

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»



**Международная научно-техническая
конференция**

**АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ**

22–24 октября 2015 г.

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

г. Минск

УДК [658.51:331.103.255+681.5]:005.745(06)

ББК 32/965z73

А 22

Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22-24 октября 2015 г. – М. : БГТУ, 2015. – 298 с.

ISBN 978-985-530-496-9

В материалах конференции обобщены результаты исследований в области автоматического контроля технологических параметров; разработке преобразователей сигналов; систем управления технологическими процессами в химической, нефтеперерабатывающей, деревообрабатывающей промышленности; исследованию и разработке систем автоматического управления; разработке адаптивных, нечетких и нейронных систем управления; фундаментальным методам исследований явлений с использованием статистической теории.

Сборник предназначен для специалистов, работающих в области автоматизации производственных процессов, научных сотрудников, аспирантов и студентов ВУЗов

Рецензенты: зав. кафедрой методов оптимального управления БГУ, профессор, д-р физ.-мат. наук А.И. Калинин
проректор по научной работе БГУИР, профессор, д-р техн. наук А.П. Кузнецов

Редакционная коллегия:

Главный редактор профессор И.М. Жарский

Члены редколлегии: канд. техн. наук Д.С. Карпович
 профессор, д-р физ.-мат. наук И.И. Наркевич
 профессор, д-р физ.-мат. наук В.М. Марченко

ISBN 978-985-530-496-9

Ó УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2015

Достижения в области математики, физики, кибернетики, электротехники, развитие средств вычислительной техники, информационных технологий существенно расширяют возможности создания высокоэффективных производственных процессов и методов управления ими.

В планах развития технологий производства и технологий управления на базе Белорусского государственного технологического университета в г. Минске проведена очередная (предыдущая состоялась в 2012 г.) Международная научно-техническая конференция.

На секциях представлены научные доклады ученых из различных регионов Республики Беларусь, Российской Федерации и других стран.

Тематика представленных научно-исследовательских работ весьма обширна и посвящена разработке элементов, систем автоматического контроля технологических параметров на основе пленочных интегральных газочувствительных устройств, на основе ядерного магнитного резонанса, электромагнитной расходомерии; разработке преобразователей сигналов и средств обработки сигналов; исследованию и разработке линейных и нелинейных детерминированных систем автоматического управления на основе структурно-параметрического синтеза; разработке адаптивных систем управления, систем управления электроприводами промышленных механизмов и манипуляторов; систем управления технологическими процессами в химической, нефтеперерабатывающей, деревообрабатывающей промышленности; разработке моделей математическими методами анализа, а также информационному обеспечению АСУ и АСУТП.

Представленные материалы направлены на повышение дальнейших научных исследований, связанных с разработкой новых эффективных технологий в различных отраслях промышленности.

Материалы данной конференции представлены в настоящем сборнике.

ОРГКОМИТЕТ

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель

Дормешкин О.Б. – проректор по научной работе, д-р техн. наук

Зам. председателя

Карпович Д.С. – зав. кафедрой АППиЭ, канд. техн. наук

Члены оргкомитета

Кирилова Ф.М. – гл. науч. сотр. Института математики НАН Беларуси, член-кор. НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук (г. Минск);

Š. Paulikas – декан ф-та электроники Вильнюсского технического университета, (г. Вильнюс, Литва);

J. Kurek – зав. каф. автоматики Варшавской политехники (г. Варшава, Польша);

V. Meparishvili – профессор кафедры информационных систем управления Грузинского технического университета (г. Тбилиси, Грузия);

З. Бартосевич – зав. кафедрой математики Белостокского технического университета, проф., доктор наук (г. Белосток, Польша);

Б. Шкляр – профессор Холонского технического университета, доктор наук (г. Холон, Израиль);

М. Малабр – директор Института кибернетики и коммуникаций, проф, доктор наук (г. Нант, Франция);

Ж.-Ж. Луазо – директор лаборатории дискретных систем Института кибернетики и коммуникаций, проф., доктор наук (г. Нант, Франция);

Кузнецов А.П. – проректор по научной работе БГУИР, проф., д-р техн. наук (г. Минск);

Гульков Г.И. – зав. кафедрой ЭиАПУ БНТУ, доц., канд. техн. наук (г. Минск);

Григорьев Л.И. – зав. кафедрой АСУ РГУ нефти и газа, профессор (г. Москва);

Попадько В.Е. – декан факультета АиВТ РГУ нефти и газа, проф., д-р техн. наук (г. Москва);

Кишкурно В.В. – зам. гл. инженера ОАО «Светлогорский ЦКК»;

Урбанович П.П. – зав. кафедрой информационных систем и технологий БГТУ, проф., д-р техн. наук;

Марченко В.М. – профессор кафедры высшей математики БГТУ, проф., д-р физ.-мат. наук;

Наркевич И.И. – профессор кафедры физики БГТУ, проф., д-р физ.-мат. наук;

Черник Е.О. – зав. сектором ИиВОНД.

СЕКЦИЯ № 1
ЭЛЕМЕНТЫ, СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И МЕТРОЛОГИИ

Председатель – канд. техн. наук, доцент
Оробей Игорь Олегович
Секретарь – канд. техн. наук, доцент Сарока Виктор Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ СРЕДСТВ
НЕКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ МИКРОДВИЖЕНИЙ**

Одной из важнейших задач, системы физической защиты объектов, является своевременное обнаружение несанкционированных действий. Для технической поддержки действий по обеспечению физической защиты применяется комплекс технических средств физической защиты (далее-ТСФЗ), который включает в себя различные виды технических средств охраны.

Все задачи защиты можно решить только силами вооруженной охраны, без технической поддержки. Однако в этом случае силы охраны должны иметь очень большую численность.

В современных технических средствах охраны (далее-ТСО) (не считая простейших магнитных контактов) сигнал с приёмника, антенной системы или чувствительного элемента обрабатывается. Если сигнал удовлетворяет установленным критериям – ТСО срабатывает и подаёт сигнал тревоги.

Критерии срабатывания закладываются в алгоритм обработки, они рассчитаны на выделение характерных именно для движения человека изменений сигнала.

Микродвижения определяются предельно малыми значениями параметров, которые сведены в таблице 1. Диапазон частот колебательных микродвижений (микровибрации) охватывает широкий спектр от долей герца до 20-50 кГц.

Таблица 1 - Значения параметров микродвижений

Параметр	Единица измерения	Диапазон значений
Поступательное перемещение	мкм	$10^{-2} - 10^3$
Поступательная скорость	м/с	$10^{-9} - 10^{-4}$
Поступательное ускорение	м/с ²	$10^{-6} - 10^{-2}$
Угловое перемещение	рад	$10^{-6} - 10^{-4}$
Угловая скорость	рад/с	$10^{-5} - 10^{-3}$
Угловое ускорение	рад/с ²	$10^{-4} - 10^{-2}$

Емкостные преобразователи нашли широкое применение при решении различных задач неконтактного контроля микродвижений. К числу достоинств емкостных преобразователей относятся простота, малые габариты и масса, малая инерционность и незначительное обратное воздействие на объект контроля.

Исключительная возможность модификации чувствительного элемента емкостных преобразователей, в качестве которого может использоваться любое электропроводящее тело, простота создания объемной зоны чувствительности весьма больших размеров и заданной конфигурации делают особенно целесообразными разработки преобразователей с неэкранированным чувствительным элементом для контроля микродвижений активным методом в открытой среде и в труднодоступных местах.



Рисунок 1 – Вариант установки емкостного средства обнаружения

На основе емкостного принципа преобразования микродвижений в нашей стране и за рубежом непрерывно развиваются технические средства охраны, устанавливаемые как внутри помещений, так и на периметрах охраняемых объектов. При этом повышенное внимание уделяется вопросам повышения устойчивости емкостных устройств, размещаемых на открытом пространстве и подвергающихся воздействию электрических помех и различных климатических факторов. В частности, осадки или увеличение влажности воздуха могут оказывать большое влияние на места крепления проводов чувствительного элемента, снижая чувствительность емкостного преобразователя и вызывая ложные сигналы тревоги в системе охраны. Электромагнитные поля от посторонних источников воздействуют на приемный электрод неэкранированного чувствительного элемента как на приемную радиоантенну, вызывая паразитную модуляцию электрического сигнала, индуцируемого генераторным электродом.

В настоящее время периметры охраняемых объектов оборудуются емкостными датчиками обнаружения «Медуза», «Радан-14 (15)», «Микрос-101» и другими. Датчики подключаются к антенному

устройству состоящему из двух флангов равной длины от 10 до 500 м каждый с максимальной емкостью не более 12000 пФ и имеющих разброс емкостей флангов антенного устройства не более чем на 10% относительно друг друга. Зачастую на практике мы сталкиваемся с разницей по емкости антенных плечи более 10 %. Для решения данной задачи емкостное полотно можно рассматривать как плоский конденсатор.

Емкость конденсатора определяется по формуле:

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (1)$$

где ε_r - диэлектрическая проницаемость вещества между обкладками; ε_0 - электрическая постоянная; S - площадь обкладок конденсатора; d - расстояние между обкладками.

$$\varepsilon_0 \stackrel{def}{=} \frac{1}{4\pi c^2 \times 10^{-7}} = \frac{1}{\mu_0 c^2} \approx 8,854187817 \times 10^{-12}, \quad (2)$$

для воздуха $\varepsilon_r = 1,0005898 \pm 0,00000050$.

Из формулы видно, что емкость регулируется двумя способами:

- увеличение (уменьшение) площади конденсатора.
- изменение расстояние между обкладками конденсатора.

На данный момент в практике применяется первый способ, изменение площади антенного устройства путем провязки нитей антенного устройства. Для того чтобы реализовать второй способ регулировки емкостного полотна, предлагается использовать антенные опоры конструкции представленной на рис.2.

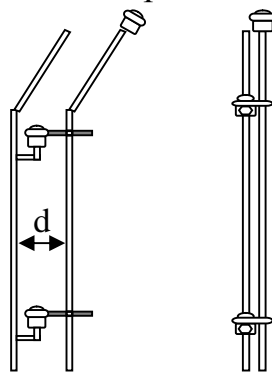


Рисунок 2 – Вариант регулируемой антенной опоры

Отличие от существующего варианта исполнения заключается в креплении. Предлагаемое крепление (рис.3) позволит регулировать расстояние d между земельными и антенными плоскостями, тем самым регулировать емкость плеч емкостного полотна.

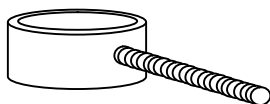


Рисунок 3 – Регулируемое крепление

Использование регулируемых антенных опор на периметре объектов позволит производить по месту точную настройку симметрии емкости антенного полотна. При точной настройке емкостного полотна, исключается применение «подстроечного» конденсатора, тем самым повышается стабильность работы емкостных датчиков обнаружения. При использовании регулируемых креплений, замена изоляторов непригодных к использованию производится с наименьшими трудозатратами.

ЛИТЕРАТУРА

1. "Безопасность Окружающей Среды" №3-2007: Безопасность ядерных и радиационных объектов. Севрюков Д.В., Асфандияров А.Х. , – М.: Вымпел. – 2012, – 121с
2. <http://vi.elsys.ru/storage/nto.pdf>
3. Магауенов Р.Г. Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения: Учебное пособие. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2007- 367с.

УДК 004.272.44

Р.А. Шуленков, магистрант
(БГТУ, г. Минск)

ТАКТИРОВАНИЕ, СИНХРОНИЗАЦИЯ И ФАПЧ ПРОЦЕССОРА

Тактирование и синхронизация - это основные элементы работы любого процессора (микроконтроллера и микропроцессора). Работа тактирования начинается с работы одного из следующих компонентов внутреннего или внешнего калибруемого RC-генератора, внешнего кварцевого резонатора или внешнего керамического резонатора. Тактирование: с сопровождением данных сигналами тактирования, с выработкой сигналов тактирования приемников. Проблема расфазирования тактовых импульсов для быстродействующих ЦПУ (центральное процессорное устройство) актуальна, что на современные БИС/СБИС (большие интегральные схемы/сверх большие интегральные схемы) устанавливаются специальные модули, улучшающие синфазность тактовых сигналов в различных областях схем и при необходимости выполняющими и преобразования частоты (умножение, деление).

Для фазирования (коррекции) тактовых импульсов используют PLL (Phase Locked Loop), FLL (Frequency Locked Loop), DLL (Delay Locked Loop), DCM (Digital Clock Manager). Наибольшее распространение получила система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ, PLL). Следует отметить, что PLL, по крайней мере, в реализуемых сейчас вариантах, - аналоговые устройства. Действительно, компенсируемый сдвиг фазы синхросигналов может иметь любое значение (является непрерывной величиной), поэтому и система его точной отработки должна работать в аналоговом режиме. С этой точки зрения PLL трудны для реализации. Являясь замкнутыми нелинейными системами, PLL могут оказаться неустойчивыми, что требует их для обеспечения надежной устойчивой работы во всем диапазоне изменения температуры и других воздействий[1].

Системы фазовой автоподстройки частоты представляют собой схемы с отрицательной обратной связью, которые состоят из генератора, управляемого напряжением (VCO) и фазового компаратора, которые включаются таким образом, что генератор поддерживает постоянный угол фазы по отношению к опорному сигналу. ФАПЧ может использоваться, например, для создания выходного сигнала со стабильной частотой из низкочастотного сигнала фиксированной частоты[2].

В ФАПЧ сигнал рассогласования от фазового компаратора пропорционален разности фаз между сигналом на входе и сигналом в цепи обратной связи. Среднее значение сигнала на выходе фазового детектора будет оставаться постоянным в том случае, если входной сигнал в цепи обратной связи будет иметь одинаковую частоту.

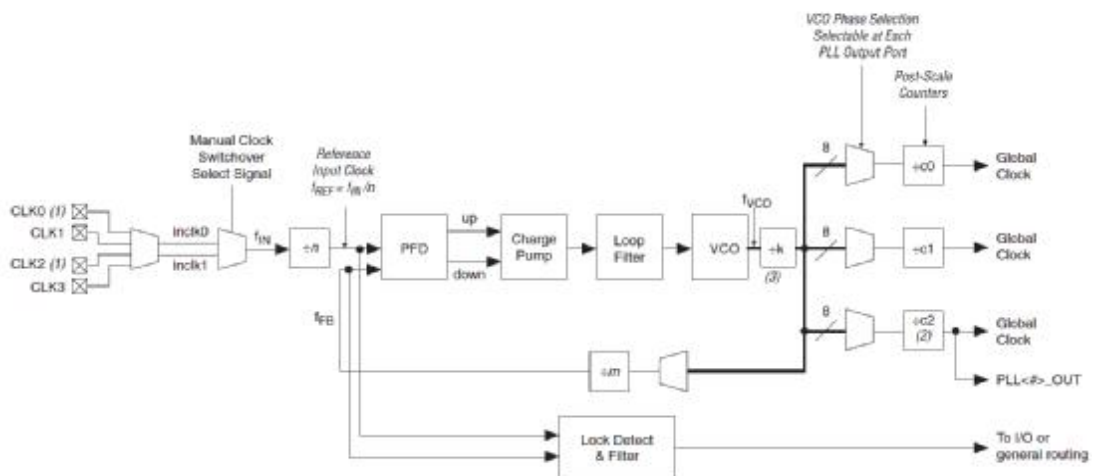


Рисунок 1 – Базовая PLL архитектура (Altera Cyclone II)

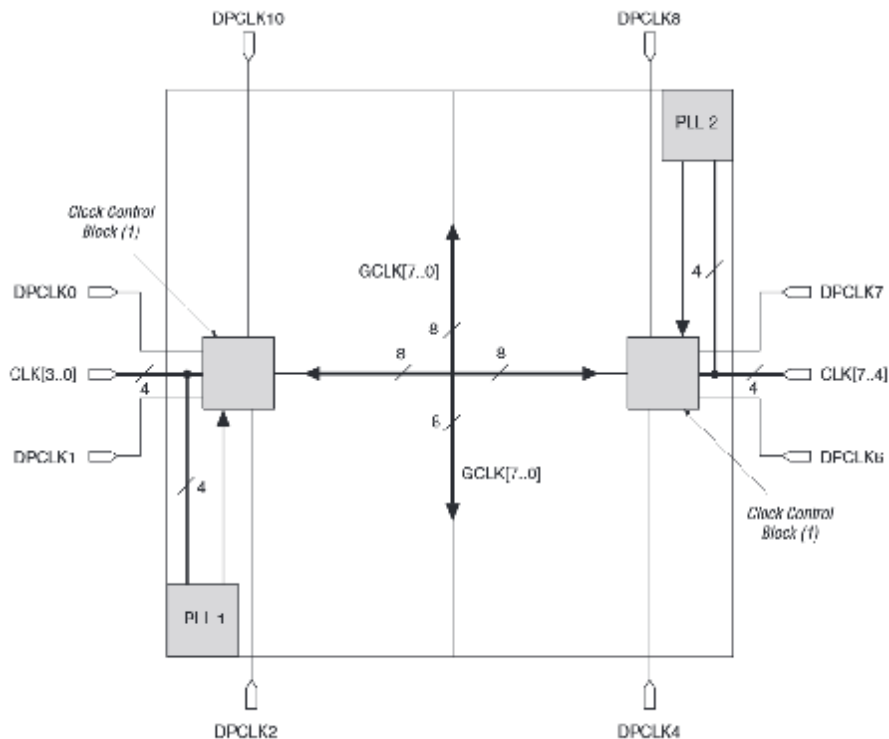


Рисунок 2 – Блок управления частотой (Altera Cyclone II)

Рассмотрим построение системы тактирования процессора на базе FPGA (Field-Programmable Gate Array - программируемая пользователем вентильная матрица) Altera Cyclone II EP2C5T144. Характеристика тактирования, данного FPGA: 2 области PLLs, 8 CLK выводов, 20 DPCLK выводов, 16 глобальных линий тактирования[3].

Каждый микроконтроллер имеет свою уникальную структуру внутреннего тактирования. Например, система тактирования STM32F756NGHx (ARM Cortex M7) имеет отдельные линии тактирования для LCD-TFT, USB и I2S. Внутренняя структура наполнения большим количеством делителей и умножителей, последнее является характерной чертой для АНВ (Advanced High-performance Bus) – APB (Advanced Peripheral Bus) моста. АНВ – APB – мост между шинами АНВ и APB; используется для подключения различных APB – устройств, таких как компоненты отладки, к шине встроенных периферийных устройств процессора ARM. Кроме того, конструкция процессора позволяет производителям микросхем подключать дополнительные APB – устройства к внешней шине встроенных периферийных устройств (PPB - Private Peripheral Bus) с помощью этой шины[4].

Формирование спецификации системы тактирования разрабатывается на языках проектирования цифровой аппаратуры VHDL, Verilog, SystemVerilog. Далее создается функциональное описание работы системы тактирования для будущей микросхемы и происходит верификация. Современные микросхемы часто называются системами

на кристалле (SoC) и содержат множество различных блоков, работающих параллельно и взаимодействующих между собой. Это сложное устройство, которое требует детальной проверки на правильность функционирования и отсутствие ошибок в проектном описании. Под проверкой подразумевается разработка детального плана и среды верификации на языке SystemVerilog с использованием методологии UVM (Universal Verification Methodology), её отладка, написание тестов, создание программной модели по спецификации, подготовка скриптов компиляции и запуска среды, скриптов анализа результатов множественных запусков. Верификация проекта цифровой интегральной схемы (ИС) — один из самых затратных по времени этапов разработки. Для достижения достаточной полноты проверки необходимо провести моделирование на большом наборе тестов и, если выявлены ошибки, после корректировки необходимо весь процесс моделирования повторить.

Формирование системы тактирования для архитектуры процессора произведем, используя Quartus II для FPGA и CPLD (complex Programmable Logic Device). Блок Altera Phase-Locked Loop (ALTPLL) использует внутренний PLL в связке с умножителями и делителями.

На вход PLL подается входная частота опорного генератора F_{in} . Далее на счетчике n опорная частота делится и получается иная частота F_{ref} , которая поступает на фазовый детектор PFD (phase-frequency detector). Фазовый детектор сравнивает фазы частот F_{ref} и той, что поступает с делителя m . Разность фаз, фильтруется и управляет генератором VCO. На выходе управляемого генератора - новая частота F_{vco} . Фазовый детектор подает управляющее воздействие на генератор VCO до тех пор, пока не выполнится условие $F_{ref} = F_{vco}/m$. При этом условия частоты, подаваемые на детектор фаз равны. Таким образом, например, если $m=2$, то частота генератора VCO должна получиться в 2 раза выше частоты F_{ref} . Последний этап - частота F_{vco} делится на выходном счетчике k . Подбирая коэффициенты n, m, k можно синтезировать довольно большой диапазон частот. Более сложные компоненты PLL позволяют перезагружать коэффициенты в процессе работы системы.

Блок Altera Phase-Locked Loop

<pre> LIBRARY ieee; USE ieee.std_logic_1164.all; LIBRARY altera_mf; USE altera_mf.all; ENTITY PLL IS PORT (inclk0 : IN STD_LOGIC := '0'; </pre>	<pre> BEGIN sub_wire4_bv(0 DOWNT0 0) <= "0"; sub_wire4 <= To_stdlogicvector(sub_wire4_bv); sub_wire1 <= sub_wire0(0); c0 <= sub_wire1; sub_wire2 <= inclk0; sub_wire3 <= sub_wire4(0 </pre>
--	--

<pre> c0 : OUT STD_LOGIC); END PLL; ARCHITECTURE SYN OF pll IS SIGNAL sub_wire0 : STD_LOGIC_VECTOR (5 DOWNTO 0); SIGNAL sub_wire1 : STD_LOGIC ; SIGNAL sub_wire2 : STD_LOGIC ; SIGNAL sub_wire3 : STD_LOGIC_VECTOR (1 DOWNTO 0); SIGNAL sub_wire4_bv : BIT_VECTOR (0 DOWNTO 0); SIGNAL sub_wire4 : STD_LOGIC_VECTOR (0 DOWNTO 0); COMPONENT altpll GENERIC (clk0_divide_by : NATURAL; clk0_duty_cycle : NATURAL; clk0_multiply_by : NATURAL; clk0_phase_shift : STRING; compensate_clock : STRING; inclk0_input_frequency : NATURAL; intended_device_family : STRING; lpm_hint : STRING; lpm_type : STRING; operation_mode : STRING; port_activeclock : STRING; port_areset : STRING; port_clkbad0 : STRING; port_clkbad1 : STRING; port_clkloss : STRING; port_clkswitch </pre>	<pre> DOWNTO 0) & sub_wire2; altpll_component : altpll GENERIC MAP (clk0_divide_by => 3, clk0_duty_cycle => 50, clk0_multiply_by => 2, clk0_phase_shift => "0", compensate_clock => "CLK0", inclk0_input_frequency => 20000, intend- ed_device_family => "Cyclone II", lpm_hint => "CBX_MODULE_PREFIX=PLL", lpm_type => "altpll", operation_mode => "NORMAL", port_activeclock => "PORT_UNUSED", port_areset => "PORT_UNUSED", port_clkbad0 => "PORT_UNUSED", port_clkbad1 => "PORT_UNUSED", port_clkloss => "PORT_UNUSED", port_clkswitch => "PORT_UNUSED", port_configupdate => "PORT_UNUSED", port_fbin => "PORT_UNUSED", port_inclk0 => "PORT_USED", port_inclk1 => "PORT_UNUSED", port_locked => "PORT_UNUSED", port_pfdena => "PORT_UNUSED", port_phasecounterselect => "PORT_UNUSED", port_phasedone => "PORT_UNUSED", </pre>
--	---

STRING;			port_phasestep	=>
	port_configupdate	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_phaseupdown	=>
	port_fbin	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_pllena	=>
	port_inclk0	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_scanaclr	=>
	port_inclk1	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_scanclk	=>
	port_locked	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_scanclkena	=>
	port_pfdena	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_scandata	=>
	port_phasecounterselect	:	"PORT_UNUSED",	
	: STRING;		port_scandataout	=>
	port_phasedone	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_scandone	=>
	port_phasestep	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_scanread	=>
	port_phaseupdown	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_scanwrite	=>
	port_pllena	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_clk0	=>
	port_scanaclr	:	"PORT_USED",	
STRING;			port_clk1	=>
	port_scanclk	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_clk2	=>
	port_scanclkena	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_clk3	=>
	port_scandata	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_clk4	=>
	port_scandataout	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_clk5	=>
	port_scandone	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_clkena0	=>
	port_scanread	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_clkena1	=>
	port_scanwrite	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_clkena2	=>
	port_clk0	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_clkena3	=>
	port_clk1	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_clkena4	=>
	port_clk2	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_clkena5	=>
	port_clk3	:	"PORT_UNUSED",	
STRING;			port_extclk0	=>
	port_clk4	:	"PORT_UNUSED",	

STRING;	port_clk5	:	port_extclk1 =>
STRING;	port_clkena0	:	"PORT_UNUSED",
STRING;	port_clkena1	:	port_extclk2 =>
STRING;	port_clkena2	:	"PORT_UNUSED",
STRING;	port_clkena3	:	port_extclk3 =>
STRING;	port_clkena4	:	"PORT_UNUSED"
STRING;	port_clkena5	:)
STRING;	port_extclk0	:	PORT MAP (
STRING;	port_extclk1	:	inclk => sub_wire3,
STRING;	port_extclk2	:	clk => sub_wire0
STRING;	port_extclk3	:);
STRING			END SYN;
);			
PORT (
clk	:	OUT	
STD_LOGIC_VECTOR (5 DOWNT0 0);			
inclk	:	IN	
STD_LOGIC_VECTOR (1 DOWNT0 0)			
);			
END COMPONENT;			

Созданный блок тактирования является основой работы любой архитектуры процессора, дальнейшее формирование частоты реализуется для работы внутренних шин процессора и внутренней периферии (UART/USART, SPI, I2C, SDIO и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Цифровая схемотехника, Евгений Угрюмов, 2010
2. Линейные схемы. Руководство по проектированию, 2011
3. Старт ПЛИС-ы. Первая ласточка (mci.by)
4. Ядро Cortex-M3 компании ARM, Ю. Джозеф, 2015

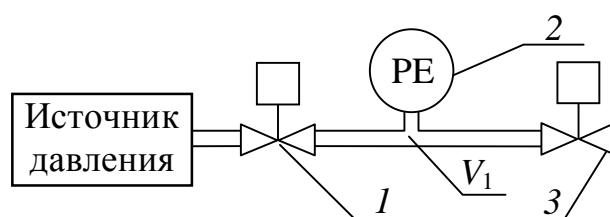
И.Г. Сухорукова, ассист.,
 Д.А. Гринюк, канд. техн. наук,
 И.О. Оробей, канд. техн. наук;
 (БГТУ, г. Минск)

АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

Существует около 30 различных методов испытаний на герметичность [1-3]. Технологические испытания на герметичность занимают не последнее место в комплексе разнообразных испытаний изделий, проводимых для обеспечения качества создаваемой продукции. Энергетические, экологические, социальные и технологические аспекты диктуют для современных производств повышение требований к точности оценки герметичности. Как следствие, происходит постоянное развитие методов и устройств испытания изделий на герметичность для удовлетворения потребностей рынка.

Задача испытаний состоит в экспериментальной проверке объекта при действии или моделировании эксплуатационных нагрузок, возникающих внутри трубопровода. Согласно ГОСТ 9544–2005, испытания ведутся при нормальной температуре с соблюдением условий безопасности. Установив давление, равное испытательному, объект подвергают избыточному давлению на регламентированное время.

