему АСОНИКА-М. Вектор температур конструктивных узлов БЭС и воздуха внутри изделия через конвертер К8 передаётся в подсистему АСОНИКА-ТМ. Далее с помощью подсистемы АСОНИКА-М проводится анализ конструкции шкафа и/или блока при воздействии на них ударов, вибраций, линейных ускорений, акустических шумов.

Вектор ускорений в местах крепления печатного узла (ПУ) передаётся через конвертер К9 в подсистему АСОНИКА-ТМ. В ней также автоматически формируются тепловые моде-

ли ПУ на основе информации о мощностях тепловыделений и размещении радиокомпонентов, полученной через конвертер К10. Результаты моделирования, получаемые в подсистемах АСОНИКА-Т и АСОНИКА-М, являются граничными условиями для теплового и механического расчёта всех ПУ БЭС.

Полученные температуры радиокомпонентов ПУ при помощи конвертера К11 передаются в программу электрического моделирования для коррекции соответствующих параметров радиокомпонентов, затем проводится очередной итерационный расчёт. Итерации повторяются до тех пор, пока рассчитанные электрические, тепловые и механические нагрузки на радиокомпоненты не будут удовлетворять требованиям надёжности.

Для заполнения карт рабочих режимов в подсистему АСОНИКА-Р через конвертер К12 передаются перечень радиокомпонентов, установленных на всех ПУ и корпусе БЭС, и вектор электрических мощностей, токов и напряжений на радиокомпонентах, а через конвертер К13 — вектор температур корпусов и ускорений на радиокомпонентах.

В заключение необходимо оценить надёжность разрабатываемого БЭС. Для расчёта надёжности через конвертер К14 векторы электрических, тепловых и механических нагрузок передаются в подсистему АСОНИКА-К.

Результатом проведения виртуального моделирования БЭС будет набор сохранённых в виртуальном проекте схем, чертежей, результатов моделирования, карт рабочих режимов и другая подобная документация.

Практический эффект применения виртуального моделирования, учитывающего комплексное влияние друг на друга протекающих электрических, тепловых, аэродинамических и механических процессов, и формирования на его основе виртуального проекта БЭС заключается в повышении точности моделирования (на 20...30 %) и, соответственно, точности расчётов надёжности. За счёт уменьшения числа изменений в проекте, вносимых в процессе виртуального моделирования, происходит снижение сроков и трудоёмкости проектирования БЭС на 60 %. Также повышение точности результатов при виртуальном моделировании позволяет одновременно выявить системные отказы БЭС, которые не выявляются при раздельном моделировании электрических, тепловых, аэродинамических и механических процессов.

Статья подготовлена в ходе проведения работы (проект № 17-01-0105) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2017—2018 гг. и в рамках государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации «5-100».

Библиографические ссылки

1. **Информационная** поддержка жизненного цикла электронных средств / В.В. Гольдин, В.Г. Журавский, Ю.Н. Кофанов, А.В. Сарафанов. М.: Радио и связь, 2002. 386 с.

2. **Кофанов Ю.Н., Сотникова С.Ю.** Информационные технологии теплового и механического моделирования радиоэлектронных средств. М., НИУ ВШЭ, 2014. 87 с.

3. **Разработка** научных основ, создания и внедрения автоматизированных систем виртуального математического моделирования физических процессов в РЭС: Описание работы, выдвинутой на соискание премии Правительства России в области науки и техники за 2000 г. / Ю.Н. Кофанов, В.В. Жаднов, А.В. Сарафанов и др. М.: МГИЭМ и ОАО ЦКБ «Алмаз», 2000.

4. **Кофанов Ю.Н.** Виртуальное моделирование взаимосвязанных процессов разнородной физической природы // Системные проблемы надёжности, качества, математического моделирования и инфотелекоммуникационных технологий в инновационных проектах / отв. ред. Ю.Н. Кофанов. М., НИУ ВШЭ, 2014. С. 91—113.