С учетом технических требований авторами был разработан ряд приборов [4]. Из этого ряда наиболее используемым является прибор на линии высокого давления (рис. 1).



1 – регулятор задающего давления; 2 – преобразователь давления;
 3 – тестируемый вентиль (задвижка)

**Рисунок 1 – Схема измерения протечек с чувствительным элементом
 в линии высокого давления**

Устройство работает следующим образом. Регулятором 1 устанавливается необходимое давление испытания, после чего отслеживается градиент изменения давления в объеме V_1 , возникающий из-за протечек в вентиле 3. Высокая чувствительность обеспечивается при

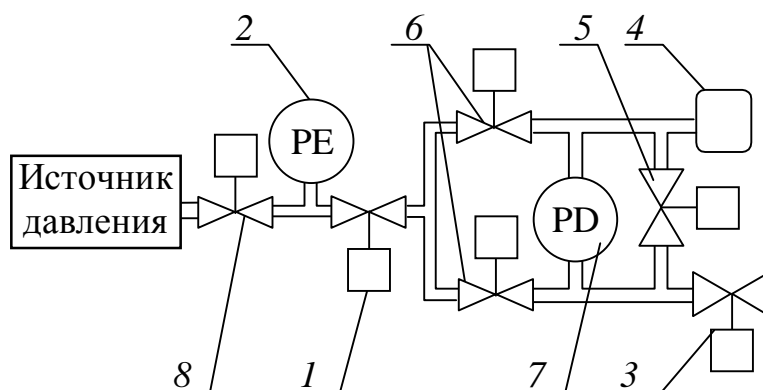
точном определении объема V_1 в линии высокого давления. Расчетное значение протечки V_0 за время Δt находят из выражения:

$$V_0 = \frac{V_1}{P_0} (P_1 - \Delta P), \quad (1)$$

где P_0 – атмосферное давление; P_1 – начальное давление в линии высокого давления; ΔP – уменьшение давления за время Δt .

Поскольку V_1 напрямую влияет на точность метода, а запорная арматура имеет сложную геометрию и большое разнообразие, то метод требует доработки. Как вариант, использование дифференциальной схемы, представленной на рис. 2 [2], состоит в оценке величины протечки по разности давления между линиями с эталонной и тестируемой арматурой.

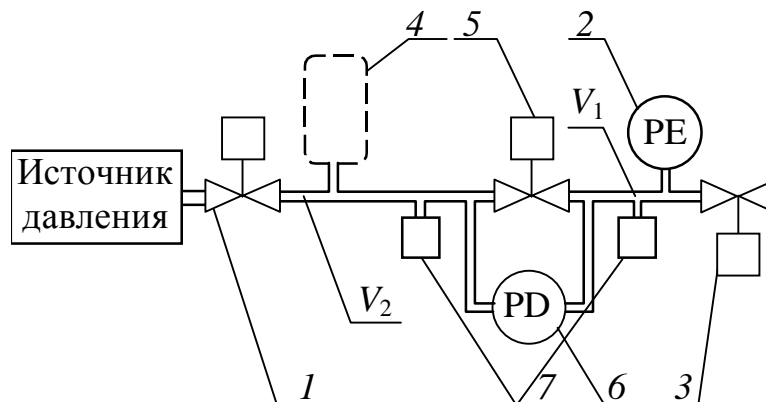
В то же время схема на рис. 2, насыщена большим количеством арматуры, что требует постоянного контроля за ее состоянием и увеличивает вероятность вносимых ею искажений в процесс измерений, к тому же она удобна только при наличии большого количества клапанов с одним типоразмером.



1 – регулятор задающего давления; 2 – преобразователь давления; 3 – тестируемый вентиль (задвижка); 4 – дополнительный объем или сравнительный вентиль (master); 5 – управляемый уравнивающий клапан; 6 – изолирующие клапаны линий; 7 – датчик перепада давления; 8 – регулятор задающего давления

Рисунок 2 – Схема установки измерения протечки с использованием дифференциальной схемы с эталоном

Повысить чувствительность схемы на рис. 1 до уровня или выше схемы на рис. 2 можно путем определения объема V_1 при каждом тестировании запорной арматуры. Для этого используем симметричное (или компенсационное) детерминированное активное воздействие на два объема V_1 и V_2 с определенным заранее V_2 . Один из вариантов такой установки представлен на рис. 3.



1 – регулятор задающего давления; 2 – преобразователь давления; 3 – тестируемый вентиль (задвижка); 4 – дополнительный объем; 5 – дополнительный клапан управления; 6 – преобразователь перепада давления; 7 – источники синхронного воздействия на объемы

Рисунок 3 – Модификация схемы, приведенной на рис. 1, для определения объема V_1

Динамическое управление клапаном 5 (рис. 3) в процессе испытания вместе с дифференциальным датчиком перепада давления позволяет получить существенный выигрыш в чувствительности по сравнению с использованием анализа тренда DP датчика избыточного давления (схема на рис. 1) за счет прямого измерения DP отдельным измерительным прибором (позиция 6, рис. 3) с более узким диапазоном измерения.

Работа схемы предполагает установку необходимого тестируемого давления по датчику 2 при открытом клапане 5. После чего происходит закрытие клапана 1. С началом тестирования осуществляется закрытие клапана 5. В случае резкого увеличения перепада давления при некотором значении происходит уравнивание давлений и повторное закрытие клапана 5. Данная процедура может быть повторена несколько раз в течение одного цикла процесса диагностики запорной арматуры. Для пересчета спада давления в величину протечки через объем свободного пространства между клапаном и запорной арматуры предлагается в начале измерения осуществить синхронное воздействие на объемы V_1 и V_2 . Возникший импульс перепада давления на закрытом клапане 5 будет пропорционален разности в объемах.

Чувствительность датчика можно выбирать максимальной, исходя из минимальных протечек, которые будут контролироваться на данном стенде испытания. Если сигнал с датчика перепада давления будет достигать максимального значения, можно будет снова уравнивать давления в областях V_1 и V_2 путем открытия клапана 5, а затем снова его закрыть и фиксировать перепад давления. Тем самым будет

осуществляться преобразование перепада давления в интервал времени, который обладает интегральной характеристикой протечки и фиксируется с большей точностью современными измерительными средствами, построенными на микропроцессорах.

Поскольку для интерпретации перепада давления в величину протечки следует знать точное значение объема воздуха V_1 , то предлагается для его определения использовать активную схему определения. Наилучшим решением для этого будет одновременное незначительное механическое изменение объемов до и после клапанов с помощью электродвигателей через редукторы. Давление на закрытом клапане будет изменяться пропорционально в зависимости от отличий объемов. Для исключения переходных явлений изменять объемы до и после клапана можно по рассчитанным законам с плавным изменением и временными выдержками для устранения влияния переходных процессов. Возможна и компенсационная схема перепада давления в скользящем режиме за счет изменений объемов и пересчет в протечку за счет энкодеров на валах двигателей. Данное решение обладает возможностями варьирования алгоритмов движения для обеспечения высокой точности измерения. Одним из самых простых воздействий является тепловое воздействие на воздух. Его можно осуществить нагревателями или мощными инфракрасными диодами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухорукова И. Г. Анализ методов измерения герметичности конструкций для автоматического испытания запорной арматуры // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. 2009. Вып. XVII. С. 125–129.

2. The United States Patent and Trademark Office: <http://patft.uspto.gov/> (accessed 25.01.2015) Leak rate measuring device: pat. 7331216 USA, G01M 3/20 (20060101) / L. Gerdau, R. Rolff, R. Kilian; Assignee Inficon GmbH. № 10/558,164; appl. 12.10.2004; filed 19.01.2008.

3. The United States Patent and Trademark Office: <http://patft.uspto.gov/> (accessed 25.01.2015) System and method for utility metering and leak detection: pat. 7412876 USA, IPC (20060101) G01M 3/02 (20060101) / L. Kates; Assignee Corona Del Mar. № 11/761760; appl. 16.12.2007; filed 19.08.2008.

4. Гринюк Д. А., Оробей И. О., Сухорукова И. Г. Приборы измерения утечек запорной арматуры // Материалы, технологии, инструменты. 2009. № 4. С. 107–111.

Д.А. Гринюк, канд. техн. наук,
Н.М. Олиферович, ассист.,
И.О. Оробей, канд. техн. наук;
(БГТУ, г. Минск)

АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИКИ КРУГОВОЙ ПРОПИТКИ

Решение задач построения систем водоподготовки невозможно без информационного обеспечения. С этой целью строят развернутые системы, которые состоят из десятков датчиков на каждой стадии обработки. При поиске оптимальных режимов используют как информацию непрерывных датчиков, так и результаты периодического лабораторного анализа. Этот комплекс параметров вместе с наработками информационных систем позволяет оптимальный режим работы оборудования. Одним из параметров экспресс-контроля является время капиллярного впитывания [1].

Результаты измерений [2] динамики пропитки показали, что в используемой бумаге могут наблюдаться паразитивные процессы гидратации, которые, в свою очередь, способны исказить результаты даже точного измерения величин емкости и полученные путем пересчета значений координат.

Одним из решений по компенсации изменения свойств бумаги при взаимодействии с водой может быть использование геометрически неоднородного конденсатора, который способен по резким изменениям скорости идентифицировать координату. Применение различных критериев нестационарности трендов является одним из методов идентификации. На рис. 1 приведено несколько вариантов геометрии неоднородного конденсатора, где белые полосы соответствуют слою металлизации, а черные – его отсутствию. Кольца могут отличаться размерами как линейно с различной толщиной полос без металлизации, так и по нелинейному закону, обратному динамике пропитке.

Толщина как металлизированных, так и неметаллизированных полос зависит от неоднородности пропитки и точности измерения емкости конденсатора во время пропитки и может быть точно подобрана в процессе отладки прибора.

Наиболее простые варианты построения измерительного преобразователя параметра времени капиллярного впитывания на мультивибраторной и резонансной схемах показали неустойчивую работу из-за изменения соотношения емкости и сопротивления схемы замещения в процессе динамики пропитки. Дальнейшие исследования по

получению схемы замещения позволили определить, что желательные значения частот измерительного преобразователя находятся в диапазоне от 10^5 Гц и выше. Кроме того, измерительная схема должна быть способна перенастраивать измерительный канал ввиду падения полного сопротивления с начала измерения от нескольких МОм до сотни Ом.

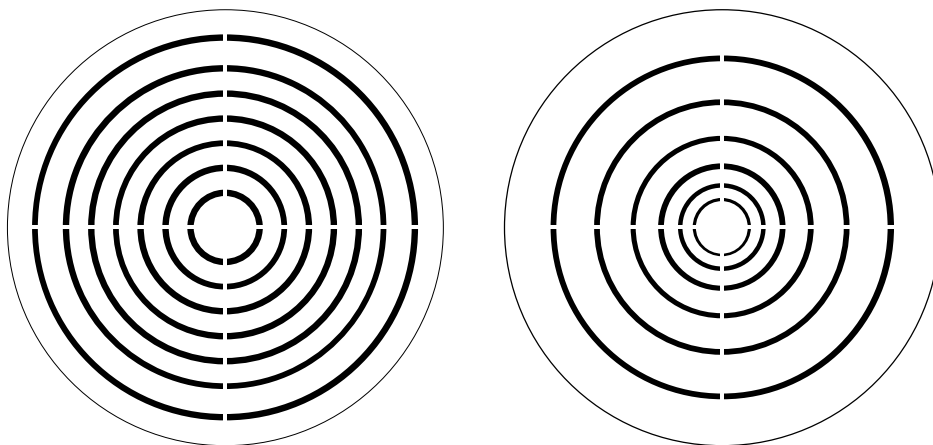


Рисунок 1 – Различные решения по построению геометрически неоднородного конденсатора

С учетом полученных выводов гарантированным вариантом является использование принципа построения измерительного преобразователя с определением полного сопротивления на квадратурном демодуляторе [4]. Адаптивная схема преобразователя должна быть построена на достаточно быстродействующем и мощном микроконтроллере. С учетом данного требования выбран STM32F407 [5]. Его особенностью является наличие встроенных аналогово-цифровых (ADC) и цифроаналоговых преобразователей (DAC) и работа на частоте 168 МГц.

Квадратурный демодулятор можно построить на аналоговом принципе, используя цифровые преобразования на Field-Programmable Gate Array (FPGA) матрице (рис. 2) или быстрое преобразование Фурье непосредственно в микроконтроллере.

Предлагаемые в литературе решения предусматривают формирование контроллером тестового сигнала с преобразованием его в источник тока, измерение напряжения исследуемого участка цепи, преобразование его величины с помощью ADC в цифровую форму и дальнейшее осуществление быстрого преобразования Фурье. Однако для нашего случая препятствием для построения измерителя на таком принципе является требование высокой частоты, на которой необходимо производить измерения. И, несмотря на высокую частоту

ту процессора 168 МГц, нет гарантий реализации преобразователя, поскольку контроллер должен обрабатывать одновременно сигналы с ADC и формировать сигнал через DAC на первичный преобразователь, осуществлять перенастройку усилительных схем и выполнять быстрое преобразование Фурье. По предварительным расчетам рабочую частоту измерения не удастся поднять до 150 кГц.

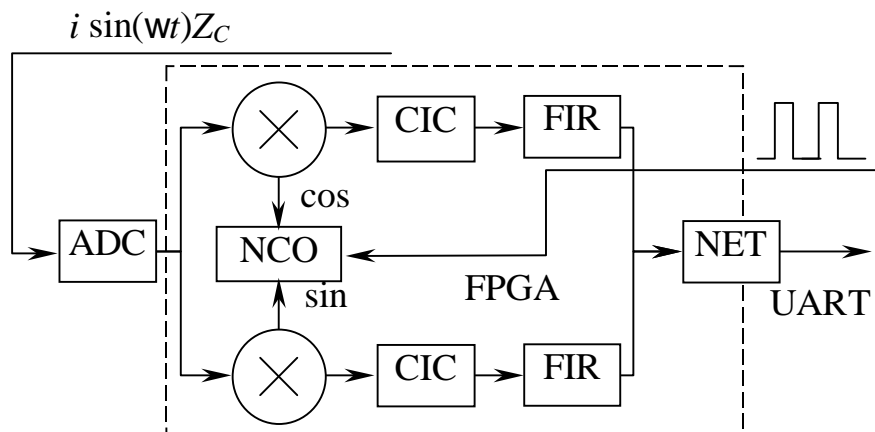


Рисунок 2 – Общая структура цифрового квадратурного демодулятора на FPGA: CIC (cascaded integrator-comb) и FIR (finite impulse response) – компоненты программирования для создания фильтров; NCO (numerically controlled oscillators) – цифровой управляемый генератор

Узким местом является и быстродействие встроенных ADC и DAC. Их характеристики не позволят поднять сигнал измерения выше 500 кГц.

Использование преобразования по схеме рис. 2 в аналоговом виде тоже не является идеальным вариантом. Несмотря на возможность использования для формирования функций \cos и \sin двух встроенных DAC, абсолютную идентичность получить невозможно по причине того, что формируются сигналы от 0 до 3,6 В и возникает необходимость убирать постоянную составляющую сигналов с применением схем на основе аналоговых элементов и конденсаторов. Аналогично не существует идеальных операционных усилителей. Будет присутствовать разница в амплитудах и отличие в фазе 90° . Можно добавить неидентичность аналоговых перемножителей, амплитудно-частотной и фазовой характеристик аналоговых фильтров на выходе перемножителей. Все это будет приводить к появлению зеркальных частот в спектре сигнала на выходе.

При использовании FPGA матрицы возможны проблемы от встроенных ADC и DAC. Для реализации метода придется использовать внешнее ADC и FPGA матрицу, что значительно удорожает построение измерительной схемы. К матрице FPGA предъявляются до-

статочны высокие требования, так как в этом случае возникает необходимость в большом количестве структурных перемножителей для реализации фильтров FIR.

Анализ уже снятых переходных процессов [3] позволяет говорить, что фильтры ФНЧ с постоянной времени 0,01–0,02 с не будут вносить существенных искажений в динамику снимаемых кривых.

Аналоговая часть преобразования от DAC до ADC независимо от выбранной схемы квадратурного демодулятора должна предусматривать адаптивную схему регулирования уровня сигналов в зависимости от изменения сопротивления первичного преобразователя.

Использование пространственно неоднородного преобразователя позволяет производить коррекцию результатов измерения динамики пропитки. Предложенные и проанализированные схемы преобразователя сопряжены с рядом проблем при выборе как аналогового, так и цифрового демодулятора. Необходимость проведения измерений в высокочастотном диапазоне существенно затрудняется наличием обязательной адаптивной регулировки коэффициента усиления на несколько порядков в аналоговой части схемы. Наиболее рациональным выбором может быть построение измерительной схемы на частотах, близких к 500 кГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. CST Equipment [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.tritonel.com/> (дата обращения: 25.01.2015).

2. Олиферович Н. М., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Анализ динамических характеристик и динамических погрешностей преобразователя измерения параметров впитывания // Труды БГТУ. 2014. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 96–99.

3. Богослав Н. М., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Экспериментальное исследование динамики круговой пропитки // Труды БГТУ. - 2013. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С.99–103.

4. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2-х т. Том. 2. – М.: Мир, 1983. 256 с.

5. STMicroelectronics [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.st.com/web/en/home.html> (дата обращения: 25.01.2015).

М. А. Анкуда, ассист., И. О. Оробей, доц., канд. техн. наук,
В. В. Сарока, ст. препод., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОДИНА

Для оценки качественных параметров технологических процессов широкое распространение получили анализаторы, которые основаны на изучении интенсивности ЯМР сигналов. Математическое описание процессов, происходящих в электронных компонентах ЯМР измерителей, позволяет более точно изучить динамику происходящих процессов, провести анализ сигналов и оценить реакцию при различном внешнем воздействии.

Схема автодина приведена на рисунке 1. В состав схемы входят параллельный колебательный контур на L_a , C^*1 , $C3$, $C4$ с возможностью электронной регулировки резонансной частот с помощью варикапы $VD1$; истоковый повторитель, построенный на $VT1$; дифференциальный усилитель на транзисторах $VT2$, $VT3$; амплитудный детектор реализованный на $VD2$, $VD3$. Схема получает питание от стабилизатора напряжения +7В собранного на $VD6$ и $VT4$ и стабилизатора напряжения -3В на $VD5$ и $VT5$.

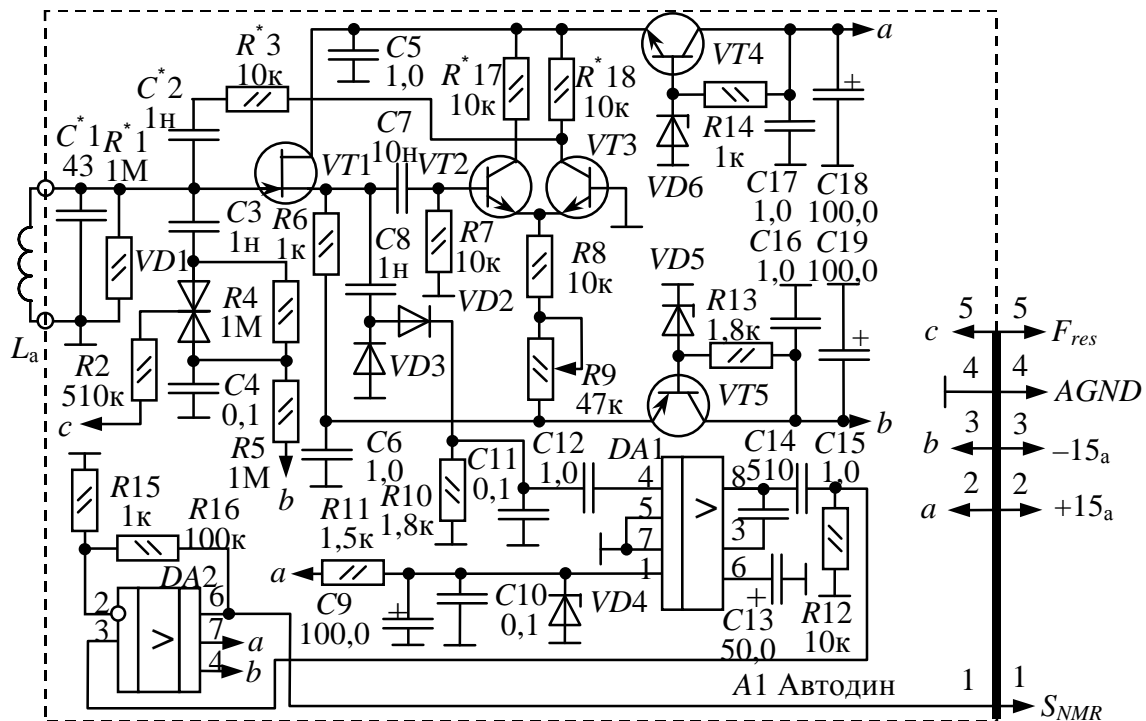


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная автодина

Генератор колебаний включает в себя колебательный контур, повторитель и дифференциальный усилитель. При этом амплитуда

колебаний генератора будет зависеть от потерь, которые возникают в катушке L_a , и будет изменяться при периодическом прохождении через резонанс.

Подобная схема автодина используется для преобразования движения спинов в электрические сигналы во многих устройствах, что требует в свою очередь разработки ее модели с последующим анализом ее поведения при малых возмущениях, которые будут обусловлены прохождением резонансных условий.

Для получения модели составляются уравнения по первому закону Кирхгофа для узла, лежащего возле затвора VT1, и второму закону Кирхгофа по контуру от общей точки через генератор колебаний:

$$\begin{cases} i_L + i_{CD} + i_{R1} + i_{OC} = 0 \\ -u + u_{OC} + u_{K\wedge} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Будет целесообразно выразить указанные токи через напряжение u :

$$i_{CD} = C_{CD} \frac{du}{dt}; \quad i_L = \frac{1}{L} \int u dt; \quad i_{R1} = \frac{u}{R1} \quad (2)$$

После проведения некоторых расчетов для повторителя и дифференциального усилителя и выразив значения токов и напряжений для (1) получим:

$$\frac{1}{L} \int u dt + \frac{u}{R1} + C_D \frac{du}{dt} + \frac{u + i_{KVT3} \cdot R18}{R3 + R18} = 0 \quad (3)$$

или

$$\frac{1}{L} \int u dt + \frac{u}{R1} + C_D \frac{du}{dt} + \frac{u}{R3 + R18} + \frac{i_{KVT3} \cdot R18}{R3 + R18} = 0. \quad (4)$$

Продифференцируем (4):

$$\frac{u}{L} + \frac{1}{R1} \times \frac{du}{dt} + C_D \times \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{1}{R3 + R18} \times \frac{du}{dt} + \frac{R18}{R3 + R18} \times \frac{di_{KVT3}}{dt} = 0 \quad (5)$$

Разделим (5) на C_D и введём обозначение $\sqrt{\frac{1}{L \times C_D}} = w_0$,

где w_0 – собственная частота контура. Получаем уравнение:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{1}{C_D} \times \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R3 + R18} \right) \frac{du}{dt} + \frac{1}{C_D} \times \frac{R18}{R3 + R18} \times \frac{di_{KVT3}}{dt} + w_0^2 \times u = 0. \quad (6)$$

$$i_{KVT3} = -s \frac{u}{2} \quad (7)$$

где $s = \frac{dI_k}{dU_{be}}$ – крутизна транзистора VT3, Ом-1.

Аппроксимируя крутизну транзистора разложением в ряд до квадратичного члена вместо (6) получаем:

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \frac{1}{C_z} \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R3 + R18} + \frac{R18}{(R3 + R18)} (5.5 \cdot 10^5 u^2 - 273.1u - 0.075) \right) \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = 0 \quad (7)$$

Решение уравнения (7), получаемое методом медленно меняющихся амплитуд, имеет вид

$$a(t) = 2 \sqrt{\frac{me^{mt}}{C_0 - 5.5 \cdot 10^5 k_2 e^{mt}}} \quad (8)$$

$$C_0 = \frac{4m + a^2 \cdot 5.5 \cdot 10^5 k_2}{a^2}, \quad a = \sqrt{4KTR\Delta f}; \quad (9)$$

где Δf – ширина полосы;
 k – постоянная Больцмана;
 T – температура 293К;
 R – общее сопротивление;
 $a(t)$ – амплитуда напряжения.

$$m = 0,075k_2 - k_1, \quad (10)$$

$$k_1 = \frac{1}{C_z} \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R3 + R18} \right), \quad k_2 = \frac{1}{C_z (R3 + R18)}, \quad (11)$$

В установившемся режиме (при $t \rightarrow \infty$) (8) можно переписать в виде:

$$u(t) = 2 \sin(\omega_0 t) \sqrt{\frac{me^{mt}}{C_0 - 5.5 \cdot 10^5 k_2 e^{mt}}} \quad (12)$$

Для получения временной зависимости сигналов ЯМР на выходе автодина нужно выявить влияние на его работу движения вектора намагниченности в катушке регистрации. При помещении образца в постоянное поле B_0 , направленное по Oz , и наложении на него переменного вращающегося с частотой ω в плоскости Oxy поля B_1 уравнениями движения вектора намагниченности являются уравнения Блоха:

$$dM_x/dt - \gamma(M_y B_z - M_z B_y) + M_x/T_2 = 0, \quad (13)$$

$$dM_y/dt - \gamma(M_z B_x - M_x B_z) + M_y/T_2 = 0, \quad (14)$$

$$dM_z/dt - \gamma(M_x B_y - M_y B_x) + M_z/T_1 = M_0/T_1, \quad (15)$$

где M_x, M_y, M_z – мгновенные значения проекций векторов намагниченности результирующего поля в образце на оси Ox, Oy, Oz ;

B_x, B_y, B_z – мгновенные значения проекций векторов индукции результирующего поля в образце на оси Ox, Oy, Oz ;

M_0 – равновесная намагниченность ($M_0 = \chi_0 B_0$);

$B_z = B_0$.

Общее решение (13)–(15) затруднено в связи с необходимостью прохождения резонансных условий, что требует изменения во време-

ни $B_z = B_0$ или частоты ω . Поэтому переходят в ВСК с частотой ω вокруг Oz , полагая

$$M_x = u \cos \omega t - v \sin \omega t, \quad M_y = \mp (v \cos \omega t + u \sin \omega t), \quad (16)$$

где u – намагниченность, вращающаяся синфазно с B_r , А/м;

v – намагниченность, опережающая B_r на $\pi/2$, А/м.

Переходим к уравнениям для u и v :

$$\frac{du}{dt} + \frac{u}{T_2} + v \Delta \omega = 0, \quad \frac{dv}{dt} + \frac{v}{T_2} - u \Delta \omega = -|\gamma| B_1 M_z, \quad \frac{dM_z}{dt} + \frac{M_z}{T_1} - |\gamma| v B_1 = \frac{M_0}{T_1}, \quad (17)$$

Перепишем первые два уравнения (17) через комплексную функцию

$F = v + ju$

$$dF/dt + (1/T_2 + j\Delta\omega)F = -|\gamma|B_1M_z. \quad (18)$$

Решение (18) $F = -|\gamma|B_1 \int_{-\infty}^t M_z(t') \exp\left(\frac{t'-t}{T_2} - j \int_t^{t'} \Delta\omega(t'') dt''\right) dt'$ при ма-

лом B_1 из-за $M_z \approx M_0$ принимает вид

$$v + ju = -|\gamma|B_1M_0 \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{t'-t}{T_2} - j \int_t^{t'} \Delta\omega(t'') dt''\right) dt'. \quad (19)$$

Спектр ЯМР снимают прохождением резонансных условий изменением поля B_0 при постоянной частоте ω или изменением ω при постоянном B_0 . На практике применяют как развертку полем, так и частотой. (19) анализируются при разных вариантах изменения B_0 или $D\omega$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леше, А. Ядерная индукция / А. Леше; пер. с нем. под ред. П. М. Бородина. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1963. – 684с.
2. Jacobson, V. A. Shapes of Nuclear Induction Signals / V. A. Jacobson, R. K. Wangsness // Physical Review. – 1948. –v. 73. – P. 942–946
3. Анкуда, М. А. Разработка и расчет параметров спинового генератора / М. А. Анкуда, В. В. Сарока // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. – 2005. – Вып. XIII. – С. 121–123

**МОДЕЛЬ АВТОДИНА С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ
ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

Метод автодинного детектирования спиновых резонансов достаточно актуален в технике стационарной спектроскопии, в частности, ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [1]. Современные методы обработки сигналов позволяют существенно расширить возможности автодинных радиоспектрометров. Автодин по существу является генератор слабых высокочастотных колебаний, амплитуда которых зависит от внесённых потерь в колебательный контур за счет ядерной динамической восприимчивости образца [2]. Поглощение энергии радиочастотного поля на резонансной частоте ядерной спиновой системой исследуемого образца приводит к уменьшению добротности контура и, как следствие вызывает изменение амплитуды высокочастотных (ВЧ) колебаний. Для эффективного поглощения энергии радиочастотного поля спиновой системой необходимо, чтобы добротность катушки с исследуемым веществом была максимальной.

Обычно колебательный контур автодинного детектора характеризуется тремя основными параметрами: индуктивностью L , ёмкостью C и сопротивлением R , которые при своей независимости от сигналов в контуре образуют линейную систему. Описать которую можно следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{1}{L} \dot{u} dt + \frac{u}{R} + C \frac{du}{dt} = 0. \quad (1)$$

Если какой-либо из параметров контура зависит от величины сигнала в нём, то уравнение (1) становится нелинейным, а для нелинейной системы нет принципиального различия в получении резонанса либо воздействием на систему внешним ЭДС, либо параметрическим возбуждением. Периодическое изменение реактивного параметра при достаточной интенсивности и соответствующей частоте вызывает параметрическое возбуждение колебаний в системе [3]. Подобная система представляет собой усилитель мощности, в котором энергия от изменения реактивного параметра преобразуется в энергию сигнала. Усиление в параметрическом усилителе происходит за счет внесения генератором накачки в сигнальный контур условного отрицательного сопротивления, которое зависит от амплитуды накачки.

Однако, помимо создания соответствующей амплитуды колебаний генератора накачки, необходимых для изменения емкости контура, требуется также обеспечить совпадение фаз сигналов накачки и

контура. Причем частоту накачки следует выбирать в 2 раза больше частоты сигнала, чтобы обеспечит подвод мощности к контуру [3].

Таким образом, схема автодина с параметрическим возбуждением может быть условно разделена на несколько функциональных узлов: колебательный контур, генератор накачки и цепь обратной связи. Схема автодина приведена на рисунке 1. В рассматриваемом генераторе в качестве переменного реактивного элемента колебательного контура используется емкость р-п перехода полупроводниковой варикапы VD1; в качестве генератора накачки используется схема возведения в квадрат, которая построена на DA1. Поскольку в качестве опорного сигнала для параметрического изменения емкости используется непосредственно сигнал колебательного контура на удвоенной частоте, которая получается с выхода схемы умножения, то тем самым обеспечивается совпадение фаз. Обратная связь реализуется через подачу сигнала после усиления на схеме DA2 на управляющий электрод варикапы VD1.

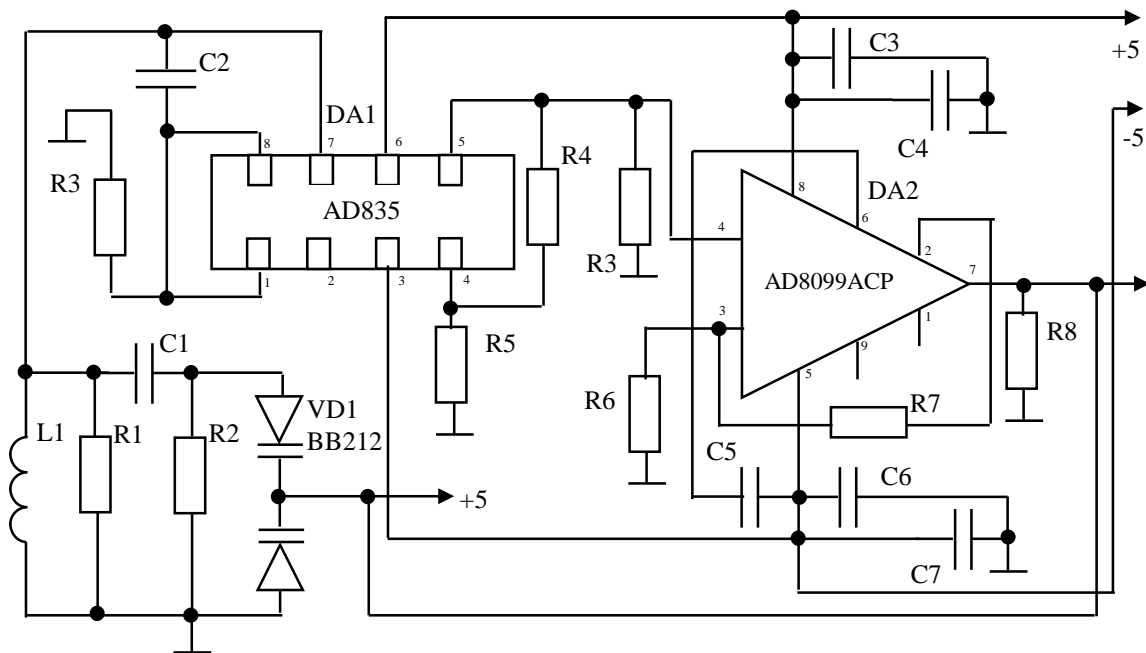


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная автодина

Для составления математической модели рассмотрим колебательный контур, емкость которого является некоторой изменяемой величиной. При этом зависимость емкости варикапы VD1 от приложенного напряжения можно записать в виде:

$$C = \frac{C_0}{1 + m \cdot \cos 2\omega t}, \quad (2)$$

где $m = \frac{\Delta C}{2C} = \frac{C_{VD1 \max} - C_{VD1 \min}}{C_{VD1 \max} + C_{VD1 \min}}$ – коэффициент модуляции емкости.

При определенных условиях подобный колебательный контур может стать параметрическим генератором.

Продифференцируем уравнение (1):

$$\frac{1}{L1} u + \frac{1}{R1} \frac{du}{dt} + C \frac{d^2 u}{dt^2} = 0. \quad (3)$$

Тогда подставляя уравнение (2) в (3) для колебательного контура можно будет получить:

$$\frac{1}{L1} u + \frac{1}{R1} \frac{du}{dt} + \frac{C_0 C1}{C1(1 + m \cdot \cos 2\omega t) + C_0} \frac{d^2 u}{dt^2} = 0. \quad (4)$$

Если пренебречь потерями на R1 и принять значение C1 равным значению C₀, то уравнение (4) можно записать в следующем виде:

$$\omega_0^2 (2 + m \cdot \cos 2\omega t) u + \frac{d^2 u}{dt^2} = 0, \quad (4a)$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L1C_0}}$.

Решим (4a) методом медленно меняющихся амплитуд. При малой нелинейности емкости и малой глубине модуляции параметра можно ограничиться рассмотрением гармонического приближения и искать решение $u(t)$ как:

$$u = a(t) \sin \omega t + b(t) \cos \omega t, \quad (5)$$

где $a(t)$ и $b(t)$ – медленно меняющиеся во времени амплитуды искомого колебания.

Медленность изменения a и b во времени определяется тем, что их производные по времени являются величинами первого порядка малости по сравнению с произведениями ωa и ωb :

$$\frac{da}{dt} \ll \omega a, \quad \frac{db}{dt} \ll \omega b \quad (6)$$

С учетом (6) первая производная:

$$\frac{du}{dt} \approx a\omega \cos \omega t - b\omega \sin \omega t + \sin \omega t \frac{da}{dt} + \cos \omega t \frac{db}{dt}$$

в первом приближении принимает вид:

$$\frac{du}{dt} \approx a\omega \cos \omega t - b\omega \sin \omega t. \quad (7)$$

Для второй производной:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u}{dt^2} &\approx -\omega^2 a \sin \omega t - \omega^2 b \cos \omega t + \omega \cos \omega t \frac{da}{dt} - \omega \sin \omega t \frac{db}{dt} + \\ &+ \frac{d^2 a}{dt^2} \sin \omega t + \frac{d^2 b}{dt^2} \cos \omega t + \omega \cos \omega t \frac{da}{dt} - \omega \sin \omega t \frac{db}{dt}, \end{aligned}$$

пренебрежем слагаемыми второго порядка малости и оставим слагаемые первого порядка малости. Получим

$$\frac{d^2u}{dt^2} \approx - \left(\omega^2 a + 2\omega \frac{db}{dt} \right) \sin \omega t + \left(-\omega^2 b + 2\omega \frac{da}{dt} \right) \cos \omega t, \quad (8)$$

Слагаемые первого порядка малости оставлены в (8) и ими пренебрегли в (7). Это объясняется тем, что схема обладает малыми потерями, поэтому амплитуда второго слагаемого левой части исходного уравнения относительно мала по сравнению с амплитудами первого и третьего слагаемых.

Подставив (5, 8) в уравнение (4а), получим:

$$\omega_0^2 (2 + m \cdot \cos 2\omega t) (a \sin \omega t + b \cos \omega t) - \left(\omega^2 a + 2\omega \frac{db}{dt} \right) \sin \omega t + \left(-\omega^2 b + 2\omega \frac{da}{dt} \right) \cos \omega t = 0 \quad (9)$$

Поскольку на систему не действует внешняя периодическая сила и частота автоколебаний равна ω_0 а не ω , то (9) примет вид:

$$\omega_0^2 (2 + m \cdot \cos 2\omega_0 t) a \sin \omega_0 t - \omega_0^2 a \sin \omega_0 t + 2\omega_0 \frac{da}{dt} \cos \omega_0 t = 0. \quad (10)$$

Введем безразмерный параметр $\tau = \omega_0 t$, а производную будем брать по времени. Тогда решение уравнение (10) можно будет записать в виде:

$$a(\tau) = B e^{-\frac{K1}{K2} \tau}, \quad (11)$$

где $K1 = \omega_0^2 (1 + m \cdot \cos 2\tau) \sin \tau$, $K2 = 2\omega_0 \cos \tau$.

В момент времени $t=0$ амплитуда определяется шумом Найквиста:

$$a(t=0) = \sqrt{4kTR\Delta f}. \quad (12)$$

где $a(t=0)$ амплитуда напряжения при $t=0$, Δf – ширина полосы; $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана; T – температура, $K; R$ – общее сопротивление.

В итоге общее решение примет вид:

$$u(t) = \sqrt{4kTR\Delta f} e^{-\frac{\omega_0 (1+m \cos 2\tau) \tau}{2}} \sin \omega_0 t. \quad (13)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Яценко А. В. Датчик сигналов ЯМР для исследования веществ с большим значением $T1$. / А. В. Яценко, С. В. Евдокимов // ПТЭ. – 2003.-№1. –С.64-66.

2. Леше, А. Ядерная индукция / А. Леше; пер. с нем. под ред. П. М. Бородина. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1963. – 684с.

Мандельштам Л. И., Папалекси Н.Д. О параметрическом возбуждении электрических колебаний. Мандельштам Л. И., Папалекси Н. Д. // Журн. техн. физики. – 1934. – № 3. – С. 5–29.

В.Б. Михайлов, доц., канд. физ.-мат. наук
Д.С. Карпович, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск);

С.Д. Латушкина, канд. техн. наук
(ФТИ НАН РБ, г. Минск)

ДИНАМИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЕ ГАЗОВЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ АСУ ПРОИЗВОДСТВОМ В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Контроль за концентрацией токсичных, пожаро- и взрывоопасных газов, а также отдельных компонент отходящих технологических выбросов химических предприятий ведется различными приборами. Это электрохимические, термокаталитические, термомагнитные, ИК-оптические, вплоть до использования хроматографов и спектрометров.

Одним из перспективных методов контроля концентраций известных компонент в газовых выбросах предприятий является использование достаточно дешевых пленочных газовых датчиков на основе оксидов металлов, обладающих полупроводниковыми свойствами. Такие датчики имеют хорошую чувствительность – до нескольких ppm и время реакции 3 – 5 с. [1, 2]

Однако, у полупроводниковых сенсоров существует проблема “отравления” большими концентрациями анализируемых газов при их скачкообразном изменении. Это выражается в увеличении времени восстановления исходного поверхностного сопротивления датчика, что в свою очередь тормозит процесс управления технологической линией.

В первых разработках такого прибора задача решалась использованием пропорционального дозатора – разбавителя концентраций исследуемых газов. [3] Этот способ оказался дорогим и вновь увеличивал постоянную времени всего прибора.

Изучение временных характеристик сенсоров позволило создать метод управления не приводящий к “отравлению” поверхности. [3]

При воздействии на поверхность датчика имеющего нестехиометричный состав газов с концентрацией O_2 5 – 10 ppm время достижения максимального сигнала находятся в пределах 5 с. Амплитуда сигнала при этом порядка 30 % от максимума. Датчик достаточно быстро в течении 12 – 13 с. восстанавливает свое удельное сопротивление после снятия воздействия. При увеличении концентрации амплитуда сигнала растет, а время достижения максимального значения сигнала порядка 50 % от максимума увеличивается до 10 – 11 с. При резком росте концентрации O_2 амплитуда сигнала достигает макси-

му за время 5 – 8 с, а восстановление длится несколько минут. Кривые изменения относительного сопротивления датчиков при различных концентрациях кислородосодержащих компонент показаны на рисунке 1.

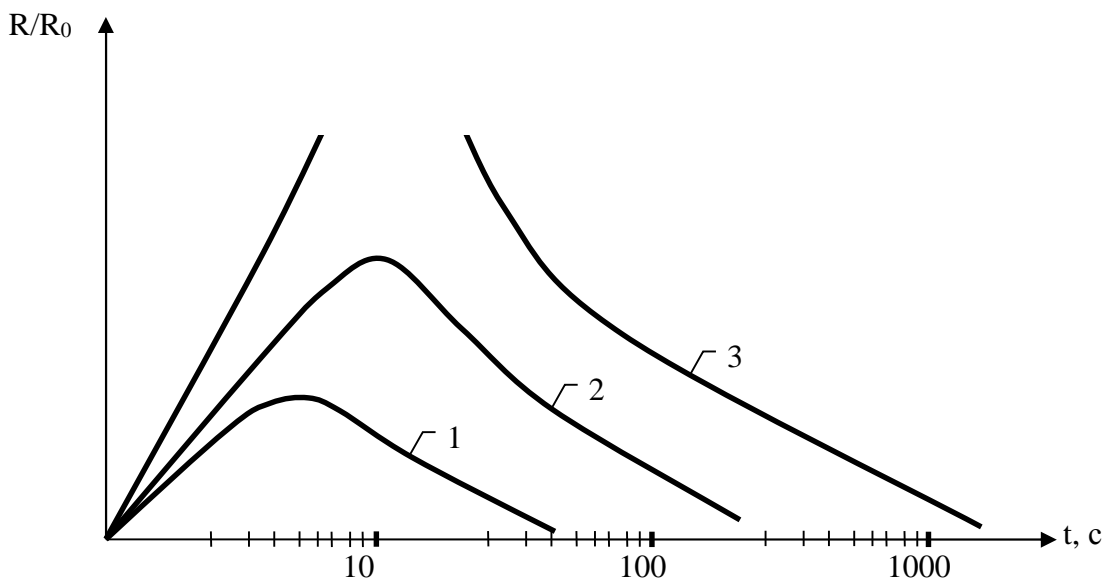


Рисунок 1 – 1 – концентрация O₂ 5÷10 ppm; 2 – 30÷40 ppm; 3 – свыше 500 ppm.

Описанные явления при появлении больших концентраций анализируемых газов могут приводить к «отравлению» датчика и невозможности его использования в автоматизированных системах контроля. Способом устранения этого недостатка является уменьшение температуры рабочего тела датчика, что снижает скорость роста сигнала датчика, но приводит к росту времени восстановления сопротивления (проводимости) датчика.

При изготовлении тонкопленочных датчиков осуществлялся «подпыл» наноразмерных островковых несплошных пленок Au, Pt, Pd, т.е. каталитических добавок, а при создании толстопленочных элементов в состав датчика были введены суспензии С-фуллеренов и С-нанотрубок в контролируемой концентрации. В обоих случаях скорости обратимых реакций при процессе сорбции– десорбции молекул окружающих газов возросли в 4, 5 раз. Это позволило уменьшить температуру датчика до 200, 300 °С, при этом восстановление стабильного исходного состояния проводимости датчика оставалось таким же.

Возможность быстро менять температуру датчика и соответственно чувствительность, появилась при новой конфигурации нагревателя, сформированного как на ситалловых, так и на кремниевых

подложках. Питание нагревателя осуществлялось от частотно-модулированного источника постоянного тока. Изменение температуры микронагревателя пленочного датчика в зависимости от частоты модулирующих импульсов показан на рисунке 2.

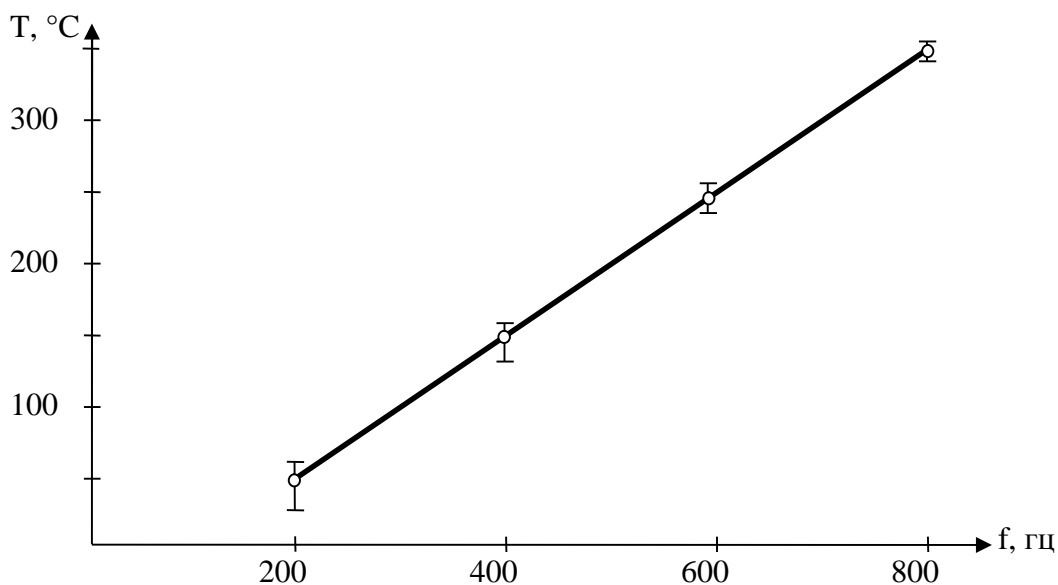


Рисунок 2

Частотно-модулированное регулирование температуры датчика позволило быстро менять чувствительность и следовательно снять проблему длительного восстановления проводимости.

Таким образом, разработанная методика динамического управления газовым сенсором позволяет при чувствительности (1, 5 ppm) получить сравнительно малые времена нарастания (2, 3 с). Это дает возможность использовать их в системах АСУТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов В.Б. Контроль предельно допустимых концентраций промышленных газовых выбросов с использованием толсто пленочных интегральных газочувствительных элементов // Труды БГТУ. Сер. физ. мат. наук и информ. Вып. XII. 2004. С. 93-94.

2. Михайлов В.Б. Управление динамическими свойствами индикатора газовых выбросов промышленных предприятий на пленочном оксидно-полупроводниковом датчике. / Материалы 77-й НТК БГТУ. 4-9 февраля 2013.

3. Михайлов В.Б. Индикаторы кислородо- и водородосодержащих промышленных выбросов на основе толсто пленочных интегральных газочувствительных элементов // Труды БГТУ. Сер. III. Химия и технология неорганических в-в. – 2006. – Вып. XIV. – С. 69-71.

Д. Е. Сидорчик, магистрант,
Д. С. Карпович, доц., канд. техн. наук,
(БГТУ, г. Минск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНКОДЕРОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Датчик угла поворота (сокр. ДУП) — устройство, предназначенное для преобразования угла поворота вращающегося объекта (вала) в электрические сигналы, позволяющие определить угол его поворота. Датчики угла поворота имеют множество применений. Они широко применяются в промышленности (в частности в сервоприводах), в роботостроении, в автомобилестроении (например для определения угла поворота рулевого колеса) и т. п.

ДУПы подразделяются: по способу выдачи информации на накапливающие (инкрементные) и абсолютные (позиционные).

По принципу действия на оптические, резистивные, магнитные, индуктивные, механические; по допустимому углу поворота вала на ДУПы с ограниченным диапазоном работы и ДУПы с неограниченным диапазоном работы (рисунок 1).

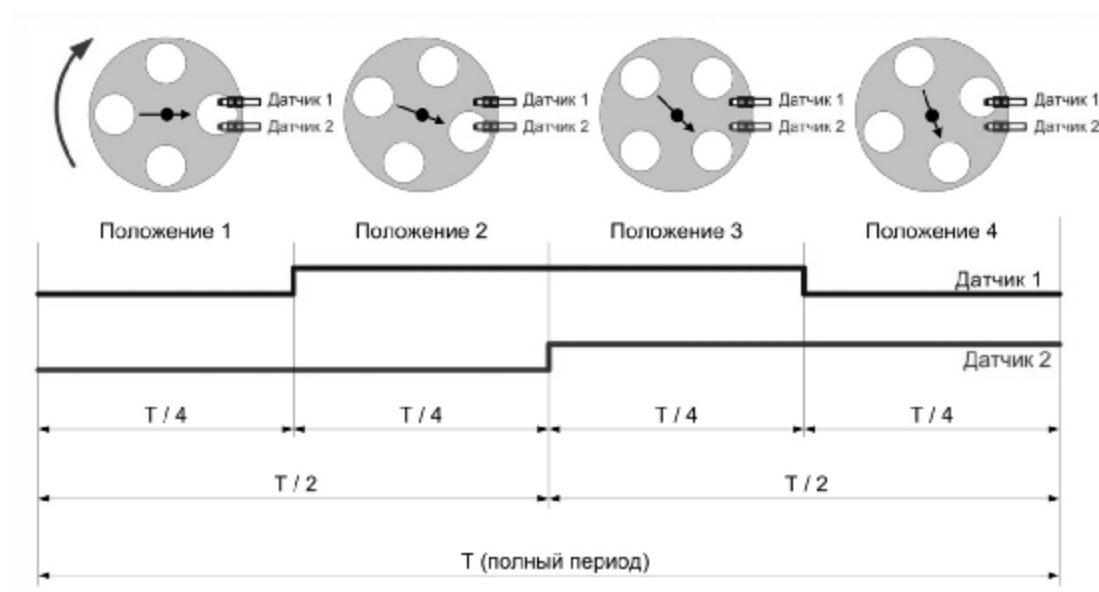


Рисунок 1 – Выходы «синус» и «косинус» инкрементального энкодера

Основным элементом простого оптического энкодера является оптопрерыватель (фотопрерыватель), состоящий из инфракрасного светодиода и фототранзистора, которые размещены друг напротив друга в пластмассовом корпусе (рисунок 2). При блокировании непрозрачной частью диска света, излучаемого светодиодом, проводимость

фототранзистора меняется. Это изменение может быть определено дискретными компонентами или микроконтроллером.

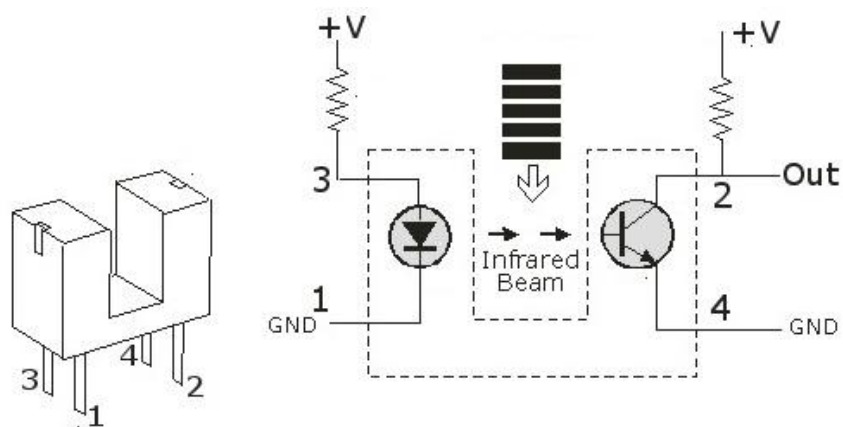


Рисунок 2 – Оптический энкодер

Поскольку нам нужно создавать импульсы на входе фототранзистора, то необходим диск с прозрачными частями или вырезами. Такой диск можно сделать из прозрачного акрила, наклеив на него распечатанный на принтере рисунок, который представлен ниже. Также можно вырезать соответствующую фигуру из непрозрачного акрила. Данную экспериментальную установку можно увидеть на рисунке 3.

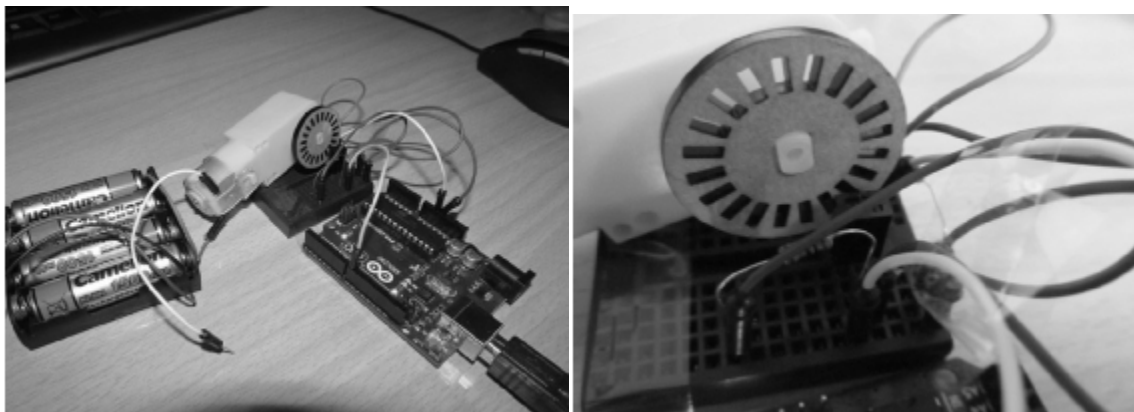


Рисунок 3 – Установка для тестирования оптического энкодера

В ходе проведения эксперимента было установлено, что при различных скоростях вращения диска импульсы не теряются в опросе, а также у энкодера нет погрешности, т.к. об этом можно судить по экспериментальной характеристике на рисунке 4.