5. **Davidow W., Malone M.** The Virtual Corporation: Structuring and Revitalizing the Corporation for the 21st Century. New York: Harper Collins, 1992.

6. **Вичугова А.А.** Практические аспекты конфигурирования информационных систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 10. С. 12—17.

7. **Бондаренко А.В., Рогова Н.Г.** Архитектура и методы реализации информационного портала предприятия // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 1. С. 55—60.

8. **Кофанов Ю.Н.** Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности радиоэлектронных средств. М.: Радио и связь, 1991. 360 с.

9. **Информационные** технологии проектирования радиоэлектронных средств / Ю.Н. Кофанов, А.С. Шалумов, С.У. Увайсов, С.Ю. Сотникова; отв. ред. Ю.Н. Кофанов. М., НИУ ВШЭ, 2013. 392 с.

10. **Кофанов Ю.Н., Сотникова С.Ю.** Физические основы математического моделирования инфокоммуникационных систем и средств связи. М.: Энергоатомиздат, 2015. 103 с.

11. **Моделирование** радиоэлектронных средств с учётом внешних тепловых, механических и других воздействий с помощью системы АСОНИКА / А.С. Шалумов, В.М. Ивашко, Н.В. Малютин, Ю.Н. Кофанов, Е.Ю. Тихонова; науч. ред. Ю.Н. Кофанов, А.С. Шалумов. Минск, ВА РБ, 2014. 372 с.

12. **Суходольский В.Ю.** Altium Designer. Проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 476 с.

13. **Кофанов Ю.Н.** Автоматизированная система АСОНИКА в проектировании радиоэлектронных средств. М., МИЭМ НИУ ВШЭ, 2012. 58 с.

УДК 338

А.С. Микаева, канд. экон. наук
(Московский технологический университет)

bisser@inbox.ru

НЕОБХОДИМОСТЬ ИНТЕГРАЦИИ СТРАТЕГИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ С КОРПОРАТИВНОЙ СТРАТЕГИЕЙ ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Показано, что управление технологическим развитием предприятий приборостроения необходимо осуществлять на основе принципа стратегической интеграции, под которым понимается объединение стратегии технологического развития с корпоративной стратегией предприятия, а также выделяются основные направления совершенствования организации управления технологическим развитием.

Ключевые слова: технологическое развитие; управление технологическим развитием; предприятия приборостроения; стратегия технологического развития; корпоративная стратегия предприятия.

It is shown that the management of the technological development of instrument making enterprises must be carried out on the basis of the strategic integration principle, which is understood as the integration of the strategy of technological development with the corporate strategy of the enterprise. In such a case the main directions for improving the management of technological development are segregated.

Keywords: technological development; management of technological development; instrument making enterprises; strategy of technological development; corporate strategy of the enterprise.

На сегодняшний день перед предприятиями приборостроения, работающими в конкурентных отраслях в условиях неопределённости и риска, стоит проблема поддержания и повышения конкурентоспособности, обеспечения непрерывности развития.

Поскольку современная среда характеризуется высокой динамичностью, предприятия всё чаще сталкиваются с необходимостью проводить различного рода преобразования, вносить изменения в свою деятельность. Возможность развития предприятия определяется его способностью к организационным изменениям в различных сферах своей деятельности, тем самым создавая новые качественные возможности, позволяющие не только сохранить имеющиеся конкурентные позиции, но укрепить и усилить их.

Теория менеджмента выделяет четыре основных типа организационных изменений, обеспечивающих развитие: структурное, технологическое, продуктовое, и изменений, связанных с персоналом.

Все изменения важны, но значимость каждого из них различна.

Согласно современной концепции экономического роста, главным фактором развития становятся технологии, особенно технологические изменения, которые рассматриваются как положительный фактор для предприятия. В свою очередь, технологические изменения приводят к изменению технологического уровня предприятия, к его технологическому развитию.