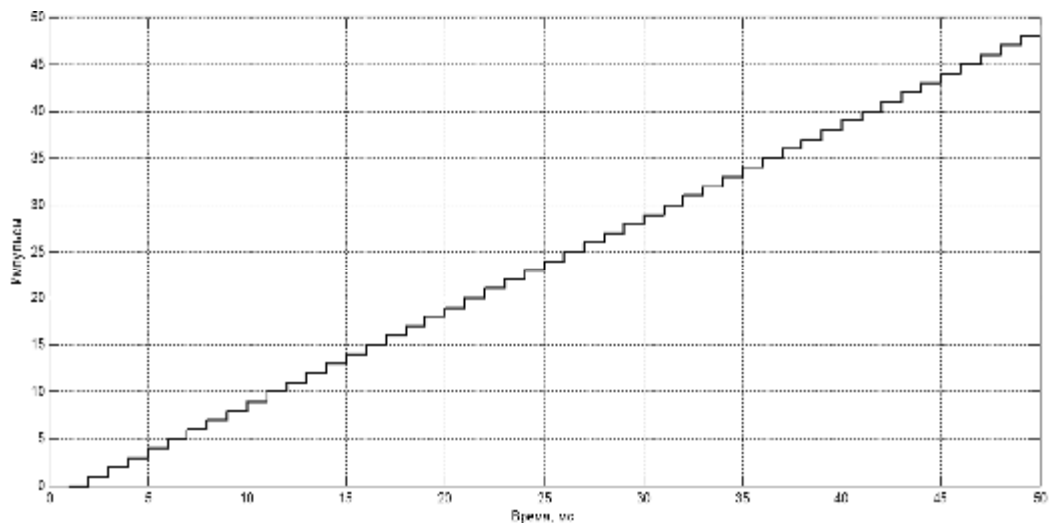


Рисунок 4 – Экспериментальная характеристика оптического энкодера

На рисунке 5 изображена экспериментальная установка с использованием ротационного энкодера, а на рисунке 6 принципиальная электрическая схема.

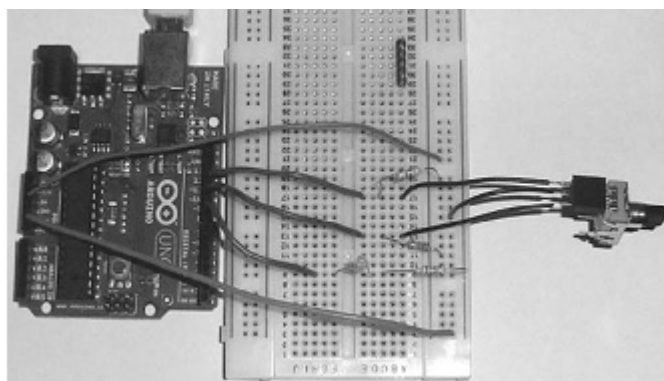


Рисунок 5 – Экспериментальная установка ротационного энкодера

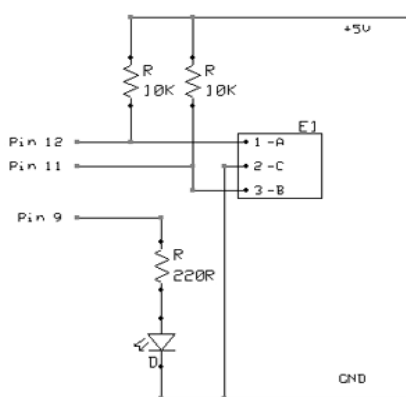


Рисунок 6 –Электрическая схема подключения ротационного энкодера

Произведем повторный эксперимент, где будут использованы одновременно два энкодера.

Результаты выведены в графическом виде на рисунке 7–9:

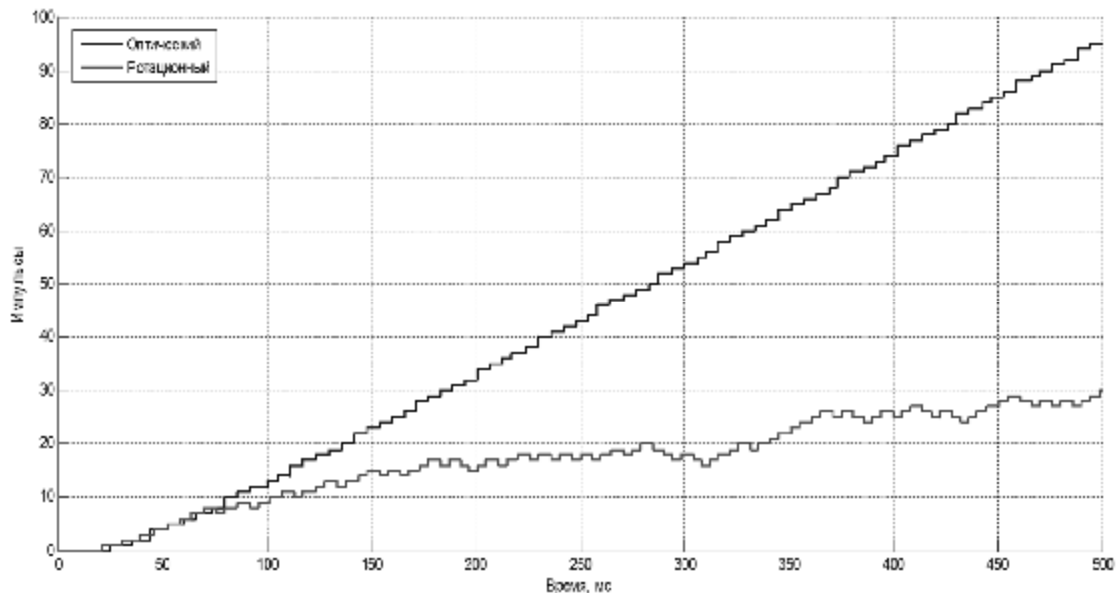


Рисунок 7 – Сравнение энкодеров на высокой скорости

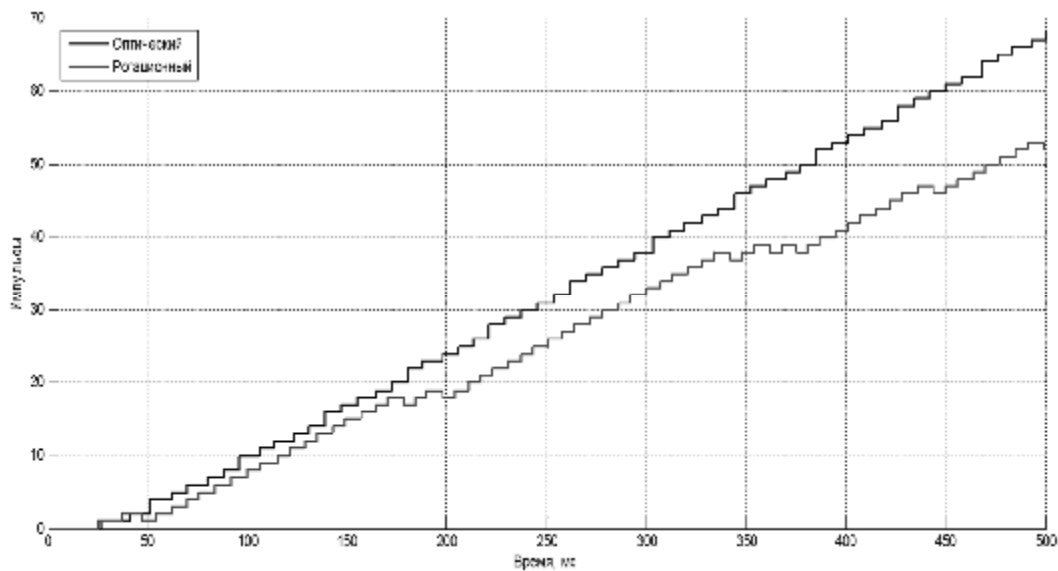


Рисунок 8 – Сравнение энкодеров на средней скорости

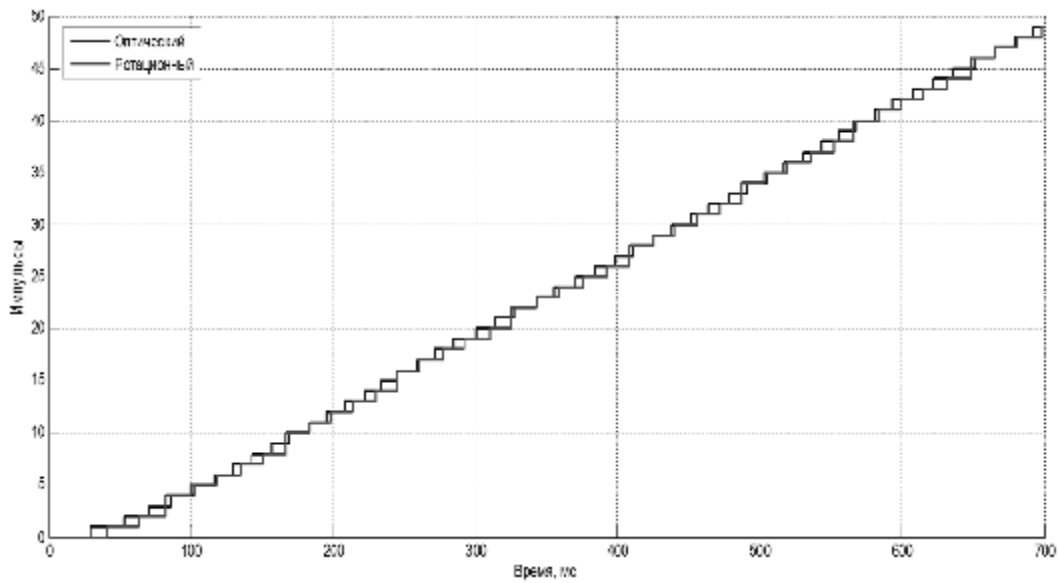


Рисунок 9 – Сравнение энкодеров на низкой скорости

Можно сделать выводы о том, что оптический энкодер можно использовать на высоких скоростях, но он может выдавать только значения только в одном направлении, а ротационный имеет два направления вращения, но его использование допустимо только на малых скоростях.

СЕКЦИЯ № 2
ЭЛЕМЕНТЫ, СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ И ИХ ИДЕНТИФИКАЦИЯ

Подсекция
ЭЛЕМЕНТЫ, СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Председатель – канд. техн. наук, доцент
Кузьмицкий Иосиф Фелицианович
Секретарь – ассистент Подобед Михаил Юрьевич

Д. Е. Сидорчик, магистрант,
Д. С. Карпович, канд. техн. наук, доц.,
(БГТУ, г. Минск)

ФИЛЬТРАЦИЯ ДАННЫХ ГИРОСКОПА С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРА КАЛМАНА НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ АТМЕГА328Р

Гирискосп — устройство, способное реагировать на изменение угловой ориентации тела, на котором оно установлено, относительно инерциальной системы отсчета.

Фильтр Калмана — это алгоритм обработки данных, который убирает шумы и лишнюю информацию. В фильтре Калмана есть возможность задать априорную информацию о характере системе, связи переменных и на основании этого строить более точную оценку.

В нашей работе был использован универсальный датчик GY-87.

Этот модуль (рисунок 1) состоит из следующего набора датчиков: 3х-осевой гирискосп и 3х-осевой датчик ускорения (акселерометр) + 3х-осевой датчик магнитного поля и 3х-осевой компас + датчик давления воздуха (барометр). На рисунке 2 можно увидеть прецессию механического гирискоспа.

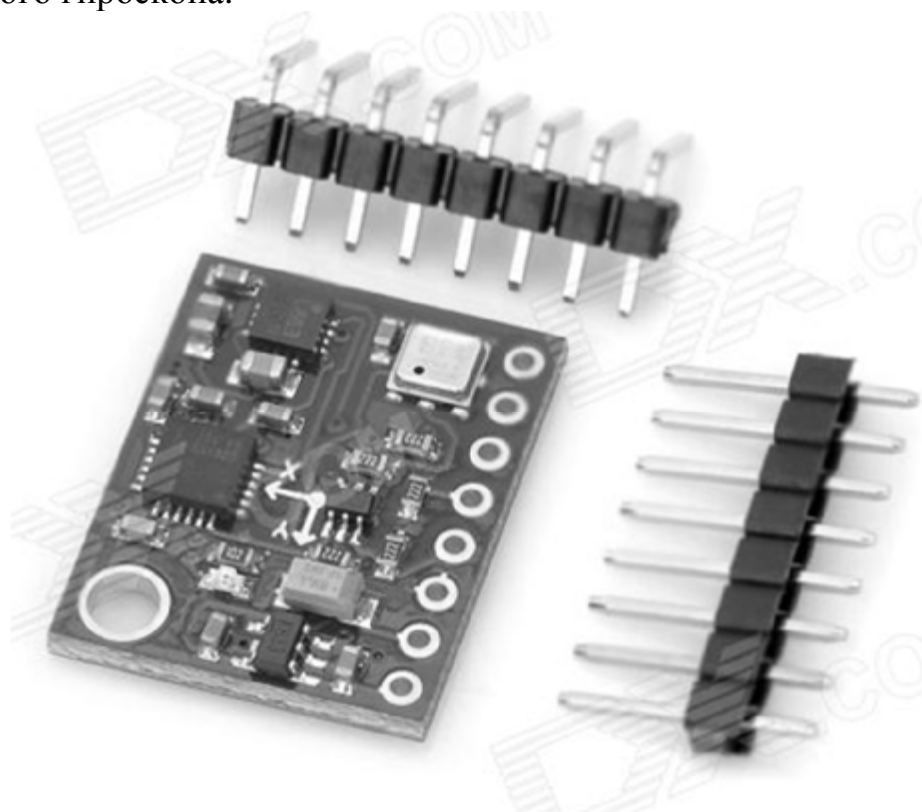


Рисунок 1 – универсальный датчик GY-87

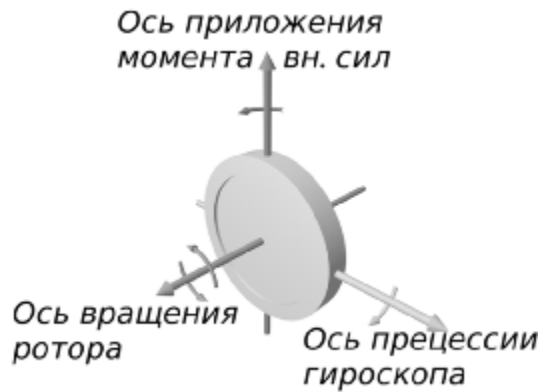


Рисунок 2 – Прецессия механического гироскопа

Схема подключения гироскопа с контроллером ArduinoUnoR3 можно увидеть на рисунке 3:

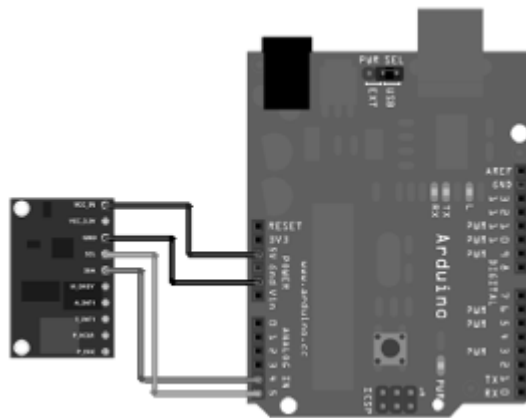


Рисунок3 – Схема подключения гироскопа к контроллеру

В среде Simulink связь с микроконтроллером изображена на рисунке 4.

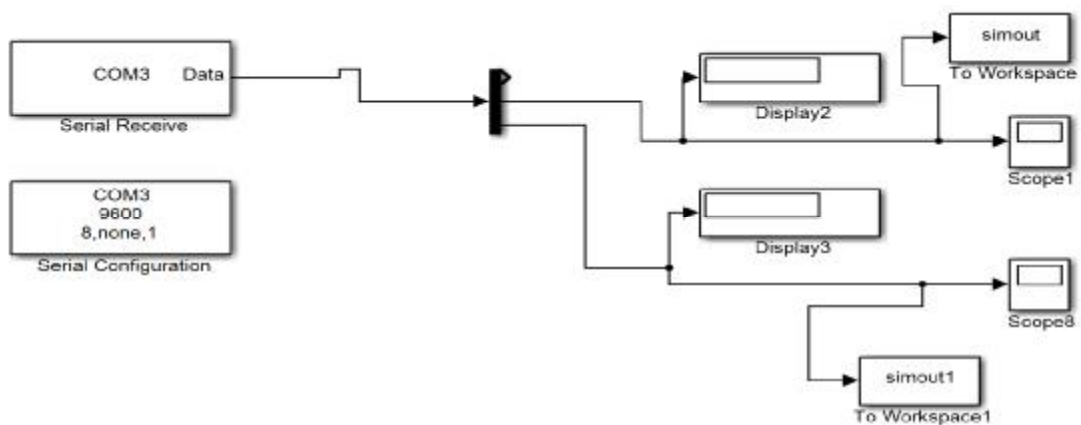


Рисунок 4 – Связь PC с микроконтроллером по COM-порту

Построим экспериментальные характеристики по оси у на рисунке 5:

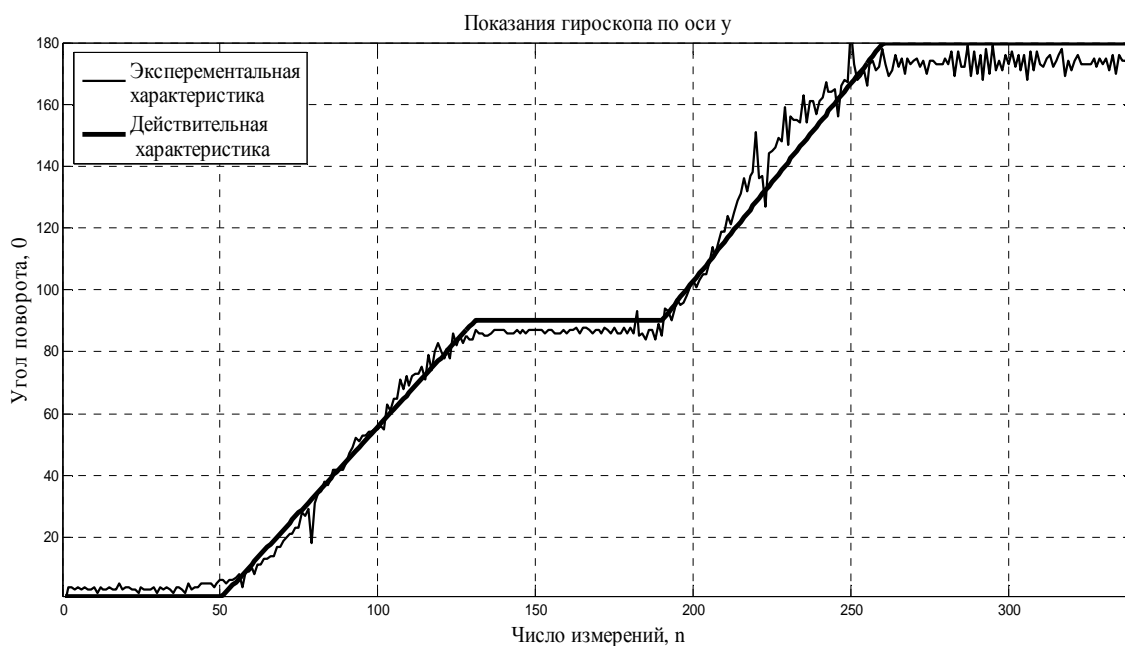


Рисунок 5 – Положение гироскопа по оси у

График абсолютной погрешности по оси х изображен на рисунке 6:

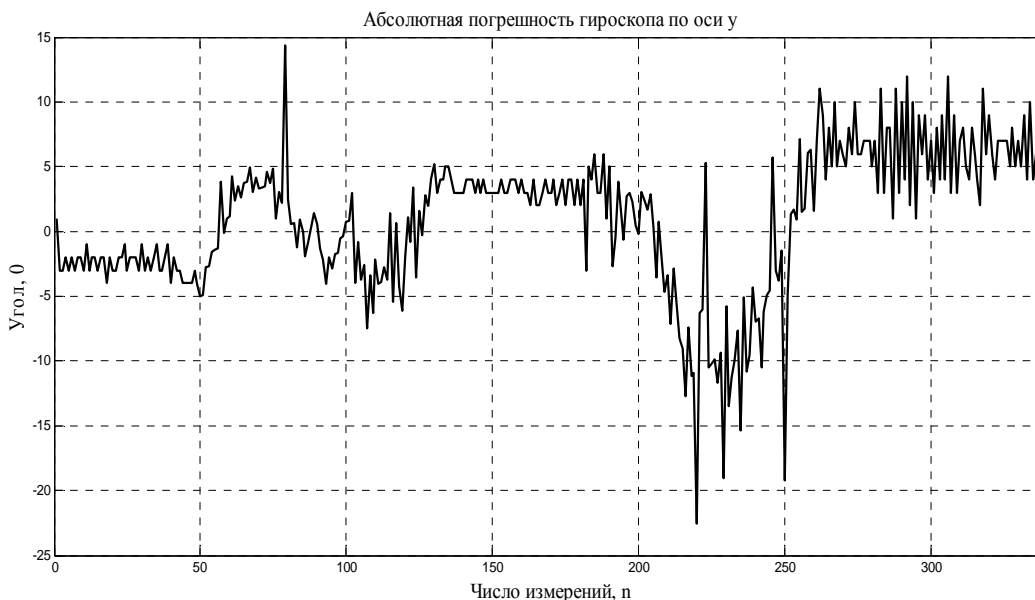


Рисунок 6 – Абсолютная погрешность гироскопа по оси у.

График относительной погрешности по оси у изображен на рисунке 7:

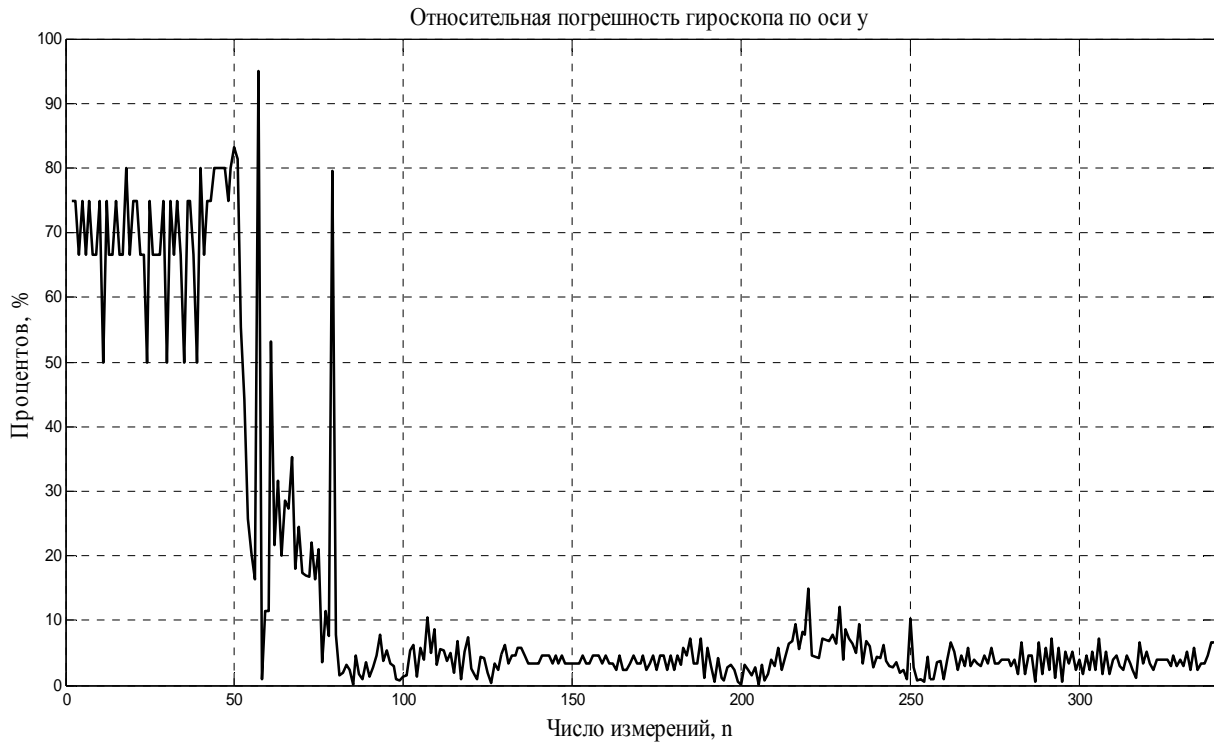


Рисунок 7 – Относительная погрешность гироскопа по оси у

По данным из макета Matlab определим абсолютную погрешность гироскопа по оси у:

$$\Delta Y = \frac{|84 - 90| + |88 - 90| + |85 - 90| + |83 - 90| + |87 - 90|}{5} = 4,6^\circ.$$

Определим относительную погрешность гироскопа по оси у:

$$\delta = \frac{4,6^\circ}{90^\circ} = 5,1\%.$$

Используем фильтр Калмана для гироскопа, и сравним полученные значения. В начале гироскоп неподвижен, затем мы его поворачиваем на 90 градусов, после небольшой паузы возвращаем его в начальное положение.

Вывод полученных данных и использование фильтра Калмана рассмотрим на рисунке 8:

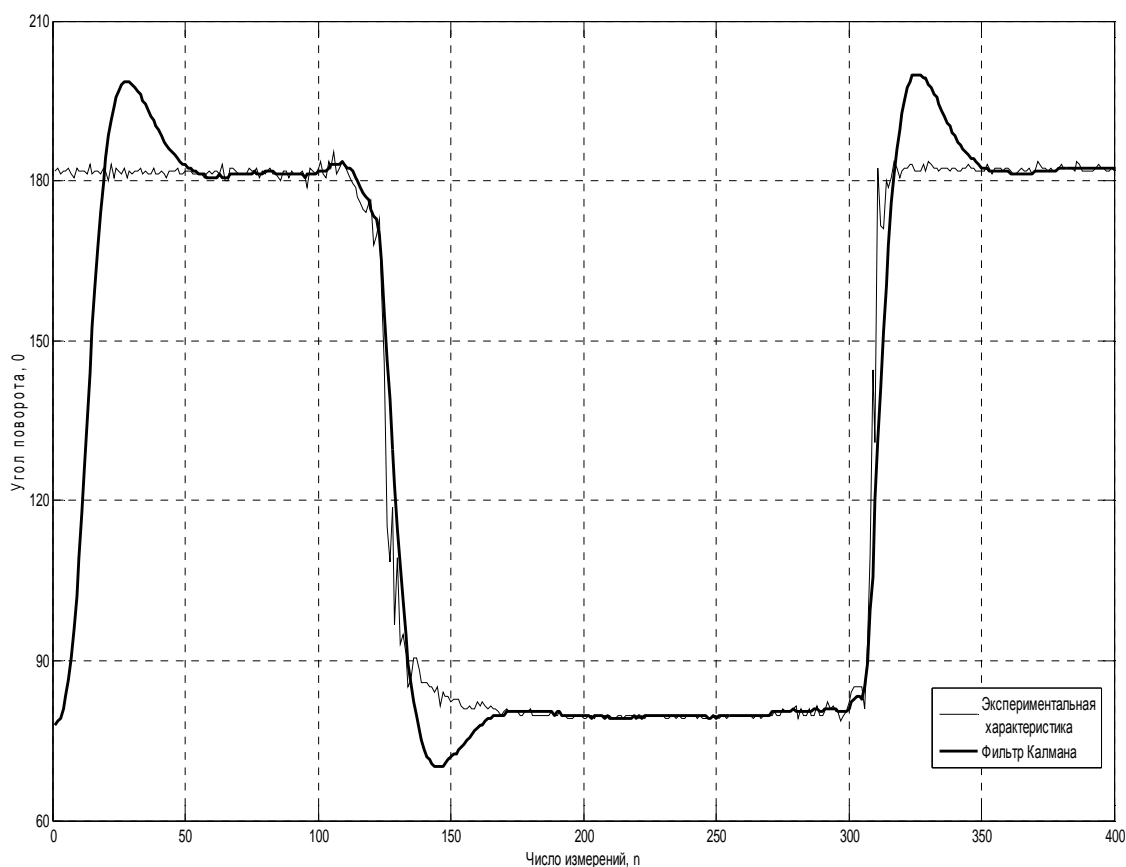


Рисунок 8 – Реализация фильтра Калмана для гироскопа

Из полученных характеристик и погрешностей можно судить о том, что датчик имеет сравнительно невысокую погрешность, и его можно использовать для различных систем управления или же для систем слежения, а при использовании фильтра Калмана значения сглаживаются, что говорит о уменьшении погрешности.

**СИСТЕМА ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ЛИСТОРЕЗАЛЬНОЙ МАШИНЫ 2ЛР2 – 120**

Введение. Машина листорезальная ротационная 2ЛР2–120 применяется на полиграфических предприятиях для поперечной разрезки рулонной бумаги или картона на листы заданного формата с укладкой их в стопу при высокой точности. Листорезальная машина состоит из двух частей: основной части машины и рулонной зарядки. Основная часть машины включает в себя механизм резания барабанного типа, цилиндр мерный, выводное устройство и приемку листов. В рулонной зарядке устанавливается два рулона, размотка бумаги с которых может производиться одновременно. Материал в зону резания подается с постоянной скоростью механизмом мерного цилиндра при натяжении, обеспечиваемом регулируемым колодочным тормозом. Изменение длины отрезаемых листов производится изменением скорости вращения барабана с ножом. Это достигается установкой на валу привода барабана сменного зубчатого колеса с соответствующим числом зубьев. Число зубьев сменного зубчатого колеса соответствует длине отрезаемого листа в сантиметрах.

Целью проекта является повышение эффективности листорезальной машины за счет оснащения ее основных исполнительных механизмов резального барабана и мерного цилиндра индивидуальными управляемыми электроприводами с микропроцессорной системой управления. Экономический эффект ожидается от сокращения времени на переналадку машины на иной формат отрезаемых листов; упрощения обслуживания и повышения точности реза за счет упрощения кинематической схемы.

В соответствии с техническими характеристиками, листорезальная машина должна удовлетворять следующим требованиям:

- длина отрезаемых листов 52–140 см;
- диапазон регулирования рабочей скорости 20–180 рез/мин;
- число резов в минуту устанавливается в зависимости от вывода и укладки листов в стопу, на что влияет плотность и качество разрезаемой бумаги и длина отрезаемых листов;
- максимальная линейная скорость подачи рулонного материала не должна превышать 2,0 м/с, что обусловлено требованием выкладки листов бумаги в ровную стопу;
- отклонения длины отрезаемых листов не должны превышать ± 2 мм [1].

Основная часть. Для оснащения двухрулонной листорезальной машины 2ЛР2 – 120 многодвигательным электроприводом необходимо провести выбор двигателей по мощности для исполнительных механизмов и разработать систему автоматического управления, обеспечивающую согласованную работу двух электроприводов с поддержанием требуемого отношения их скоростей.

В [2] приводится расчет статических нагрузок на валах мерного цилиндра и барабанного механизма резания, а также выбор электроприводов по мощности. Для привода механизма резания предлагается использовать трехфазный асинхронный электродвигатель мощностью 250 Вт с номинальной скоростью вращения ротора 1350 об/мин. В систему привода требуется включение редуктора. Требуемый диапазон рабочих скоростей вала механизма резания машины обеспечивает предлагаемый двухступенчатый цилиндрический редуктор R07 фирмы SEW Eurodrive (Германия) с передаточным числом 7,48 и максимальным моментом на выходном валу 43 Нм.

Для привода механизма мерного цилиндра предлагается использовать трехфазный асинхронный электродвигатель мощностью 5500 Вт с номинальной скоростью вращения ротора 1446 об/мин в паре с двухступенчатым цилиндрическим редуктор R67 фирмы SEW Eurodrive с передаточным числом 11,88 и максимальным моментом на выходном валу 580 Нм.

Валы приводов мерного цилиндра и барабана с ножом должны вращаться со строго заданным отношением скоростей, поддерживаемым с высокой точностью (допустимое отклонение длины отрезаемых листов в ± 2 мм может быть обеспечено при точности поддержания отношения скоростей меньше 0,2%).

Блок задания скоростей электроприводов предлагается реализовать на панели оператора Power Panel 100 фирмы В&R. Такая панель является одновременно центральным контроллером, устройством ввода данных и устройством визуализации и управления технологическим процессом. Панель с электроприводами соединяется по сети Ethernet.

С панели управления машины задаются производительность листорезальной машины (количество резов в минуту), которая определяется скоростью электропривода механизма резания, и длина отрезаемых листов (см). Программа определяет требуемые скорости работы электродвигателей с учетом заданных параметров и передаточных чисел электроприводов. Ограничивающим фактором является скорость движения ленты: для обеспечения точной укладки листов в стопу не должна превышать 2,0 м/с при размотке бумаги и 1,5 м/с при размотке картона. Поэтому для заданной с пульта длины отрезаемых листов

определяется максимальная производительность машины и вырабатывается запрет на ввод значения рабочей скорости выше допустимой.

Дополнительно блок реализует управляемый пуск электропривода мерного цилиндра, при котором рулон будет плавно разгоняться до рабочей скорости. Интенсивность разгона определяется временем разгона, которое так же задается с пульта управления.

При работе реальной машины имеет место проскальзывание бумаги на лентоведущих роликах и мерном цилиндре. Таким образом, в систему электропривода требуется дополнительно включить датчик скорости ленты, представляющий собой, например, измерительное колесо. Значение фактической скорости ленты является сигналом задания для электропривода резального механизма.

Настройка регуляторов и проверка работоспособности двухдвигательного электропривода листорезальной машины проводились путем имитационного моделирования в программе Simulink пакета Matlab 6.5. Модель subsystemы определения скоростей электроприводов приведена на рис. 1.

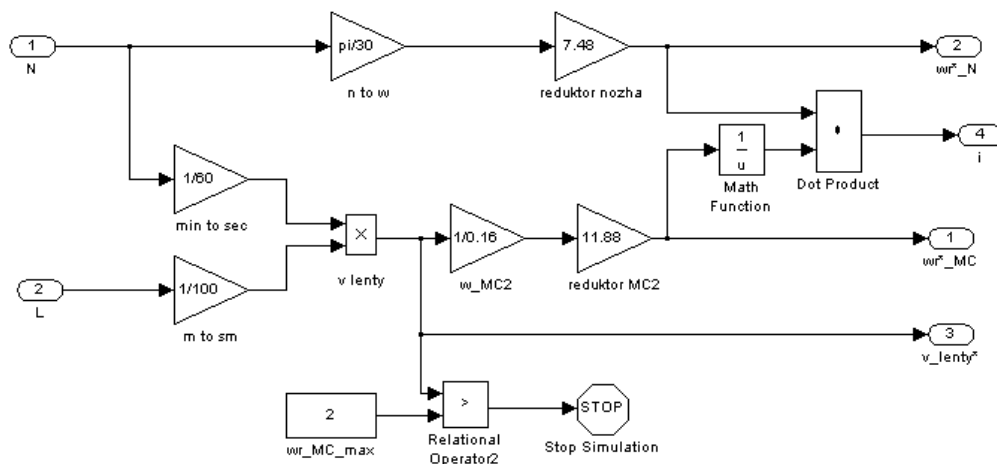


Рисунок 1 – Модель subsystemы определения скоростей электроприводов

Путем моделирования было установлено, что при заданных длине листа 60 см и производительности машины 120 рез/мин скорость движения ленты должна составлять 1,2 м/с (соответствует скорости ротора электропривода мерного цилиндра 89 c^{-1}), а отношение скоростей приводов механизма ножа и мерного цилиндра – 1,055.

Работа асинхронных электродвигателей со скалярными преобразователями частоты моделировалась оригинальными блоками. Выходные значения скоростей роторов соответствующих электроприводов являются входными сигналами для subsystemы, определяющей фактическую производительность листорезальной машины и размер получаемых листов. Так же в данной subsystemе при помощи стан-

дартного блока Simulink «Uniform Random Number» моделируются случайные отклонения скорости подачи ленты от окружной скорости мерного цилиндра. Модель subsystemы приведена на рис. 2.

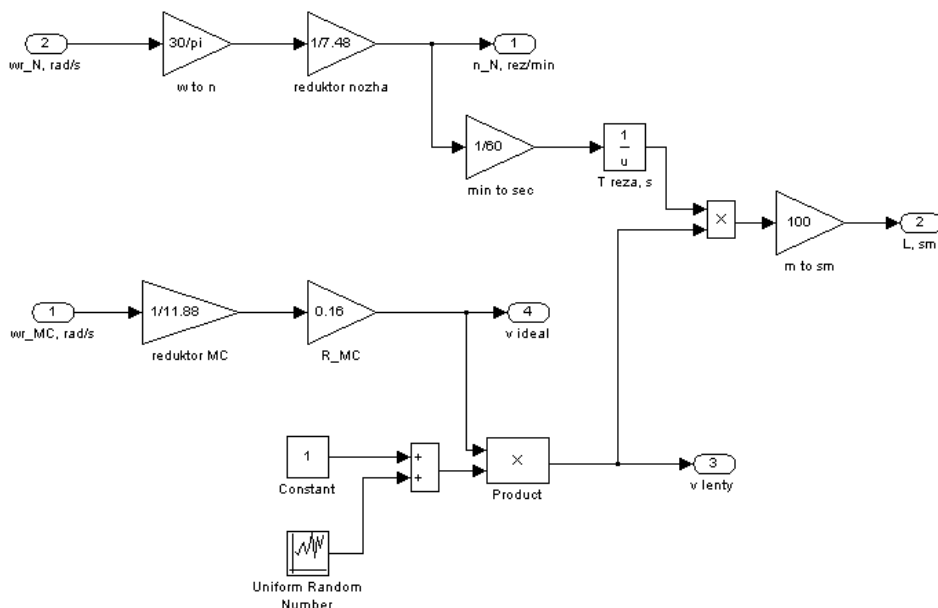


Рисунок 2 – Модель subsystemы для определения размера листа и производительности машины

Результаты моделирования работы системы двухдвигательного электропривода показали, что при требуемой производительности отклонения длины отрезаемых листов от заданного значения составляет $\pm 0,1$ мм при паспортном значении ± 2 мм.

Заключение. Разработана система двухдвигательного электропривода листорезальной машины, обеспечивающая требуемую величину отношения скоростей исполнительных механизмов, при которой точность резания превышает исходные паспортные значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Техническая документация на рулонную бумагорезальную машину 2ЛР2 – 120.
2. Анкуда, Д.А. Система управления «Электронный редуктор» для двухдвигательного электропривода листорезальной машины 2ЛР2–120. // Труды БГТУ. – 2014. – № 9: Издат. дело и полиграфия / БГТУ. – Минск, 2014. – С. 26–30.

УДК 681.5

И.И. Гируцкий¹, д-р.техн.наук., доц., В.В. Чумаков², канд.техн.наук
(¹БАТУ, ²РУП «НПЦ НАН Беларуси
по механизации сельского хозяйства», г. Минск)

ПОСТРОЕНИЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сложность создания систем автоматизации, будь это или новое производство, или модернизация устаревших систем управления действующими технологическими процессами и установками связана с отсутствием четкой постановки задачи, появлением новых условий и требований в процессе разработки и внедрения. Эти особенности привели к необходимости создать управляющее устройство, алгоритм работы которого можно было бы менять, не переделывая монтажную схему и аппарата управления. В результате возникла логичная идея заменить системы управления с «жесткой» логикой работы (совокупность реле, регуляторов, таймеров, счетчиков и т.п.) на автоматы с программно заданной логикой работы. Так родились программируемые логические контроллеры (ПЛК) – специализированные микро-ЭВМ, предназначенные для построения систем управления технологическими процессами и установками[1]. Для сельскохозяйственного производства, особенностью которого является наличие постоянно изменяющейся биологической составляющей, возможность оперативного изменения параметров и алгоритмов управления особенно актуально[2].

Микропроцессорные контроллеры различных производителей имеют унифицированную аппаратную структуры. Выбор контроллера конкретного производителя носит достаточно субъективный характер и связан с предыдущим опытом, полученной информацией или удобным сервисом. Схожесть аппаратных решений для входных и выходных модулей с стандартными наборами дискретных и аналоговых сигналов значительно упростило для разработчика задачу технического обеспечения будущей системы управления[3]. Поэтому появилась возможность унификации основных применяемых аппаратных средств, а основная тяжесть разработки переносится в синтез прикладного программного обеспечения и выбора соответствующих датчиков и исполнительных механизмов. Современные распределенные системы применяются для управления непрерывными и гибридными технологическими процессами, что характерно для современного сельского хозяйства, которые должны осуществляться днями и ночами без остановки на длительный период. Понятие «распределенная

система» применяется сегодня очень широко, независимо от того, идет ли речь о комплексах из нескольких машин или микропроцессорных системах различных архитектур.

Исходя из вышесказанного, можно выделить следующие требования к распределенным системам управления:

1. Отказоустойчивость и безопасность.
2. Простота разработки и конфигурирования.
3. Поддержка территориально распределенной архитектуры.
4. Единая конфигурационная база данных.
5. Развитый человеко-машинный интерфейс.

Разработка программ в любой автоматизированной системе, в том числе, а может быть, и в особенности для микропроцессорных систем управления технологическими процессами является базисом, определяющим эффективность и трудоемкость всей разработки. Статистика отечественных и зарубежных разработок показывает, что стоимость разработки программ составляет 40...60% всей разработки, включая стоимость технических средств. А эффективность функционирования информационно управляющей системы зависит от качества программного обеспечения на 70...80%. Столь высокие показатели постоянно привлекают внимание исследователей к проблемам программирования. При этом роль системы программирования, как элемента определяющего, прежде всего, трудоемкость создания прикладных программ постоянно возрастает. Существует два класса систем программирования – это универсальные типа CodeSys или IsaGraf и аппаратно-ориентированные, в качестве примера можно привести Step7 (Siemens) или Automation Studio (Bernecker & Rainer). Оба направления успешно развиваются, хотя, особенно для начинающего пользователя, определенные преимущества дают аппаратно-ориентированные системы программирования. Несмотря на значительное разнообразие систем программирования, стандарт МЭК 61131-3 определяет основные требования к языкам программирования контроллеров.

В качестве примера приведем несколько разработок унифицированных систем управления, осуществленных на базе панель-контроллеров общепромышленного применения PP-45 австрийской фирмы В&R с распределенными модулями ввода/вывода X20 и с аппаратно-ориентированной системой программирования Automation Studio.

Для сельского хозяйства классической задачей с использованием программируемых контроллеров для автоматизации раздачи кормов с использованием текущей информации о количестве, массе животных и(или) их продуктивности[2]. Примечательно, что внедрение

информационно-управляющих систем дает новую жизнь вроде перспективным технологиям. Для разработки программного обеспечения информационно-управляющей системы приготовления и раздачи жидких кормов на свиноводческом комплексе использован язык программирования Automation Basic (рис.1).



Рисунок 1 – Общий вид панели оператора системы управления раздачей жидких кормов на свиноводческом комплексе

Все большее внимание уделяется экономии энергоресурсов путем автоматизации систем теплоснабжения. Нами разработаны и введены в промышленную эксплуатацию интеллектуальные системы управления и учета теплоснабжения здания инновационного центра МГАУ и учебного корпуса энергетического факультета Ставропольского ГАУ(рис.2).

Рисунок 2 – Пример номосхемы управления теплоснабжением учебного корпуса



Программно-технический комплекс включает в себя панель – контроллер PP-35 австрийской фирмы В&R с общесистемным и прикладным программным обеспечением и персональный компьютер с операционной системой Microsoft XP и SCADA системой DateRate.

Применение программируемых контроллеров для систем управления микроклиматом позволяет в сжатые сроки осуществлять реконструкцию картофелехранилищ и осуществлять эффективную реализацию алгоритмов хранения картофеля с использованием естественного холода. Управляющая технологическая программа позволяет реализовать автоматически 4 базовых режима хранения картофеля: лечебный, охлаждения, хранения и предреализационной подготовки. Использование панель контроллеров позволяет реализовать дружественный интерфейс с пользователем (рис.3).

СУШКА			%Н:%М...				
Сушка			Хранение				
Вент. комната	Ткан	Ткарт	Вент. комната	Ткан	Ткарт		
1	Выкл	8.1	10.2	6	Выкл	8.5	9.5
2	Выкл	7.8	9.3	7	Выкл	8.0	8.9
3	Выкл	7.9	9.6	8	Выкл	8.7	11.1
4	Выкл	8.3	10.6	9	Выкл	7.8	9.1
5	Выкл	7.6	10.0	10	Выкл	8.2	9.4

Рисунок 3 – Окно задания и контроля параметров режимов автоматической сушки и хранения картофеля

Таким образом, современные программно-технические средства общепромышленного применения позволяют в сжатые сроки создавать эффективные информационно-управляющие системы сложными технологическими объектами сельскохозяйственного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цифровые системы автоматизации и управления [текст]/. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.
2. Гируцкий, И.И. Компьютеризированные системы управления в сельском хозяйстве/И.И. Гируцкий, А.Г. Сеньков.-Минск: БГАТУ, 2014.-212 с.
3. Пар Э. Программируемые контроллеры: руководство для инженера/Э. Пар; М.: Бином.- 516 с.

ОБ АВТОМАТИЗАЦИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ ВНУТРЕННИХ ВОЙСК

Проявление общих закономерностей процесса автоматизации управления в социально-экономических системах имеет свою специфику в различных сферах деятельности. Охрана общественного порядка и общественной безопасности относится к сфере деятельности правоохранительных органов, что накладывает особую специфику на процессы автоматизации. В отличие от производственной сферы, результаты нематериальной деятельности здесь не так очевидны: производимый продукт практически с трудом поддается количественному измерению, критерии эффективности не имеют четкого и однозначно понимаемого определения.

Немаловажную роль в системе управления подразделениями внутренних войск играет цифровая картографическая информация (ЦКИ). Любая используемая ЦКИ связана с цифровой моделью местности либо цифровой картой (цифровым планом), так как на них отображаются объекты и элементы объектов, представленные в цифровом формате и необходимые для оценки обстановки и принятия решения при управлении подразделениями внутренних войск.

Таким образом, для автоматизации управления подразделениями внутренних войск на ЦК необходимо отобразить определенные объекты, представляющие интерес не только для визуальной оценки обстановки, но и для выполнения в автоматизированном режиме расчетных задач. Кроме этого, описание задач управления подразделениями внутренних войск, является основой для создания автоматизированной системы управления (далее АСУ ВВ).

При автоматизации решения задачи «Оказание содействия органам внутренних дел в охране общественного порядка, обеспечении общественной безопасности» необходимо предусмотреть:

1. Отображение основных мест массового скопления граждан (магазины, кинотеатры, бары, рестораны и другие).
2. Отображение координат патрулей и зон видимости в текущий и заданный момент времени, а также отображение зон видимости патрулей в заданной точке маршрута (рисунок 1).
3. Отображение интегрированной зоны видимости всего маршрута патрулирования с временными отметками нахождения патруля на контрольных точках.

4. Построение маршрута патрулирования с учетом максимизации обобщенной (интегрированной) зоны видимости.

5. Отображение маршрутов патрулирования нарядов милиции и подразделений взаимодействующих структур (при массовых мероприятиях).

6. Построение вероятных маршрутов притока (оттока) скопления граждан при массовых мероприятиях, а так же в случаях проведения несанкционированных шествий и митингов с отображением местоположения наиболее рациональных участков (рубежей) перекрытия проходов (рисунок 2).

7. Поиск и отображение наиболее выгодных (удобных) позиций для контроля за обстановкой.

8. Выработка рекомендаций по выбору маршрутов движения патрульных групп (при осложнении обстановки), направляемых к месту происшествия. Маршруты должны строиться исходя из следующих критериев:

- минимум длины маршрута и времени прибытия к месту происшествия;

- минимум времени движения до момента визуального обнаружения объекта (правонарушителя, преступника и т.п.).



Рисунок 1 – Отображение на ЦКМ местоположения патрулей и их зон видимости на текущий момент времени t_0 в городских условиях

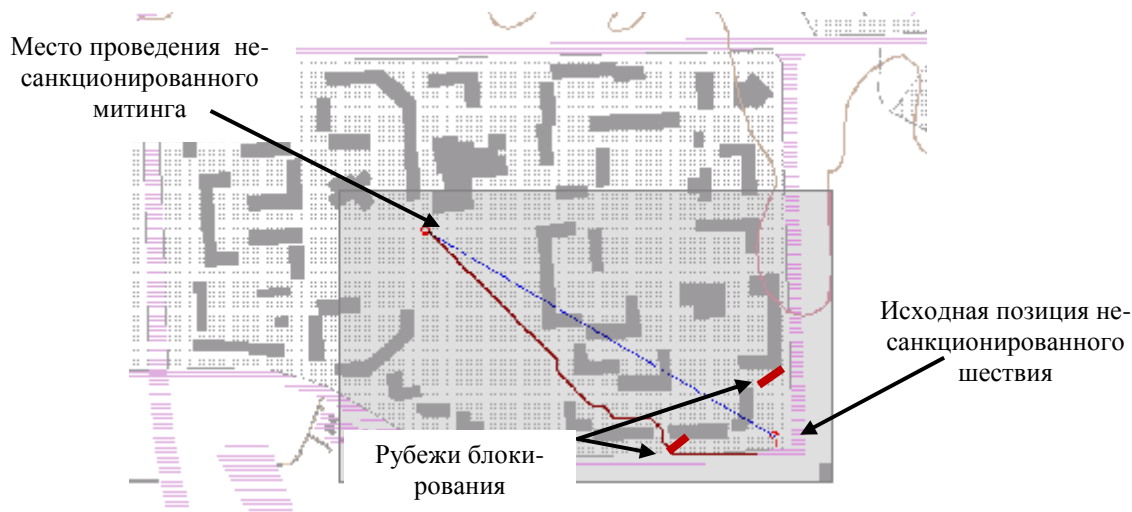


Рисунок 2 – Отображение на ЦКМ местоположения блокирования шествия на несанкционированный митинг

При автоматизации решения задачи «Охрана исправительных колоний и осуществление совместно с их администрациями надзора за осужденными» необходимо предусмотреть:

1. Отображение и контроль перемещения осужденных в локальных зонах, в производственной зоне и на объектах, находящихся вне исправительных учреждений.

2. Построение наиболее вероятных направлений и маршрута движения осужденного (осужденных) при совершении побега и др.

При автоматизации решения задачи «Конвоирование и охрана осужденных и лиц, содержащихся под стражей» необходимо предусмотреть:

1. Построение оптимального маршрута движения СТС с учетом дорожной обстановки (мин. расстояния; мин. времени нахождения в пути; мин. вероятности совершения побега).

2. Отображение вероятных мест совершения побега по выбранному маршруту (на обменном пункте) и построение вероятных направлений движения преступника и др.

При автоматизации решения задачи «Охрана особо важных государственных объектов и специальных грузов» необходимо предусмотреть:

1. Построение схемы опорных пунктов и позиций с учетом максимизации зон видимости, расчет наиболее оптимальных маршрутов выдвигания к ним с учетом времени года и погодных условий.

2. Построение системы огня и вероятных направлений нападения.

3. Отображение воздушных, подземных коммуникаций и водопроводящих (водоотводящих) каналов, выходящих за пределы запретной зоны и построение наиболее вероятных путей проникновения на охраняемый объект.

4. Построение рубежей блокирования (выставления заслонов, наблюдательных постов) и др.

При автоматизации решения задачи «Обезвреживание и уничтожение неразорвавшихся авиационных боеприпасов, других неразорвавшихся боеприпасов в населенных пунктах» необходимо предусмотреть:

1. Построение границ района, подлежащего оцеплению, определение координат объектов и участков местности, подлежащих эвакуации (в том числе и с учетом погодных условий).

2. Определение координат мест, наиболее подходящих для уничтожения ВУ и минимально удаленных от мест обнаружения с построением оптимальных маршрутов транспортировки.

При автоматизации решения задачи «Организация и выполнение служебно-боевых задач в условиях чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» необходимо предусмотреть:

1. Построение границ района проведения режимно-карантинных мероприятий при стихийных бедствиях, эпидемиях, эпизоотиях, крупных авариях с границами зон оцепления и блокирования

2. Определение координат наилучшего расположения КП, КПП въезда (выезда) в населенные пункты и на внешней границе района проведения режимно-карантинных мероприятий, дозоров, наблюдательных (сторожевых) постов.

3. Построение вероятных направлений несанкционированного проникновения в район проведения режимно-карантинных мероприятий.

4. Построение вероятных направлений и зон распространения отравляющих и других вредных веществ.

В заключении подчеркнем следующее: эффективность управления зависит от качества решений, принимаемых органом управления. Орган управления, несущий полную ответственность за принимаемые решения, в силу сложности и трудной предсказуемости возникающих перед ним в процессе выполнения боевых задач, нуждается в поддержке в принятии решений средствами автоматизации.

В.Л. Колесников, проф., д-р техн. наук;
П.П. Урбанович, проф., д-р техн. наук;
А.И. Бракович, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА ДВИГАТЕЛИ РАЗМАЛЫВАЮЩИХ МАШИН ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

При современной организации производства на бумажных фабриках процесс размола осуществляется на последовательно-параллельно соединенных размалывающих машинах [1]. Причем удельные давления (нагрузки) на двигатели мельниц, как правило, устанавливаются «вслепую», руководствуясь опытом и интуицией. Поэтому существует возможность и предпосылки для снижения энергозатрат, если нагрузки не подбирать, а вычислять.

Основной характеристикой эффективного использования электроэнергии является коэффициент мощности, который для размалывающих мельниц в среднем составляет 0,8. В общем случае, доводя нагрузки до номинальных, паспортных характеристик каждой мельницы и уменьшая продолжительность размола (снижая реактивную составляющую), можно добиться повышения эффективности использования электроэнергии. Между оптимальными и реальными затратами электроэнергии на размол существует значительный интервал, который возможно сократить путем оптимизации условий проведения процесса. Если так управлять системой, чтобы достигалось заданное качество продукции при минимально возможных затратах энергии, то это ликвидирует перерасход электроэнергии и позволит перейти на более высокий уровень организации процесса. Результаты процесса размола характеризуются двумя крайними показателями – степенью измельчения волокон целлюлозы вдоль и поперек.