Под технологическим развитием понимается управляемый процесс технологических изменений на предприятии, результатом которого является создание новых возможностей для хозяйствующего субъекта. Технологическое развитие предприятия представляет собой процесс совершенствования всех технологий, используемых хозяйствующим субъектом для осуществления своей деятельности, т.е. объектами технологического развития являются не только технологии производственного процесса, но и, что не менее важно, управленческие технологии. Технологическое развитие как любой процесс реализуется при наличии определённых ресурсов (внутренних и внешних) и предполагает получение результата, определяемого целями деятельности предприятия. Важным внутренним ресурсом являются собственные исследования и разработки, обеспечивающие создание объектов интеллектуальной собственности [1].

Особое значение технологическое развитие имеет для тех предприятий приборостро-

ения, без продукции которых не обходится производственный процесс ни в одном виде экономической деятельности. Мировая практика свидетельствует о том, что на сегодняшний день предприятия приборостроения играют всё более заметную роль в экономике, а инновационный бизнес становится для них ключевым направлением деятельности [2]. Это требует опережающего технологического развития предприятий приборостроения, без которого роль "технологического локомотива" не может быть эффективно реализована.

Решение вопросов, связанных с технологическим развитием, и привлечение инновационных технологий в современных условиях имеет стратегическое значение. Предприятия, чётко представляющие фактическое состояние и потенциал технологии, могут правильно определить стратегию предприятия, в особенности технологическую, оценить риски, связанные с применением выбранной стратегии. Правильно выбранные технологии составляют основу успешной инновационно-технологической деятельности предприятия и являются фактором долгосрочной конкурентоспособности. В данном аспекте технология всё чаще рассматривается как набор стратегических ресурсов, используемых предприятием в текущей и будущей инновационно-технологической деятельности.

В связи с определяющим влиянием технологического развития на результаты хозяйственной деятельности, а также с его многонаправленностью и большой сложностью важное практическое значение имеет постоянно осуществляемая и сбалансированная по всем элементам система управления предприятием.

Проведённый анализ [3—7] показал, что действующие принципы и способы управления предприятий приборостроения не учитывают темпы появления и распространения технологий инновационного типа и специфику управления технологическим развитием предприятий данной отрасли. В результате потенциал технологического развития используется не в полной мере для повышения конкурентоспособности предприятий приборостроения, а процесс технологического отставания отечественной экономики приобретает необратимый характер.

Устоявшиеся принципы вовлечения новых технологий в хозяйственный оборот свидетельствуют о необходимости их преобразования (так как управление технологическим развитием предприятий приборостроения не может осуществляться старыми традиционными методами) и приведения в соответствие с требованиями внутренней и внешней среды. Наибольшее влияние на принятие управленческих решений по разработке и освоению новых технологий имеют результаты анализа внешней и внутренней среды, в которой функционирует предприятие.

Методология управления технологическим развитием предприятия приборостроения, созданная в период индустриального и постиндустриального уклада экономики, больше не отражает реальную действительность и не является теоретической и практической основой для реализации новшеств в современных условиях.

Решение этой задачи возможно в результате совершенствования существующих методических и методологических подходов к управлению технологическим развитием, которые позволят осваивать новые технологии, а также формирования методического комплекса рекомендаций, направленных на эффективную интеграцию стратегий технологического и корпоративного развития предприятий приборостроения. Процесс принятия решений в научно-технологической сфере предприятий приборостроения необходимо осуществлять на корпоративном уровне, так как посредством интеграции стратегического и технологического менеджмента возможно повысить эффективность управления технологическим развитием.

В связи с этим цели и приоритеты технологического развития необходимо определять в соответствии с общей стратегией предприятия на определённом этапе его функционирования.