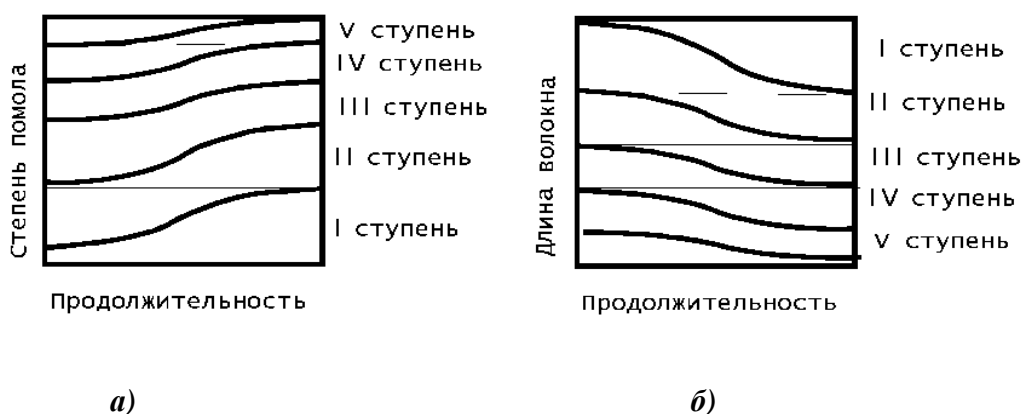
Чем выше степень помола длинных волокон, тем прочнее межволоконные связи в бумаге, но тем не равномернее по структуре бумажный лист. Из коротких волокон можно получить равномерный по структуре бумажный лист (с «молочным» просветом), но он не будет прочным. Поэтому для каждого вида бумаги должно существовать оптимальное соотношение между длиной волокна и степенью помола.

Энергетические затраты на размол целлюлозы с различными соотношениями степени помола и длины волокна, будут разными. К основным управляемым факторам относятся продолжительность и удельное давление при размоле. Концентрация массы является

вспомогательным управляющим фактором для регулирования процесса размола.

Известно, что изменение степени помола и длины волокна при размоле происходит по логистическим кривым [2]. Если бы разمول осуществлялся в одну ступень, то продолжительность размола определялась временем, необходимым для достижения конечных результатов на данном размалывающем оборудовании. При последовательном соединении нескольких машин заданные показатели качества размолотой массы будут складываться из времени пребывания суспензии в зоне размола на каждой мельнице.

Таким образом, математическая модель процесса размола должна описывать такую ситуацию, когда начальные параметры для последующей машины равны конечным параметрам предыдущей. Для степени помола должна быть выбрана модель с подвижной нижней асимптотой $G_{k,l}$ для длины волокна – с подвижной верхней асимптотой $L_{k,l}$. Характерный вид этих кривых представлен на рис.1.



а - логистическая модель степени помола массы с подвижной нижней асимптотой;
б - логистическая модель длины волокна с подвижной верхней асимптотой

Рисунок 1 – Графические образы логистических моделей процесса размола на машинах непрерывного действия

В эксперименте участвовали 5 факторов: x_1 – нагрузка на двигатели; $x_2 = G_{k,l}$ – степень помола, достигнутая на предыдущей мельнице; $X_3 = L_{k,l}$ – длина волокна, достигнутая на предыдущей мельнице; x_4 – концентрация массы при размоле; X_5 – текущая пропускная способность одной мельницы. Значение X_5 устанавливалось путем дросселирования массы на выходе. С помощью линеаризующих преобразующих соответствий получены математические модели:

$$z_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5); z_2 = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5); \quad (1)$$

$$G_k = G_{k-1} + \frac{(As^{\text{верхн.}} - G_{k-1}) \cdot e^{z_1}}{1 + e^{z_1}}; \quad (2)$$

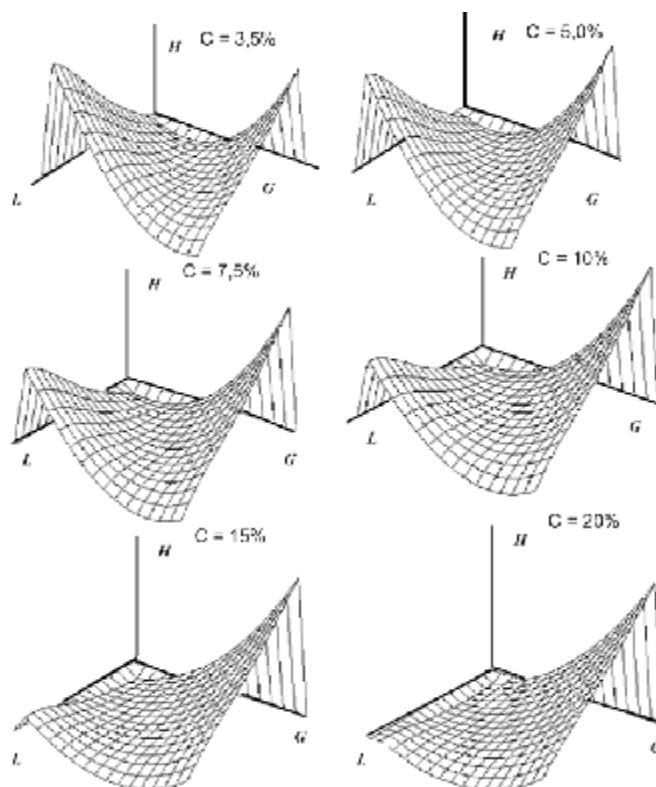
$$L_k = L_{k-1} + \frac{(L_{k-1} - As^{\text{нижн.}}) \cdot e^{z_2}}{1 + e^{z_2}}, \quad (3)$$

где k – номер мельницы; z_1 – аппроксимирующая полиномиальная зависимость степени помола от исследуемых факторов; z_2 – аппроксимирующая полиномиальная зависимость длины волокна от исследуемых факторов; $As^{\text{верхн.}}$ – значение верхней асимптоты для степени помола; $As^{\text{нижн.}}$ – значение нижней асимптоты для длины волокна.

Зависимость удельных расходов электроэнергии от управляющих переменных мало обсуждалась в специальной литературе, встречаются лишь данные об удельных расходах электроэнергии в зависимости от вида сырья (сульфатная целлюлоза беленая и небеленая, сульфитная целлюлоза, облагороженная и др.). Зависимости минимальных удельных расходов энергии для достижения бумажной массы, требуемых значений степени помола и длины волокна, не исследовались совсем.

Специфика настоящей работы заключается в том, что не только получены указанные логистические модели степени помола и длины волокна, но и методом Монте-Карло [2] решалась задача минимизации удельных расходов энергии для различных сочетаний значений степени помола и длины волокна. Трехмерные поверхности отклика (рис. 2) свидетельствуют о существовании области наименьших минимальных удельных расходов электроэнергии для различных видов бумаги, задаваемых характерными соотношениями длины волокна (L) и степени помола (G).

Минимальные удельные расходы энергии увеличиваются при получении волокнистой массы с длинными волокнами и высокой степенью помола. В этом случае затраты энергии идут в основном на расчесывание и продольное расщепление. При этих условиях достигается высокая прочность межволоконных связей, но имеется неоднородность структуры бумажного листа. Расход электроэнергии увеличивается в за счет увеличения продолжительности размола. Расход электроэнергии возрастает также при получении бумажного листа с однородным просветом. В этом случае преобладает процесс рубки волокон, и расход энергии возрастает за счет увеличения нагрузок на двигателя мельниц.



H - удельный расход электроэнергии, кВтч/(т°Ш-Р); L - длина волокна (весовой показатель), мг; G - степень помола, °Ш-Р

Рисунок 2 – Поверхности отклика минимальных удельных расходов электроэнергии при размоле одной тонны целлюлозы для различных видов бумаги на один градус Шоппер-Риглера и снижении весового показателя длины волокна на один дециграмм

В разбавленных суспензиях преимущественно идет процесс рубки волокна, то затраты на получение волокнистой массы с короткими волокнами в разбавленных суспензиях меньше, чем затраты на получение волокон таких же размеров в суспензиях более концентрированных при одинаковой степени помола, т. е. область малых расходов электроэнергии с ростом концентрации смещается в область высоких значений степени помола и длины волокна.

Особенность настоящей работы также и в том, что при определении минимальных расходов энергии осуществлялась оптимизация распределения нагрузок на двигатели всех мельниц, объединенных в последовательно-параллельную батарею. Причем автоматически генерировались и оценивались тысячи вариантов сочетаний нагрузок в пределах области факторного пространства, а также автоматически добавлялись мельницы, как при последовательном, так и параллельном их включении с определением необходимого количества параллельных цепочек на каждой стадии. Кроме того, оценка вариантов

распределе-ния нагрузок осуществлялась с учетом различных концен-траций массы при размоле и производительности размольно-подготовительного отдела. В результате определялось число мельниц, степень дросселиро-вания массы на выходе, число ступеней размола с разной concentra-цией, а также количество линий параллельно вклю-ченных батарей, обеспечивающих заданные значения про-изводительности отдела, степени помола и длины волокна, минимизи-рующих расход энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черная, Н. В., Технология производства бумаги и картона: учеб. пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности «Химическая технология переработки древесины» / Н.В. Черная, В.Л. Колесников, Н.В. Жолнерович. Минск : БГТУ, 2013. Колесников, В. Л. Системный анализ производственных процессов в полиграфии / В. Л. Колесников. Минск : БГТУ, 2011.

УДК 681.5

С.И. Немирович, студент; А.Г. Сеньков, доц., канд.техн.наук.,
(БГАТУ, г. Минск)

КОМПЬЮТЕРНАЯ НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА В САР С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Современные программные пакеты для численного моделиро-вания динамических систем предоставляют инженерам весьма широ-кие возможности для решения задач синтеза систем автоматического управления. В данной работе на примере системы автоматического регулирования температуры в помещении показана возможность ис-пользования пакета компьютерного моделирования Simulink для ре-шения задачи синтеза системы автоматического регулирования (САР) с комбинированным управлением [1].

В качестве объекта регулирования использовался лабораторный учебный сушильный шкаф «ШСУ», имеющий объем сушильной ка-меры 10 л. Управляемой величиной являлась температура внутри шкафа θ [°C]. Управляющее воздействие на объект – изменение мощ-ности электронагревателя P , [Вт]. Основное возмущающее воздей-ствие – изменение наружной температуры θ_{ext} , [°C].

Передаточные функции объекта по управляющему и возмуща-ющему воздействиям приближенно представлялись апериодическим звеном 1-го порядка [2, 3]:

$$W_{obj}^u(s) = \frac{q(s)}{P(s)} = \frac{K}{T \times s + 1}, \quad (1)$$

$$W_{obj}^F(s) = \frac{q(s)}{q_{ext}(s)} = \frac{1}{T \times s + 1}, \quad (2)$$

где T – постоянная времени, [с];

K – коэффициент преобразования управляющего воздействия на объект, [°C/Вт].

На рис. 1 показана созданная в Simulink динамическая модель САР температуры в помещении.

Для улучшения качества регулирования САР при изменении возмущающего воздействия предлагается использовать комбинированный принцип управления. Компенсация возмущающего воздействия достигается за счет введения в структуру САР датчика наружной температуры и дополнительного ПИД-регулятора (по возмущению).

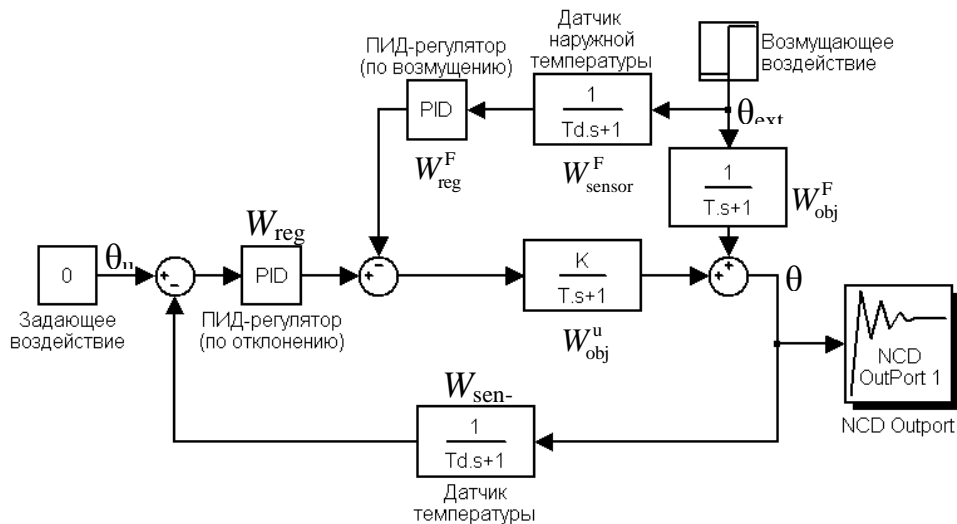


Рисунок 1 – Динамическая компьютерная Simulink-модель САР температуры в помещении

Передаточные функции обоих датчиков температуры (сенсоров), в качестве которых могут использоваться, например, термосопротивления, описываются апериодическим звеном 1-го порядка [3]:

$$W_{\text{sensor}}(s) = W_{\text{sensor}}^F(s) = \frac{1}{T_{\text{sensor}} \times s + 1}, \quad (3)$$

где T_{sensor} – постоянная времени датчика, [с].

Как следует из приведенной на рис. 1 структурной схемы САР, передаточная функция САР по возмущающему воздействию равна:

$$W^F(s) = \frac{W_{\text{obj}}^F - W_{\text{sens}}^F \times W_{\text{reg}}^F \times W_{\text{obj}}^u}{1 + W_{\text{sens}}^F \times W_{\text{reg}}^F \times W_{\text{obj}}^u}.$$

Параметры ПИД-регулятора по отклонению K_p, K_i, K_d , таким образом, определяют значения корней характеристического уравнения САР, а, следовательно, такие показатели качества регулирования, как устойчивость, запас устойчивости, колебательность. Поэтому настройка значений параметров K_p, K_i, K_d может быть выполнена как по возмущающему, так и по задающему воздействию САР. Однако с учетом наличия цепи компенсации возмущающего воздействия, имеет смысл выполнять настройку параметров K_p, K_i, K_d ПИД-регулятора по отклонению по задающему воздействию. Для этого можно использовать входящий в состав пакета Simulink компонент NCD Outport, реализующий графический интерфейс для настройки параметров динамических систем [1].

Передаточная функция регулятора по возмущению определяется, исходя из соотношения:

$$W_{\text{obj}}^F - W_{\text{sens}}^F \times W_{\text{reg}}^F \times W_{\text{obj}}^u = 0.$$

Таким образом, с учетом (1) – (3) получается следующее:

$$W_{\text{reg}}^F = \frac{T_{\text{sensor}} \times s + 1}{K}. \quad (4)$$

Передаточная функция (4) может быть реализована с использованием еще одного ПИД-регулятора (на рис. 1 – по возмущению):

$$W_{\text{reg}}^F = K_p^F + K_i^F \times \frac{1}{s} + K_d^F \times s,$$

где значения коэффициентов равны:

$$K_p^F = 1/K;$$

$$K_i^F = 0;$$

$$K_d^F = T_{\text{sensor}}/K.$$

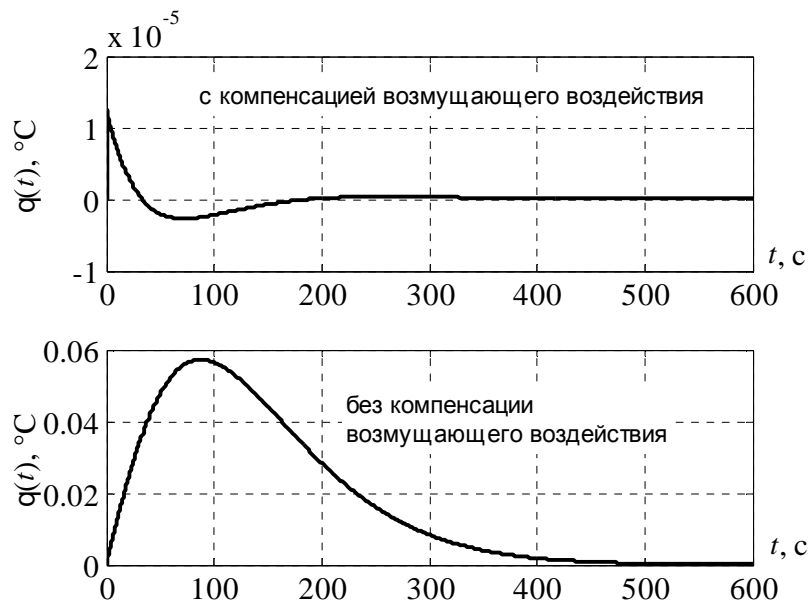


Рисунок 2 – Переходные функции САР по возмущающему воздействию, полученные путем численного моделирования в Simulink

Для сравнения на рис. 2 показаны переходные функции САР по возмущающему воздействию при использовании комбинированного регулирования (с дополнительной компенсацией возмущающего воздействия) и при использовании регулирования только по отклонению.

Как видно из рис. 2, использование комбинированного управления позволяет значительно улучшить качество регулирования системы при изменении возмущающего воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ощепков А.Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB: Учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 208 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
2. Сотников А.Г. Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отделение), 1984. 240 с., ил.
3. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования, издание третье, исправленное. Бесекерский В.А., Попов Е.П., издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М., 1975, 768 стр.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ С ТРАНСПОРТНЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к системам управления с запаздыванием всегда был и остаётся на достаточно высоком уровне. Большинство производственных процессов обладают запаздыванием, влияние которого на динамические свойства системы весьма велико. В ряде случаев запаздывание является принципиальным свойством объекта, что требует его учета при анализе динамических свойств объекта. К таким объектам относятся всевозможные транспортёры или объекты, построенные по аналогичному принципу[1].

2. ВЫБОР МЕТОДОВ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ

В настоящее время существует масса способов настройки регуляторов для различных объектов управления. Наиболее интересными для данного исследования являются такие методы как:

- метод Циглера-Никольса;
- метод Чена-Кронеса-Ресвика (CHR);
- метод Коэна-Куна (Cohen-Coon method).

Выбранные методы относятся к классу параметрических методов [2], широко применяемых на практике. Смысл этих методов заключается в формальном определении коэффициентов регулятора по динамическим характеристикам объекта управления.

3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для практического исследования методов настройки ПИД-регулятора для данного класса систем была создана система автоматического регулирования уровня жидкости, содержащая протяженный трубопровод, представляющий собой звено чистого запаздывания. Функциональная схема объекта представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Функциональная схема объекта управления

Из емкости 2 насосом 8 жидкость перекачивается в ёмкость 1 по трубопроводу 4 и сливается через вентиль 5. Уровень в основной ёмкости измеряется датчиком 3. Результат измерений поступает в регулятор 6, который формирует аналоговый выходной сигнал 4...20 мА. Выходной сигнал поступает на частотный преобразователь, управляющий производительностью насоса.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДОВ

Настройка коэффициентов регуляторов выполняется на основании переходной характеристики объекта, способ получения которой авторами достаточно подробно описан в [3]. Переходная характеристика представляет собой апериодическое звено первого порядка с запаздыванием. Передаточная функция объекта имеет следующий вид

$$W(s) = \frac{1}{47s + 1} \cdot e^{-55s}.$$

Графики переходных процессов регулирования уровня для различных методов представлены на рисунках 2 – 4. Следует признать, что ни один из предложенных формальных методов не даёт оптимальных настроек регуляторов. Для сравнительного анализа методов настройки выбраны показатели качества:

- перерегулирование;
- время переходного процесса.

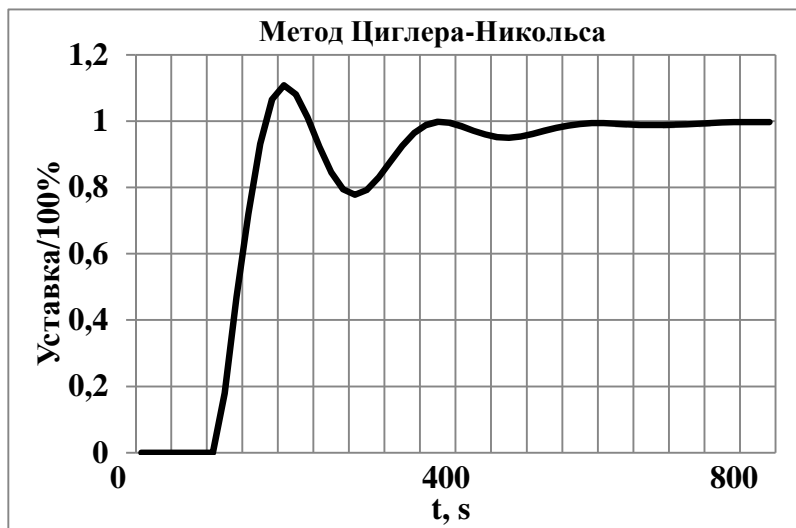


Рисунок 2– Метод Циглера-Никольса

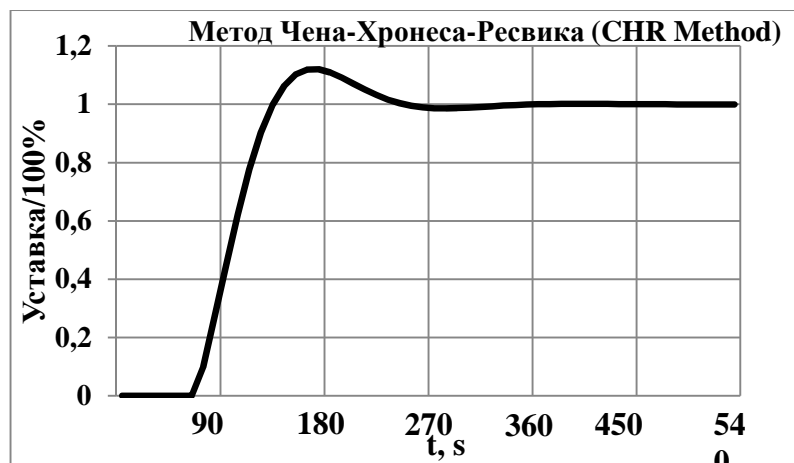


Рисунок 3– Метод CHR

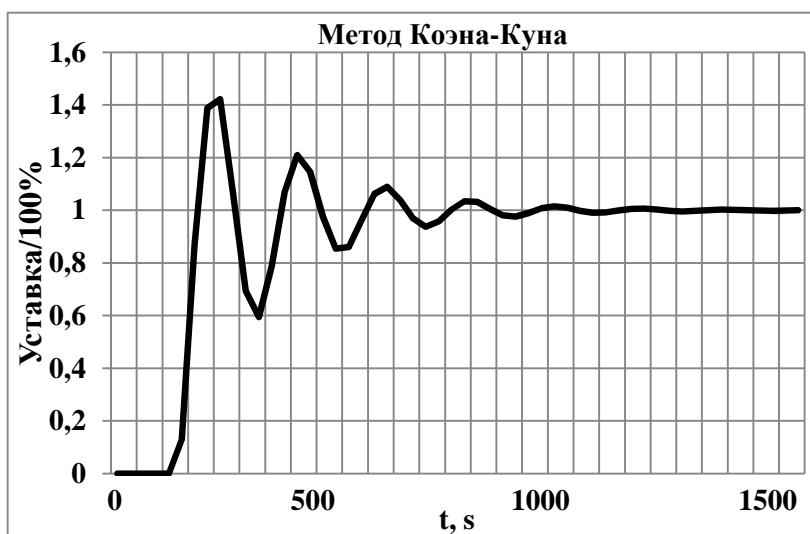


Рисунок 4– Метод Коэна-Куна

Анализ полученных переходных процессов позволяет сделать следующие выводы.

1. Использование метода CHR для настройки коэффициентов регулятора позволяет получить наименьшее перерегулирование ($\sigma = 12,2\%$) при наименьшем времени регулирования ($t_p \approx 200$ с).

2. Использовании метода Циглера-Никольса позволяет получить также приемлемое качество регулирования, однако процесс более колебательный и время регулирования значительно больше ($t_p \approx 500$ с).

3. Переходный процесс, полученный с помощью метода Козна-Куна характеризуется крайне высокой степенью колебательности и наибольшим перерегулированием.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ методов настройки регуляторов для данного класса систем показал, что наибольшее качество регулирования обеспечивает метод CHR. Метод Циглера-Никольса также дает относительно приемлемый результат. Результат, полученный методом Козна-Куна без дополнительной настройки не рекомендуется использовать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. Пер. с польского М., «Машиностроение», 1974, 328 с.

2. Silva, G.J., 1973-PIDcontrollersfortime-delaysystems/ G.J. Silva, A. Datta, S.P. Bhattacharyya. p.cm. – (Control engineering).

3. Курганов В. В., Цавнин А. В. Управление объектом с запаздыванием // Автоматика и программная инженерия. - 2015. - №2. - С. 9-13.

Т.А. Дворникова, магистрант, техник-технолог
(НИ ТПУ, АО «НПЦ «Полюс», г. Томск)

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НАНЕСЕНИЯ ПАЯЛЬНОЙ ПАСТЫ НА ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОЦЕСС ДОЗИРОВАНИЯ

Одним из важнейших технологических материалов, применяемых при поверхностном монтаже, является паяльная паста, представляющая собой смесь порошкообразного припоя с органическими наполнителями, включающими флюс. Помимо обеспечения процесса пайки припоем и подготовки поверхностей компонентов паста выполняет задачу фиксирования компонентов до пайки благодаря своим клеящим свойствам.

Наибольшее распространение получили два метода нанесения паяльной пасты – дозирование и трафаретная печать [1].

Для нанесения паяльной пасты на печатную плату (ПП) дозированием используется автоматический дозатор или в случае ремонта сборочных единиц или изготовления экспериментальных образцов может быть использован ручной дозатор. Основным преимуществом дозирования является простота переналадки оборудования и отсутствие необходимости изготовления трафарета.

Работы проводились на автомате дозирования серии DispenseMate® 585, предназначенном для нанесения различных видов технологических материалов (паяльные пасты, клеи и др.).

Основной принцип работы дозаторов: под действием сжатого воздуха или шнека паста выдавливается через иглу на поверхность контактных площадок (КП). Объем наносимой дозы паяльной пасты зависит от внутреннего диаметра иглы, величины прилагаемого давления и длительности импульса давления. Диаметр иглы выбирается в зависимости от размеров КП и размера частиц припоя в пасте. При задании параметров нанесения пасты необходимо учитывать, что доза пасты должна быть достаточной для заполнения КП на 70 – 80 % [2].

Наиболее часто использующиеся припои представляют собой сплавы олова (Sn), свинца (Pb) и серебра (Ag). Сплав в соотношении 62, 36 и 2 % соответственно обозначается Sn62 (Sn62/Pb36/Ag2) и имеет температуру плавления 179 °С. Серебро добавляют для улучшения прочности паяного соединения и для уменьшения эффекта «растворения примесей», при котором жидкое олово растворяет серебро, содержащееся на КП элементов, что влечет повышение хрупкости соединения [3].

Паста Sn62 NC-SMQ90 сохраняет свои свойства во время срока годности при хранении в закрытой индивидуальной таре при температуре 0- 10 °С. Перед применением пасту необходимо выдержать при комнатной температуре 2- 4 ч. Использование холодной паяльной пасты приводит к разбрызгиванию припоя и «холодной» пайке. При хранении и транспортировании паяльной пасты, расфасованной в шприцы, она должна располагаться наконечником вниз для предотвращения расслоения пасты [4].