Следует обратить внимание, что при внедрении новых технологий в производство существует множество препятствий как внешнего, так и внутреннего характера. Однако при принятии управленческих решений в отношении стратегии технологического развития предприятия приборостроения, а также для постоянного мониторинга и тщательной поддержки её реализации необходимо руководствоваться некоторыми специфическими факторами и микроэкономическими особенностями. А именно тем, что пренебрежение этой важной сферой развития может привести предприятие к технологическому отставанию, а возможно, и к краху всей производственной деятельности.

Как показывает практика, в рыночных условиях предприятиям необходимо каждые

три—пять лет полностью менять продукцию, чтобы оставаться конкурентоспособными и наращивать темпы роста объёма и рентабельности продаж. Также может вызвать проблемы и финансовая составляющая. Например, неполноценное, частичное и несвоевременное финансирование технологического развития предприятия, уже находящегося на этапе реализации продукции, приведёт к временному отставанию или запоздалому выходу нового продукта на рынок. Во избежание возникновения портфельного дисбаланса и нерационального противопоставления краткосрочных сфер вложения капитала [8], с одной стороны, и стратегии технологического развития — с другой, необходимо разработать методы установления интеграционных отношений между ними.

В связи с этим требуется проведение систематического анализа технологических возможностей и их реализации путём эффективного управления технологией, формирования портфеля проектов по созданию и приобретению новых технологий.

Анализ отечественной и зарубежной экономической литературы по вопросам технологического развития [3, 4, 6, 7] позволяет сделать вывод о существенных проблемах современной методологической базы, которые требуют теоретического разрешения для обеспечения долгосрочных конкурентных преимуществ. Среди них следует назвать такие основные направления совершенствования организации управления технологическим развитием, как:

выведение управления технологическим развитием с функционального на корпоративный уровень предприятия;

разработка методических рекомендаций и подходов к формированию технологического развития предприятия на принципах стратегического менеджмента;

учёт типа и масштаба инноваций в процессе разработки, реализации и оценки новых технологий;

установление динамичного соответствия между текущей производственной и перспективной инновационно-технологической деятельностью предприятия.

Выделенные проблемы подтверждают актуальность совершенствования и (или) изменения подходов к основным принципам вовлечения новых технологий в хозяйственный оборот и построению методологии, позволяющей:

описать поэтапный процесс формирования стратегии технологического развития предприятия в условиях трансформации экономической среды через современное определение понятия "технология";

показать внутреннюю природу процессов разработки и реализации различных технологических инноваций на основе корпоративного управления новыми внедряемыми технологиями.

Таким образом, возможность улучшения используемых принципов и методов стратегического управления технологическим развитием предприятия необходимо рассматривать на основе интеграции со стратегическим менеджментом.

Библиографические ссылки

1. **Микаева А.С.** Инструменты разработки стратегии технологического развития предприятий базовых отраслей современной экономики (на примере приборостроения): дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05: защищена 22.10.2013: утв. 10.02.2014. М., 2013. 146 с.

2. **Макаров Ю.Н.** Перспективные технологии приборостроения / Ю.Н. Макаров, А.А. Панич, С.В. Скородумов, Т.К. Шумова, И.М. Ягудин [под общ. ред. А.Ю. Шатракова]. М.: Экономика, 2011. 406 с.

3. **Варфоломеев В.П.** Управление высокотехнологичным производством. М.: Экономика, 2009. 366 с.

4. **Сорокин В.Е.** Механизм управления технологическим развитием промышленного комплекса (на примере промышленных предприятий г. Липецка): дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. М., 2009. 114 с.

5. **Тис Д.Дж., Пизано Г., Шуен Э.** Динамические способности фирмы и стратегическое управление // Вестник С.-Петербургского ун-та. Сер.: "Менеджмент". № 4. 2003. С. 133—170.

6. **Floyd S. — Wolf C.** (2010): 'Technology Strategy' In: Narayanan, V.K. & O'Connor, G.C. (eds.) Encyclopedia of technology and innovation management. West Sussex: Wiley P. 125—128.

7. **Howells J.** The management of innovation and patterns in technological development [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.hba.dk/fsk/pdfs/0003117.pdf (дата обращения: 12.04.2016).

8. **Макарова И.А.** Механизм оптимизации инновационной политики на предприятии [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.hse.ru/data/2012/10/16/1247427912/%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F.pdf (дата обращения: 12.04.2016).

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Демпфирование вибрации на резонансных частотах электротехнических комплексов и систем. *Вестник машиностроения.* 2017. № 1.

Рассмотрены вопросы снижения уровней вибрации энергоёмких электротехнических комплексов, к которым можно отнести единые электростанции автономных мобильных объектов. Приведены результаты исследований амплитудно-частотных спектров входных и выходных вибросигналов газогидравлических виброопор и тросовых виброизоляторов. Установлено, что тросовые виброизоляторы более эффективно гасят ударные нагрузки, а гидравлические виброопоры — длительную вибрацию.

Исследование тепловых характеристик шпиндельных узлов на опорах качения. *Вестник машиностроения.* 2017. № 1.

Расчётно-экспериментальными исследованиями установлены влияния на фрикционные и тепловые характеристики шпиндельного узла таких эксплуатационных показателей, как частота вращения, нагрузка на шпиндель, предварительный натяг в опорах, метод смазывания, вязкость смазочного материала, теплоотдача.

Основные свойства газодинамических покрытий. *Вестник машиностроения.* 2017. № 1.

Исследовано влияние механических и физических характеристик напыляемого металла и технических параметров газодинамического напыления на структуру и свойства получаемого покрытия. Определены прочностные и коррозионные характеристики покрытий алюминия, меди, цинка и никеля.

Исследовательское проектирование в учебном процессе. *Вестник машиностроения.* 2017. № 1.

Рассматривается методика исследовательского проектирования в машиностроении и применение её в учебном процессе для подготовки конструкторов в Петербургском государственном университете путей сообщения.

Совершенствование технологии сушки форм по выплавляемым моделям. *Заготовительные производства в машиностроении.* Том 15. 2017. № 1.

Предложен новый способ сушки керамических форм — непосредственно в ёмкости с кипящим слоем в процессе нанесения зернистого обсыпочного материала за счёт создания объёмно-сжатого состояния и градиента давления воздуха.

Проблема плоского напряжённого состояния в формоизменяющих операциях листовой штамповки. *Заготовительные производства в машиностроении.* Том 15. 2017. № 1.

Рассмотрена проблема плоского напряжённого состояния (объёмное деформированное состояние) при формоизменяющих операциях листовой штамповки без принудительного утонения материала в условиях осевой симметрии деформирования. Показано, что в общем случае уравнения, характеризующие пластическое плоское напряжённое состояние, не приводятся к статически определимой задаче и не могут быть интегрированы с учётом деформационного упрочнения и изменения толщины. Разработана методика анализа указанных операций отображением взаимозависимых полей напряжений и деформаций на девиаторной плоскости цилиндра пластичности Мизеса. Получено общее решение проблемы в параметрической форме с применением теории пластического течения и установлены всевозможные варианты взаимно согласованных схем для напряжений и деформаций.

Влияние сил трения активного действия на напряжённое состояние заготовки при горячем обратном выдавливании полых изделий. *Заготовительные производства в машиностроении.* Том 15. 2017. № 1.

На основе результатов математического моделирования горячего обратного выдавливания полого изделия из сплава АК6 со смазкой заготовки установлено, что активное действие сил трения существенно снижает напряжённое состояние деформируемой заготовки по сравнению с обычным обратным выдавливанием, но не изменяет схему её деформированного состояния.

Решение вопроса обеспечения качества боковых кромок полосы при периодической прокатке. *Заготовительные производства в машиностроении.* Том 15. 2017. № 1.

Приведено конструкторское решение обеспечения качества боковых кромок полосы при периодической прокатке.