Для нанесения пасты на КП плата устанавливается и закрепляется на платформе дозатора. Затем оператор пишет программу для нанесения пасты, указывая координаты реперного знака ПП и выбирая опытным путем количество пасты, которое будет нанесено на каждую КП.

После запуска программы дозатор автоматически наносит пасту. Результат дозирования оценивается визуально с помощью встроенной в автомат дозирования камеры. Если качество нанесения оказалось неудовлетворительным или количество нанесенной пасты – недостаточным для образования качественного соединения, в программу вносятся корректировки.

Конструктивные требования к изготовлению ПП:

- ПП должны иметь защитную паяльную маску;
- лужение КП должно выполняться после нанесения защитной маски;
- прогибы и коробления ПП не должны выходить за пределы требований ГОСТ Р МЭК 61191-1, ГОСТ Р 53429-2009;
- ПП должны иметь реперные знаки;
- облуживание КП должно быть равномерным и не должно быть излишков припоя;
- КП должны соответствовать размерам контактных поверхностей компонентов в соответствии с технологическими рекомендациями и требованиями технических условий на электрорадиоизделие;
- ПП, установленные на металлическое основание или корпус для улучшения отвода тепла, должны быть припрессованы или механически закреплены;
- должны быть оговорены зоны, не занятые монтажом, куда невозможно нанести паяльную пасту автоматически;
- элементная база должна быть пригодна для поверхностного монтажа конвекционным методом.

При соблюдении вышеуказанных требований обеспечивается качественное изготовление ПП (рисунок 1).

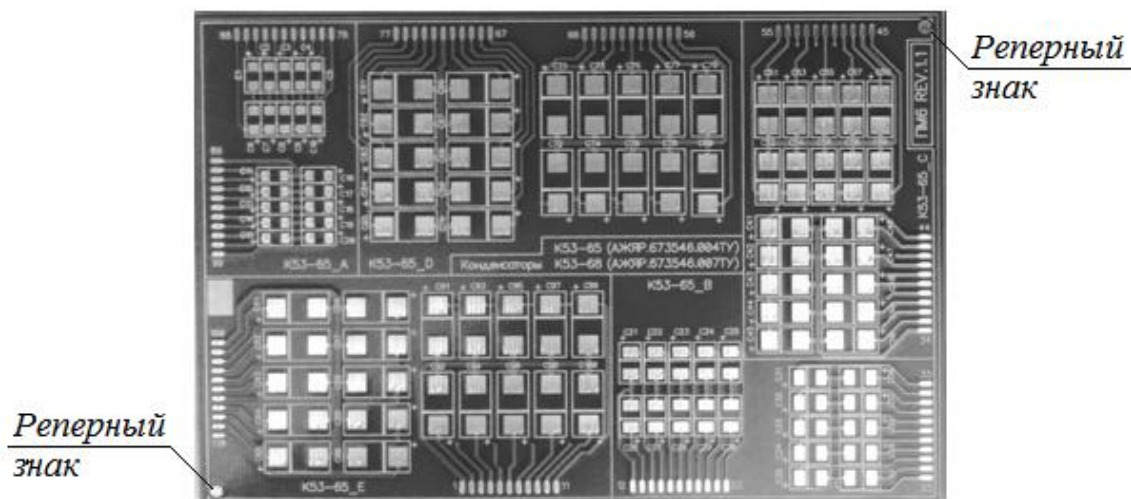


Рисунок 1 – ПП для монтажа конденсаторов К53-65

Количество паяльной пасты должно лежать в определенных пределах (рисунок 2). Нижний предел (минимально допустимое количество пасты) определяется слишком тонким слоем припоя в паяном соединении и отсутствием электрического контакта, верхний предел (максимально допустимое количество пасты) – образованием перемычек и шариков припоя в процессе пайки. Таким образом, количество наносимой пасты определяет качество паяного соединения [1].

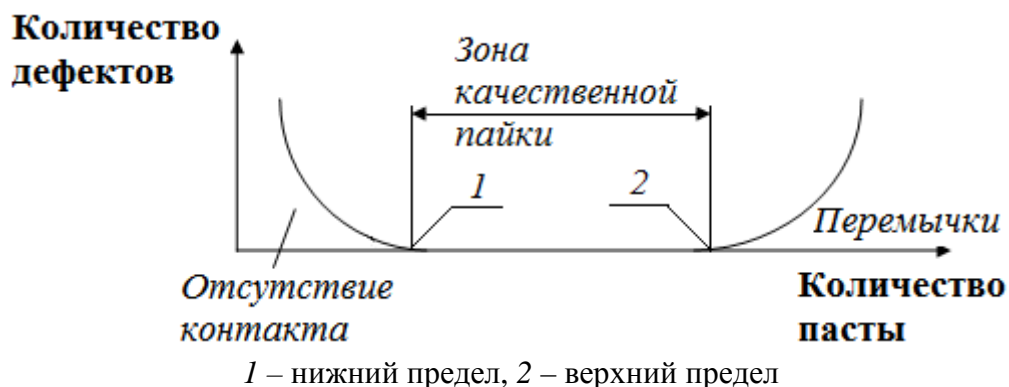


Рисунок 2 – Зависимость количества дефектов от количества пасты

Для получения качественного паяного соединения необходимо провести контроль нанесения пасты на КП:

- паста должна быть нанесена с соблюдением всех требований конструкторской документации;
- доза пасты должна быть достаточной для заполнения КП на 70 – 80 % ;

- время жизни паяльной пасты после нанесения составляет 24 ч;
- ПП должна быть изготовлена в соответствии с конструктивными требованиями.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что при соблюдении всех указанных в данной работе требований достигается качественное выполнение технологического процесса изготовления сборочных единиц с применением ПП (рисунок 3).

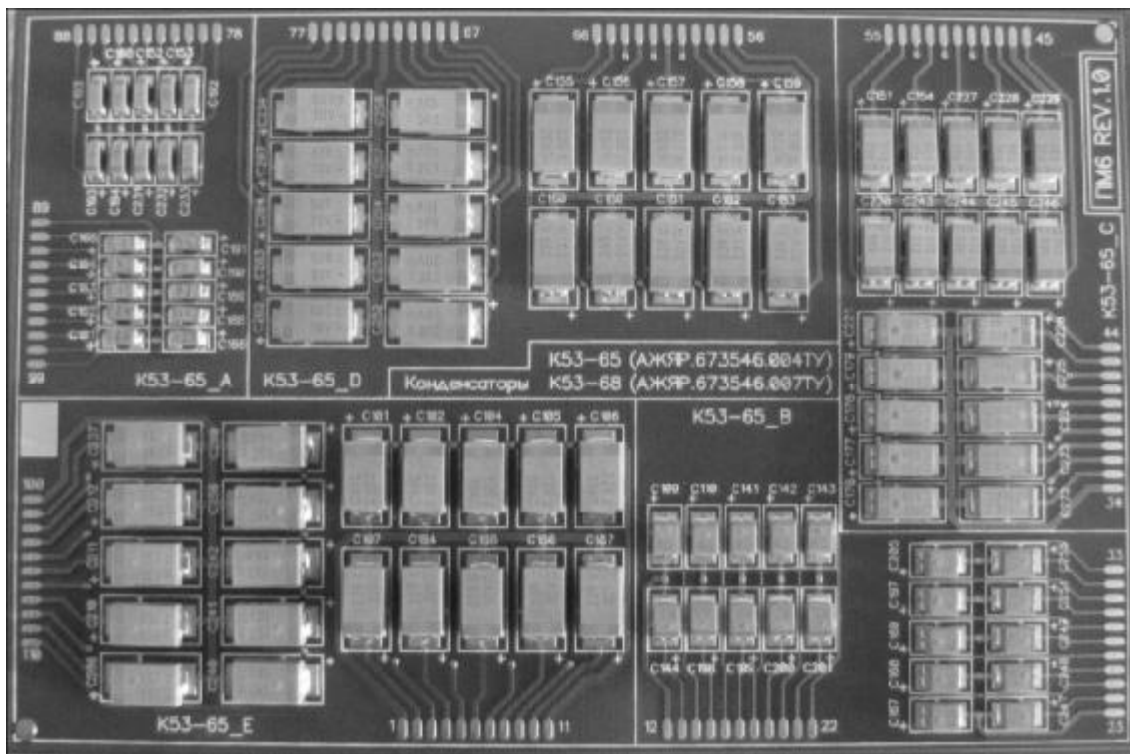


Рисунок 3 – Смонтированная сборочная единица

ЛИТЕРАТУРА

1. Введение в технологию поверхностного монтажа. Учебное пособие / ЗАО «Предприятие Остек». М., 2005.
2. Отчет об отработке технологии поверхностного монтажа / АО «НПЦ «Полнос». ЕИЖА.3000007.015. Томск, 2014.
3. Сускин В.В. Основы технологии поверхностного монтажа. Рязань : Узорочье, 2001.
4. Паяльные пасты Indium : технические условия / ЗАО «Предприятие Остек». 26300-101-07518266 ТУ. М., 2011.

Кузьмицкий И.Ф., доц., канд. техн. наук
 Григорьев Л.И., проф., д-р техн. наук
 (БГТУ Минск, РГУ нефти и газа, Москва)

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С АВТОМАТИЧЕСКИ МЕНЯЮЩИМИСЯ ЦЕЛЯМИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ПАРАМЕТРОВ

Развитие систем автоматического управления происходит в разных плоскостях, но это наиболее очевидно в области использования компьютерных устройств. Компьютеризация систем автоматического управления затронула все технические элементы: регуляторы, исполнительные устройства, различного рода преобразователи и устройства измерения технологических параметров.

Наименьшая доля интеллектуализации средств автоматики, как ни странно оказалась у регуляторов. По оценкам, в настоящее время более 50 % систем автоматического управления технологическими процессами реализуют типовые законы регулирования (П-, ПИ-, ПИД-регулирование). На разных этапах протекания технологических процессов проявляются свои особенности, явления, промежуточные внутренние реакции и различные возмущающие воздействия.

Для снижения влияния этих факторов на качественные и количественные показатели выходных параметров необходимо соответственно менять цели системы управления.

При условии неопределенности параметров объектов управления возникают проблемы формирования алгоритмов адаптивного управления, которые также целесообразно трансформировать с учетом соответствующих показателей качества.

На основе изложенного можно выделить несколько целей и алгоритмов управления сложными технологическими процессами.

При неопределенности параметров в качестве первого приближения можно выбрать эталонную модель в виде

$$\dot{X}_{\text{эт}} = f(X_{\text{эт}}, X_{\text{жел}}, t)$$

и сформировать адаптивное управление [1]

$$U(t) = \varphi \left((X_{\text{эт}} - X), (X_{\text{эт}} - \dot{X}), X_{\text{жел}}, \gamma, t \right),$$

где $X_{\text{эт}}$ – переменные состояния эталонной модели, $X_{\text{жел}}$ – задание, X, \dot{X} – переменные состояния объекта управления, U – управляющее воздействие, γ – коэффициент коррекции воздействия из условий устойчивости.

В качестве второй цели ставим задачу идентификации динамических характеристик объекта управления. В качестве алгоритма идентификации можно принять интегральную модель

$$X(t) = \int_0^t q(t, \tau) U(\tau) d\tau + \int_0^t \int q(t, \tau, \tau_1) U(\tau) U(\tau_1) d\tau d\tau_1,$$

или

$$X(t) = \int_0^t q(t, \tau) U(\tau - x) d\tau + \int_0^t \int q(t, \tau, \tau_1) U(\tau - x) U(\tau_1 - x) d\tau d\tau_1$$

где $q(t, \tau)$, $q(t, \tau, \tau_1)$ – искомые весовые функции, x – время запаздывания воздействия.

Регуляризацию решения выполним методом Тихонова или на основе усеченных рядов Вольтера-Лаггера [2].

Важно решить задачу синтеза наблюдателя состояния нелинейной системы при внешних возмущениях. Модель внешних возмущений обычно неизвестна. Можно разделить задачу на несколько подзадач меньшей размерности с разнотемповыми движениями.

При идентификации на основе рядов Вольтера-Лаггера используются фильтры, которые можно использовать также для оценки линейных комбинаций внешних возмущений. Фильтры являются динамическим компенсатором возмущений $h(t)$. Наличие внешних возмущений может привести к уменьшению наблюдаемости подпространства вектора состояния.

В качестве фильтров обычно используются аperiodические звенья первого порядка, что позволяет оценить возмущения в виде линейных составляющих Z относительно переменных состояния $S(t)$

$$\dot{S} = h(s, u) + Zh(t)$$

и

$$X = h_y(s, u)$$

Можно расщепить первое уравнение на два уравнения с помощью перестановки компонент так, чтобы правая часть дифференциальных уравнений относительно возмущений $h(t)$ стала независимой от них.

В качестве третьей цели формулируем задачу достижения наиболее высокого показателя качества технологического процесса при ограничении затрат на управление

$$J = y(X, X_{\text{жел}}, U, t)$$

В качестве следующей цели выступает алгоритм нахождения оптимального закона управления [1].

На каждом этапе управления необходимо решать задачи устойчивости. Как для дифференциальных уравнений без отклонений аргумента, так и для систем с запаздыванием можно воспользоваться под-

ходами на основе прямого метода Ляпунова. Одна из наиболее сложных проблем для практического приложения состоит в нахождении области притяжения невозмущенного решения.

Обычно поиск требуемой функции Ляпунова, Ляпунова-Разумихина осуществляется среди квадратичных форм с матрицей, удовлетворяющей неравенству Ляпунова для некоторой системы без запаздывания. Если выбран алгоритм закона управления, то модель системы управления можно свести к неоднородному дифференциальному уравнению [3]

$$\dot{X} = y(x(t), x(t - \tau)), \quad x \in G \subset R^h$$

функция $x(t)$ удовлетворяет условию

$$0 \leq x(t) \leq h \text{ при } t \in [t_0, \infty]$$

функция $y(x, y)$ непрерывно дифференцируемая в точках $x = y = 0$.

В этом случае можно записать

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bx(t - \tau) + F(x(t), X(t - \tau)),$$

где

$$A = \left. \frac{\partial y(x, y)}{\partial x} \right|_{x=y=0}, \quad B = \left. \frac{\partial y(x, y)}{\partial y} \right|_{x=y=0},$$

а $F(x, y)$ удовлетворяет условию

$$\lim_{(x, y) \rightarrow (0, 0)} \frac{F(x, y)}{\sqrt{|x|^2 + |y|^2}} = 0.$$

Тогда согласно [3] существует матрица $L = L^T > 0$ и неравенство

$$r^2L + r(LA^T + AL) + AL + BLB^T < 0$$

из которого можно найти нижнее значение скалярного параметра r для функции Ляпунова-Разумихина

$$u(x) = x^T P x \text{ при } P = L^{-1}$$

Для реализации систем с такими целями необходимо использовать многоядерный процессор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмицкий, И.Ф. Теория автоматического управления / И.Ф. Кузьмицкий, Г.Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2010. – 574 с.

2. Кузьмицкий, И.Ф. Особенности идентификации динамики химических реакторов на основе рядов Вольтера / И.Ф. Кузьмицкий, И.В. Акиншева, И. Караскель // Труды БГТУ. Сер. VI, физ.-мат. науки и информатика, 2012. Вып. 153. С. 113 – 118.

3. Горбунов, А.В. Метод функций Ляпунова для построения областей притяжения систем с запаздыванием / А.В. Горбунов, В.А. Каменецкий. АиТ, 2015. № 10, с. 42 – 53.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА БАЗЕ NEURAL NETWORK TOOLBOX СИСТЕМЫ MATLAB

Системы управления на основе нейронных сетей относятся к классу нелинейных динамических систем. В составе таких систем искусственная нейронная сеть может выполнять различные функции: диагностику технологического оборудования, управление подвижными объектами и технологическими процессами, прогнозирование ситуаций, оценку состояния и мониторинг технологических процессов и многое другое [1,2].

В данной работе предлагается рассмотреть два типа подобных систем управления реализованных на базе Neural Network Toolbox системы MATLAB, это NN Predictive Controller (нейросетевой регулятор с предсказанием) и NARMA-L2 Controller (нейросетевой регулятор на основе нелинейной авторегрессионной модели со скользящим средним) [3].

В качестве объекта управления рассмотрим нелинейный объект состоящий из двух динамических звеньев первого и второго порядка и нелинейного элемента – насыщение. Сигнал задания – единичное скачкообразное воздействие.

Нейросетевой регулятор с предсказанием использует модель нелинейного управляемого процесса в виде нейронной сети для того, чтобы предсказывать его будущее поведение. Кроме того, регулятор вычисляет сигнал управления, который оптимизирует поведение объекта на заданном интервале времени.

Нейронная сеть регулятора управляемого процесса представлена на рисунке 1. Она имеет 2 слоя нейронов и использует линии задержки (ЛЗ), чтобы запомнить предшествующие значения входов и выходов процесса с целью предсказать будущие значения выхода.

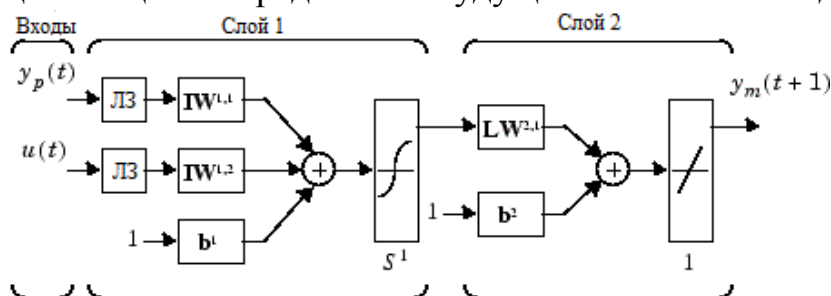


Рисунок 1 – Нейронная сеть регулятор с предсказанием

Управление с предсказанием использует принцип предсказания реакцию объекта управления на определенном интервале времени в будущем. Предсказания используются программой численной оптимизации для того, чтобы вычислить управляющий сигнал, который минимизирует следующий критерий качества управления:

$$J = \sum_{j=N1}^{N2} (y_r(t+j) - y_m(t+j))^2 + p \sum_{j=1}^{Nu} (u'(t+j-1) - u'(t+j-2))^2, \quad (1)$$

где константы $N1$, $N2$ и Nu задают пределы, внутри которых вычисляются ошибка слежения и мощность управляющего сигнала. Переменная u' описывает пробный управляющий сигнал, y_r – желаемая, а y_m – истинная реакция модели управляемого процесса. Величина p определяет вклад, который вносит мощность управления в критерий качества.

Нейросетевой регулятор с предсказанием состоит из нейросетевой модели управляемого процесса и блока оптимизации. Блок оптимизации определяет значения u' , которые минимизируют критерий качества управления.

По результатам моделирования системы нейросетевого управления с регулятором с предсказанием в системе Simulink можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее существенно на качество процесса управления влияют параметры $N2$ и Nu блока Neural Network Predictive Control. С увеличением значений этих параметров критерии качества системы управления значительно улучшаются.

2. При проведении процедуры идентификации объекта управления увеличение размера скрытого слоя нейронной сети (количества используемых нейронов) и количества элементов запаздывания на входе и выходе нейросетевой модели объекта управления не оказывает существенного влияния на качество идентификации.

При моделировании были приняты параметры, представленные на рисунке 2 .

Переходные характеристики объекта управления и нейросетевой системы управления с регулятором с предсказанием представлена на рисунке 3. Время регулирования в данном случае составило 14 секунд, перерегулирование – 4.4 %.

Второй рассматриваемой нейросетевой системой является система с нейросетевым регулятором на основе нелинейной авторегрессионной модели со скользящим средним. Модель данной системы является дискретной и имеет следующий вид:

$y(k + d) = f[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)] +$
 $+ g[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)]u(k),$
 где $y(k)$ – выход нейросетевой модели; d – число тактов предсказания;
 $u(k)$ – вход нейросетевой модели.

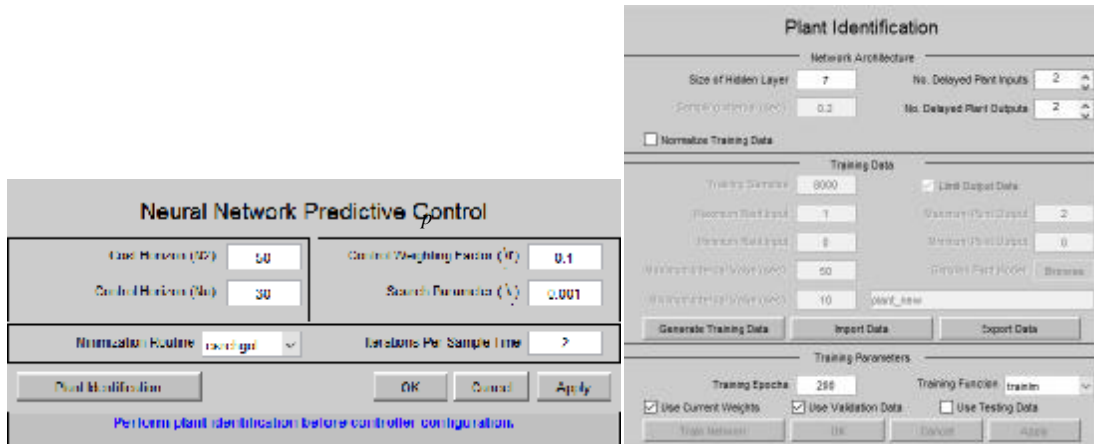


Рисунок 2 – Параметры нейросетевой системы управления с регулятором с предсказанием

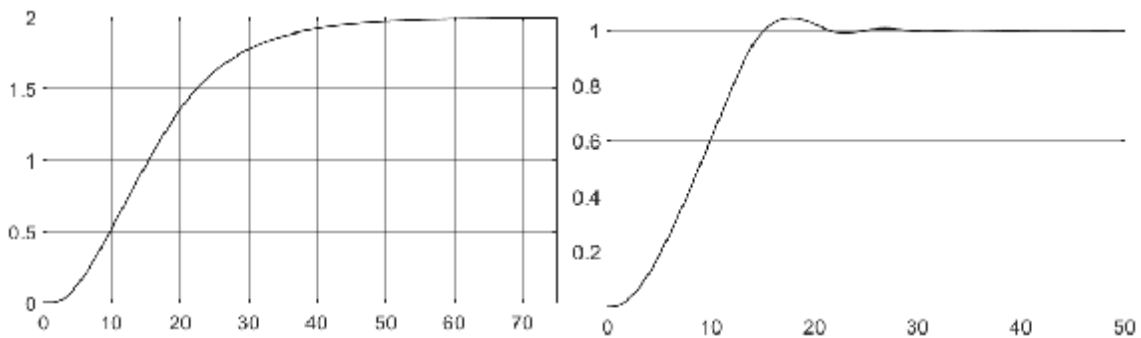


Рисунок 3 – Переходные характеристики объекта управления и нейросетевой системы управления с регулятором с предсказанием

Управляющее воздействие для нейросетевого регулятора на основе нелинейной авторегрессионной модели вычисляется следующим образом:

$$u(k+1) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)]}{g[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)]}$$

Структурная схема нейросетевого регулятора на основе нелинейной авторегрессионной модели и переходная характеристика нейросетевой системы управления с регулятором на основе нелинейной авторегрессионной модели представлена на рисунке 4.

По результатам моделирования системы нейросетевого управления с регулятором на основе нелинейной авторегрессионной модели в

системе Simulink можно сделать вывод, что показатели качества системы управления напрямую зависят от выбора такта дискретности (sampling interval).

В нашем случае такт дискретности составил 5 секунд (меньшие значения приводили к значительно худшим результатам). Время регулирования составило 28 секунд, перерегулирование – 13.5 %.

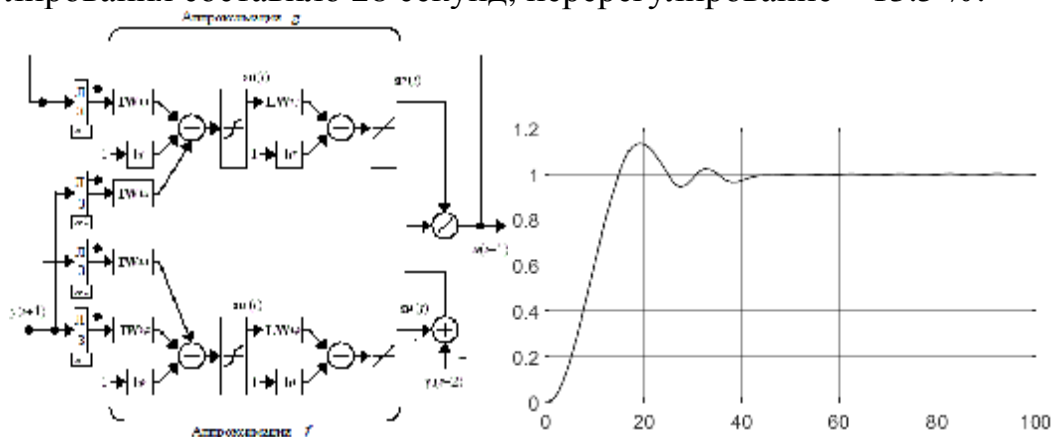


Рисунок 4 – Структурная схема и переходная характеристика для нейросетевой системы управления с регулятором на основе нелинейной авторегрессионной модели

В системе Simulink была также реализована система регулирования с классическим ПИД регулятором (блок PID Controller). Время регулирования составило 35 секунд, перерегулирование – 6 %.

Таким образом наилучшие показатели качества имеет нейросетевая система управления с регулятором с предсказанием. Вместе с тем её расчёт потребовал наиболее значительных вычислительных ресурсов. Нейросетевая система управления с регулятором на основе нелинейной авторегрессионной модели имеет худшие показатели качества, но требует значительно меньшего объёма вычислений. Реализованный в блоке PID Controller метод линеаризации нелинейных моделей и автоподстройки коэффициентов регулятора дал неплохие результаты при значительно меньших объёмах вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терехов, В.А. Нейросетевые системы управления / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. М.: Высш. Шк., 2002.
2. Комашинский, В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов М.: Горячая линия-Телеком, 2003
3. Медведев, В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потёмкин. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002.

УДК 658.512:621.77:62-52

Д.С. Карпович, доц., канд. техн. наук; В.В. Сарока, доц., канд. техн. наук;
И.Ф. Кузьмицкий, доц., канд. техн. наук

viksar@mail.ru

(БГТУ, г. Минск)

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫВКИ
ДЕТАЛЕЙ И ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ ЦЕХА
АНОДИРОВАНИЯ СП «КТМ-2000»**

Межоперационная промывка деталей является важной операцией в процессе нанесения гальванического покрытия. Она не участвует в образовании гальванического покрытия, но существенно влияет на получение качественных изделий. При извлечении деталей из ванны с раствором, после стекания его излишка, на них остается тонкая пленка раствора. Если детали с такой пленкой погрузить в другой раствор, то пленка в нем растворится и загрязнит его компонентами предыдущего раствора. Поэтому после каждой операции должна производиться тщательная промывка в большом количестве чистой проточной перемешиваемой воды. Очень редко применяется перенос в следующую ванну без промывки – только в тех специальных случаях, когда следы первого раствора нужны для работы второго. Когда деталь с оставшейся пленкой раствора попадает в чистую воду, то компоненты раствора пленки начинают переходить (диффундировать) в прилегающий слой воды. Скорость этой диффузии снижается по мере того, как концентрация вещества в пленке будет убывать, а в прилегающем слое воды возрастать, т. е. по мере того, как разница концентраций будет уменьшаться. Когда эти концентрации сравняются, дальнейшее вымывание вещества из пленки прекратится и на деталях останется слой жидкости с этой сравнявшейся концентрацией.

При большом объеме воды растворенные компоненты будут диффундировать вглубь воды, снижая тем самым концентрацию в прилегающем к деталям слое, но это процесс медленный. Он ускоряется при подогреве воды, при ее перемешивании и, еще лучше, при непрерывном подводе свежей воды вместо прилегающего слоя. Процесс диффузии идет медленно, поэтому промывка, даже при всех ускоряющих факторах, требует небольшого, но существенного времени. В настоящее время возможно использование метода каскадной противоточной промывки, основанного на принципе встречного движения растворяемого вещества и растворителя. Осуществляется это так: устанавливается две (редко три); промывные ванны, свежая вода поступает сначала в первую ванну, из нее переливается во вторую, затем – в третью и оттуда уходит в канализацию, а детали с пленкой ад-

сорбированного раствора промываются сначала в третьей ванне, затем во второй и, наконец, в первой. Следовательно, детали, несущие пленку концентрированного раствора, сначала промываются более загрязненной водой, а по мере разбавления этой пленки встречаются с более чистой водой, что позволяет поддерживать все время достаточно большую разность концентраций загрязнений между пленкой на детали и подаваемой водой и очень существенно уменьшить расход воды. Объем воды, окружающий подвесочное приспособление с деталями, играет в этом случае меньшую роль, а чем меньше объем ванны, тем при данном расходе вода в ней быстрее обновляется, что положительно влияет на качество промывки.

Исходя из выше описанного можно составить основные требования предъявляемые к системе автоматического управления промывки деталей:

1. Контроль и стабилизация концентрации в ваннах промывки.
2. Создание омывающих потоков и повышение диффузии реагентов в промывочный раствор для сокращения времени и повышения качества операции промывки.
3. Выдержка времени над ванной промывки первой ступени для возврата промывающей жидкости в ванну первой ступени очистки
4. Осуществлять неравномерное поднятие краев подвески автооператора для сокращения времени слива промывающей жидкости для деталей вытянутой формы.
5. Стабилизация температуры и уровня в ваннах промывки.
6. Дополнительные движения автооператора при подъеме/опускании подвески в целях интенсификации процесса промывки.
7. Операции по промывке деталей могут иметь различный временной диапазон по нахождению в соответствующей ванне.

На автоматизированной гальванической линии анодирования осуществляется следующая последовательность операций по обработке деталей: 1. Монтаж деталей на подвески; 2. Обезжиривание деталей; 3. Травление деталей (щелочное); 4. Промывка в горячей воде; 5. Двухкаскадная промывка в холодной проточной воде; 6. Осветление деталей (серная кислота); 7. Анодирование деталей (серная кислота); 8. Двухкаскадная промывка в холодной проточной воде; 9. Промывка в деминерализованной воде; 10. Электрохимическое (химическое) окрашивание деталей; 11. Двухкаскадная промывка в холодной проточной воде; 12. Горячее уплотнение; 13. Сушка; 14. Демонтаж деталей с подвески.

В цеху предусмотрен реагентный способ обезвреживания сточных вод. Это позволяет произвести основную химическую обработку сточной воды до конца в одном и том же объеме реактора и получить

очень высокое качество отстаивания. Образующиеся в ходе процесса обработки поверхности стоки (кислые стоки, щелочные и промывные) попадают в соответствующие баки-накопители при помощи насоса. Стоки после накопления поступают в реактор автоматически в следующей последовательности от объема реактора: 85% промывных вод, 3% щелочных стоков и 2% кислых стоков от объема реактора. После окончания наполнения реактора происходит перемешивание стоков. При постоянном перемешивании стоков в реактор автоматически добавляется коагулянт, стоки перемешиваются, и автоматически дозируется известковое молочко. Дозировка известкового молочка происходит до тех пор, пока рН не будет соответствовать значению 7-7,5. После окончания дозировки известкового молочка происходит перемешивание стоков в реакторе, а затем происходит дозировка флокулянта. После дозировки флокулянта содержимое реактора перемешивается в течение 5 минут, а затем мешалка останавливается. Основным этапом проведения процесса является седиментация осадка около двух часов или до образования четко выраженной границы разделения жидкой фазы и осадка.

После седиментации осадка система управления приступает к декантации воды, которая образовалась над осадком через клапана. Вода поступает при помощи насоса в промежуточный бак, а после накопления определенного уровня воды в баке автоматически поступает на фильтр тонкой очистки, заполненный антрацит-песочным материалом. После фильтра вода поступает в канализацию. После декантации стоков в реакторе осадок при помощи насоса поступает на пресс-фильтр.

Предлагаемый способ очистки сточных вод позволяет осуществлять эффективную очистку сточных вод без перерасхода дорогостоящих реагентов с последующей утилизацией обезвоженных осадков.

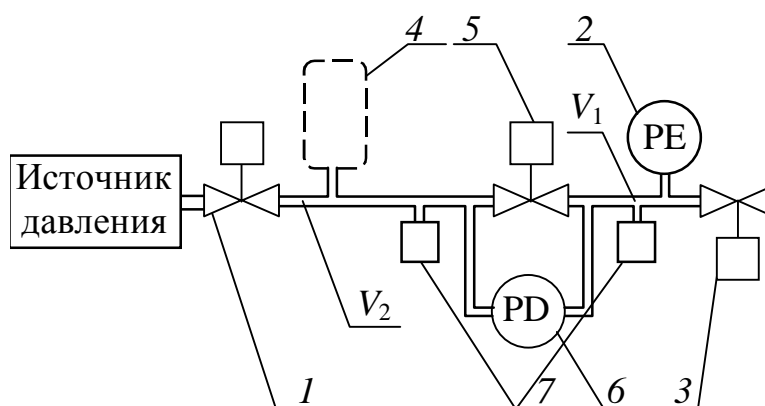
ЛИТЕРАТУРА

1 Карпович, Д. С. Роботизированная гальваническая линия и очистка сточных вод в условиях цеха анодирования в условиях сп «КТМ 2000» / Д. С. Карпович, В. В. Сарока, И. Ф. Кузьмицкий // Техника и технология защиты окружающей среды: материалы докладов Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 9–11 октября 2013 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2013. – С. 74–76.

И.Г. Сухорукова, ассист.,
 Д.А. Гринюк, канд. техн. наук,
 И.О. Оробей, канд. техн. наук;
 (БГТУ, г. Минск)

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АЛГОРИТМА АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЕЛИЧИН ПРОТЕЧЕК ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

В рамках данной конференции рассматривался модификация метода измерения величины протечки (рис. 1). Для этого используем симметричное (или компенсационное) детерминированное активное воздействие на два объема V_1 и V_2 с определенным заранее V_2 . Один из вариантов такой установки представлен на рис. 1.



1 – регулятор задающего давления; 2 – преобразователь давления; 3 – тестируемый вентиль (задвижка); 4 – дополнительный объем; 5 – дополнительный клапан управления; 6 – преобразователь перепада давления; 7 – источники синхронного воздействия на объемы

Рисунок 1 – Схема измерения герметичности с активным воздействием

Проведем расчеты требуемой мощности для стенда испытаний, исходя из условия не повышать температуру выше 1°C и максимальной длительности 5 с.

Для этого воспользуемся уравнением Менделеева – Клапейрона:

$$\frac{PV}{T} = \frac{m}{M} R. \quad (1)$$

где T – температура, К; m – масса; M – молярная масса; R – газовая постоянная.

Поскольку газ для испытаний проходит очистку и обезвоживается, то можно принять удельную газовую постоянную $R/M = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \times \text{К})$. По условию эксперимента объем не меняется, по-

этому в расчетах можно воспользоваться или объемной теплоемкостью $C_V = 0,0072 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \times \text{К})$ или массовой $C_m = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \times \text{К})$.

Требуемое количество энергий для изменения температуры можно рассчитать как

$$Q = mC_m \Delta T. \quad (2)$$

С другой стороны, светодиод мощностью N выделяет за единицу времени Δt количество энергии, равное

$$Q = N\Delta t. \quad (3)$$

Поскольку количество энергии до клапана и после клапана передается одинаковое, то, выразив из уравнения (2) массу и подставив в (2) с учетом (3), получаем выражение

$$\Delta t N = \frac{M}{R} \frac{PV}{T} C_m \Delta T. \quad (4)$$

При изохорном процессе, т. е. при не изменяющемся объеме, согласно второму закону Гей-Люссака, соблюдается условие

$$\frac{P}{T} = \text{const},$$

принимая объем $V_2 = 1 \text{ л}$ и температуру 18°C , задаем изменение температуры и соотношение объемов V_1 / V_2 , вычисляем массу и требуемую мощность и получаем зависимость перепада давления и мощности от соотношения объемов (рис. 2, 3).

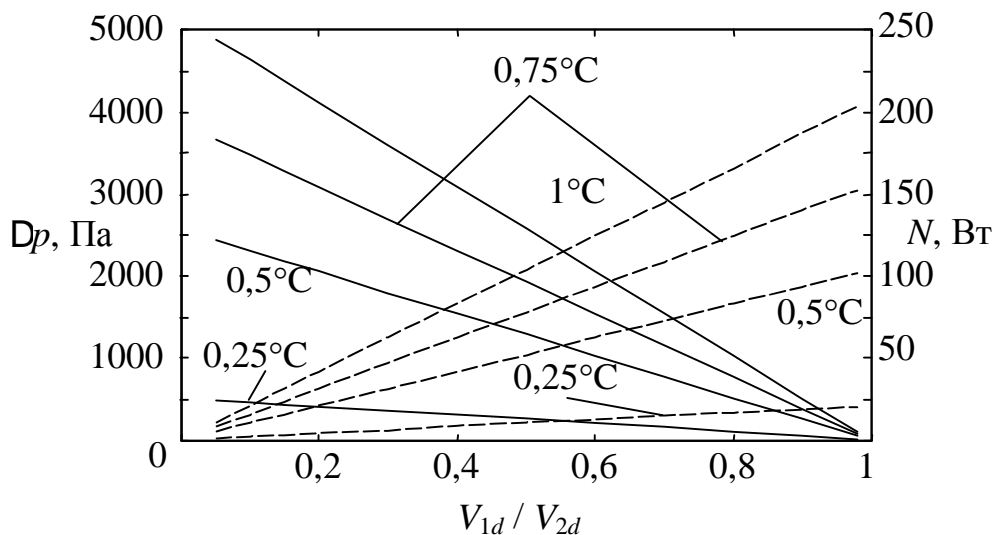


Рисунок 2 – Зависимость перепада давления Dp на клапане (–) и требуемой мощности N (–) от отношения объемов до и после клапана при разной степени нагрева воздуха и избыточном давлении 1,5 МПа

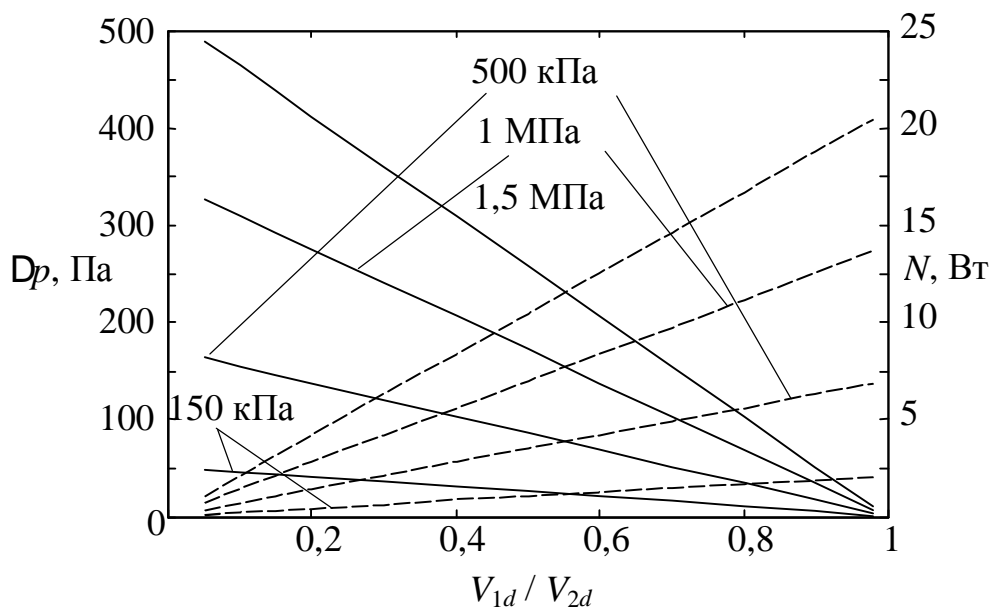


Рисунок 3 – Зависимость перепада давления Δp на клапане (–) и требуемой мощности N (– –) от отношения объемов до и после клапана при разных значениях избыточного давления испытания и нагреве воздуха до $0,1^\circ\text{C}$

Приведенные графики показывают, что изменения будут достаточными для количественной оценки современными измерительными приборами. Несомненно, расчетные давления недостижимы, так как есть влияние газовой динамики и теплообмена с металлическими элементами конструкции.

Для проверки выдвинутых предположений был собран лабораторный стенд. В качестве средств измерения служил датчик перепада давления Aplisens с максимальным перепадом давления 10 кПа и датчиком избыточного давления Endress+Hauser Cerabar M с диапазоном 0–200 кПа. Конструкция была собрана из набора сантехнических металлических элементов. В качестве клапанов использовались электромагнитные клапаны SMC с технологией «no leak». Меньший объем имел значение около 0,091 л. Объем пространства менялся за счет смены металлопластиковых труб различной длины. Регистрация сигналов и управление клапанов осуществлялась с помощью контроллера Vira 200. Модуль аналогового ввода с 12-bit АЦП на входе. Младшему значащему разряду соответствовало 4,88 Па для дифференциального датчика и 97,65 Па для датчика избыточного давления.

Давление во время испытаний устанавливалось близкое к предельному значению датчика избыточного давления 200 кПа. В качестве нагревателей использовались по три инфракрасных диода IR LED F5 при токе 30 мА, которые обеспечивали выделение мощности

0,135 Вт. Данной небольшой мощности нагревателя и слабой чувствительности измерительного преобразователя оказалось достаточно для обнаружения отклонения на несколько МЗР при 5 секундном воздействии (рис. 6). Время релаксации теплотехнического состояния не превышало 15 с. Для разработки практических рекомендаций требуется увеличить чувствительность дифференциального преобразователя.

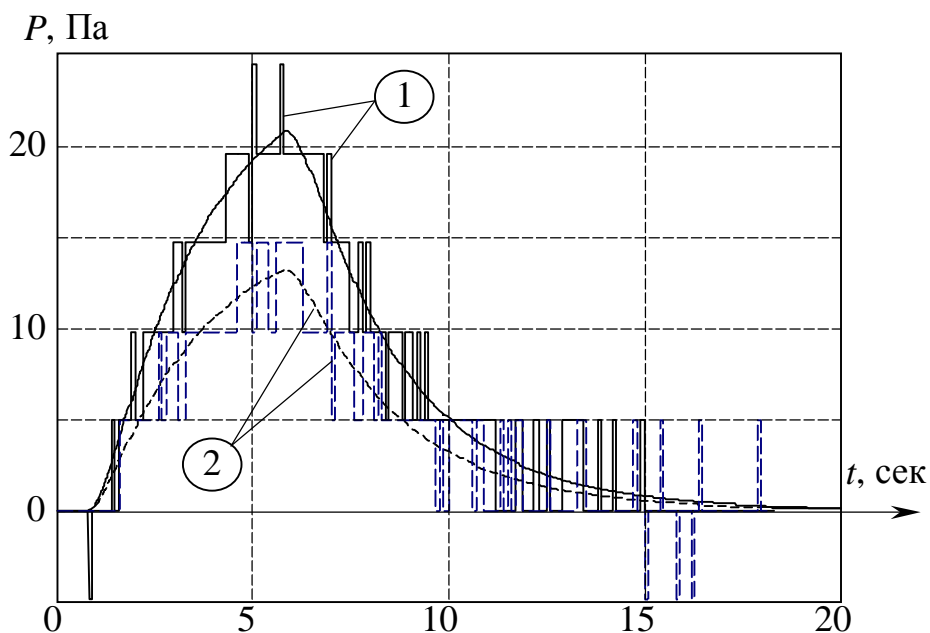


Рисунок 4 – Изменение перепада давления Δp и аппроксимация экспериментальных данных аperiodическими кривыми при соотношении объемов 1 : 4 до и после клапана (–) и 1 : 2 (––)

Разработанные алгоритмы по повышению чувствительности дифференциального метода на линии высокого давления за счет активного воздействия позволяют повысить чувствительность установок испытания запорной арматуры на величину протечек. Для реализации данного алгоритма на существующих установках стендовых испытаний можно обойтись серийными приборами выпускаемыми для автоматизации и управления.

Д.А. Гринюк, доц., канд. техн. наук,
А. С. Астапенко, студ.
А. М. Широков, студ.
(БГТУ, г. Минск)

ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ И КВАНТОВАНИЯ В ПЛК

Наличие автоматизации технологических процессов стало обязательным условием в современных экономических условиях. Период экстенсивного пути повышения уровня автоматизации за счет установки измерительных приборов с необходимой точностью и настройкой локальных контуров практически завершился. Получение конкурентных преимуществ требует применения более сложных алгоритмов, адаптации локальных контуров под действием изменяющихся контуров и оптимизации в реальном времени. Для построения эффективных систем управления требуется использовать динамическую компенсацию основных возмущений и идентификацию каналов регулирования. Повышение эффективности за счет математической обработки трендов следует проводить с осторожностью, так как измерительная информация может быть существенно искажена измерительными каналами.

Регулирование технологических параметров на сегодняшний день осуществляют программируемыми логическими контроллерами (PLC). Заявленная разрядность ADC и DAC современных находится в диапазоне 10-12 разрядов. Эффективная же разрядность еще ниже, поскольку определенная часть динамического диапазона модулей контроллера используют для компенсации потенциальных смещений каналов и диагностики.

Дискретизация аналоговых каналов в первую очередь повлияет на адекватность вычисления производных. С целью оценки вероятности ошибки вычисления производных было смоделирована ситуация работы объекта регулирования при разных значениях младшего разряда и оценена погрешность вычисления.

Моделирование производилось путем создания модели (рис. 1) в Simulink в Matlab и состояло из параллельных трех замкнутых контуров регулирования. Один был чисто аналоговым контуром с ПИД-регулятором трехёмкостном объекте с подмешенным случайном процессе. Кроме этого в обратной связи использовалось апериодическое звено в обратной связи. Настройки регулятора были подобраны по модифицированному интегральному критерию. Во втором варианте аналоговый ПИД-регулятор был заменен на цифровой вариант.

В третьем – использованный нелинейные элементы на выходе датчика и регулятора для отражения работы АЦП и ЦАП.

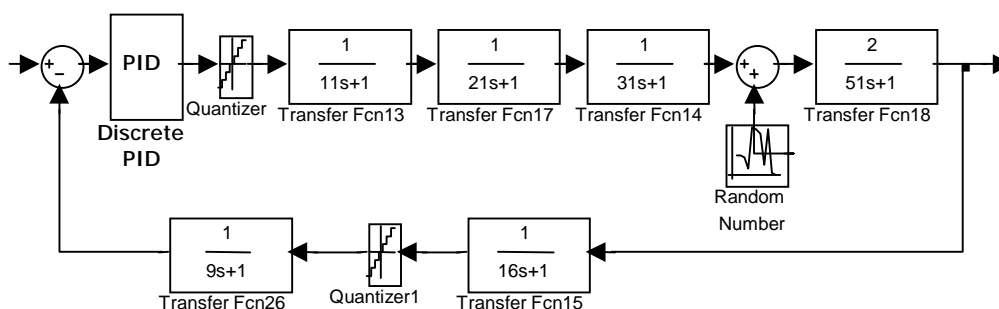


Рисунок 1 – Структура моделирования

Сигнал по каналу задания менялся плавно с различным величиной ускорения путем изменение амплитуды синусоидальных колебаний. Сигнал управления был сформирован так, чтобы производная менял свой знак и значение в широком диапазоне (рис. 2)

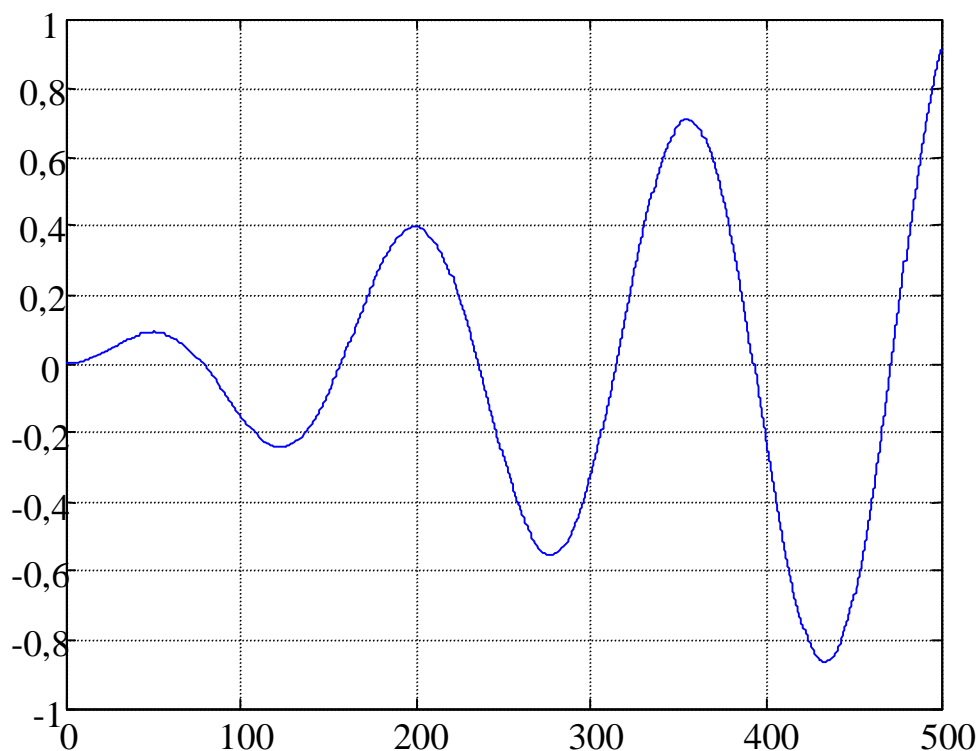


Рисунок 2 – Сигнал по канала задания для создания меняющегося значения и знака производной

Амплитуда случайного процесса подбиралась на уровне младшего значащегося разряда и была одинакова для всех контуров регулирования. Результаты сравнения для первой и второй производной можно увидеть на рис. 3-5.

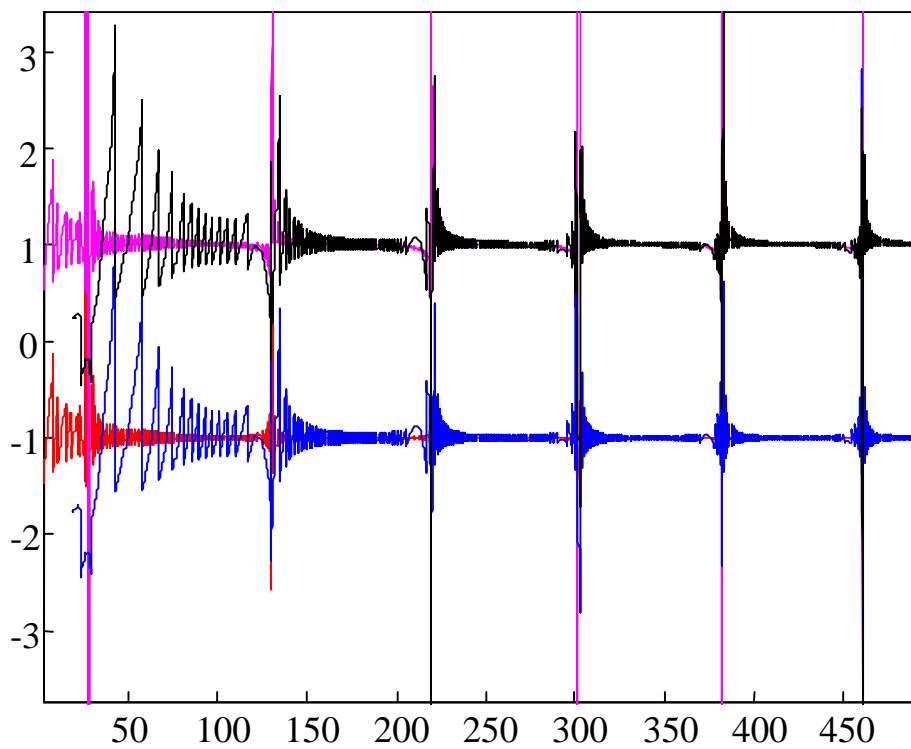


Рисунок 3 – Относительная погрешность вычисления первой производной Sample time 0,1; 1 (фрагмент)

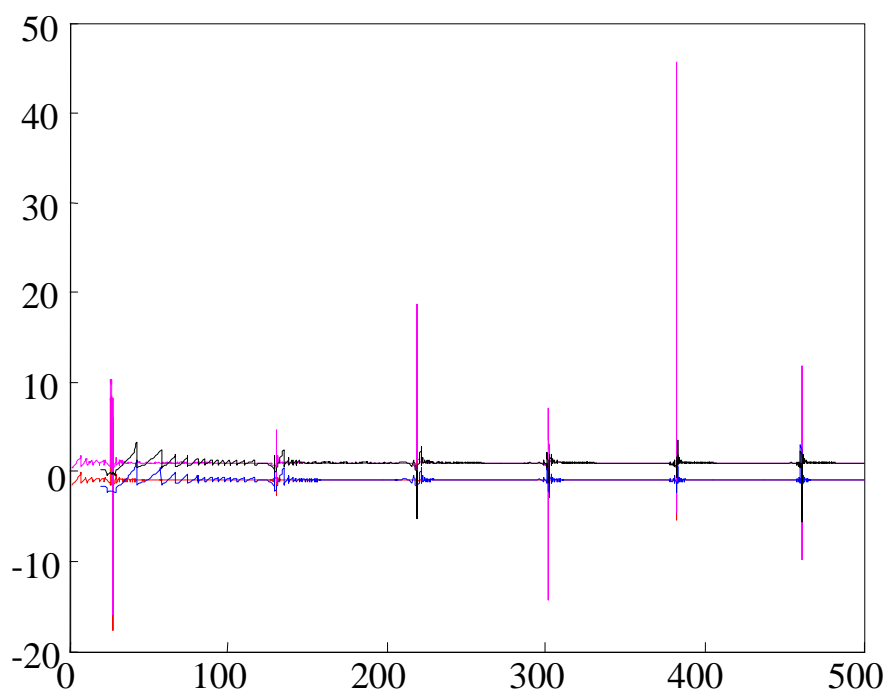


Рисунок 4 – Относительная погрешность вычисления первой производной Sample time 0,1; 1

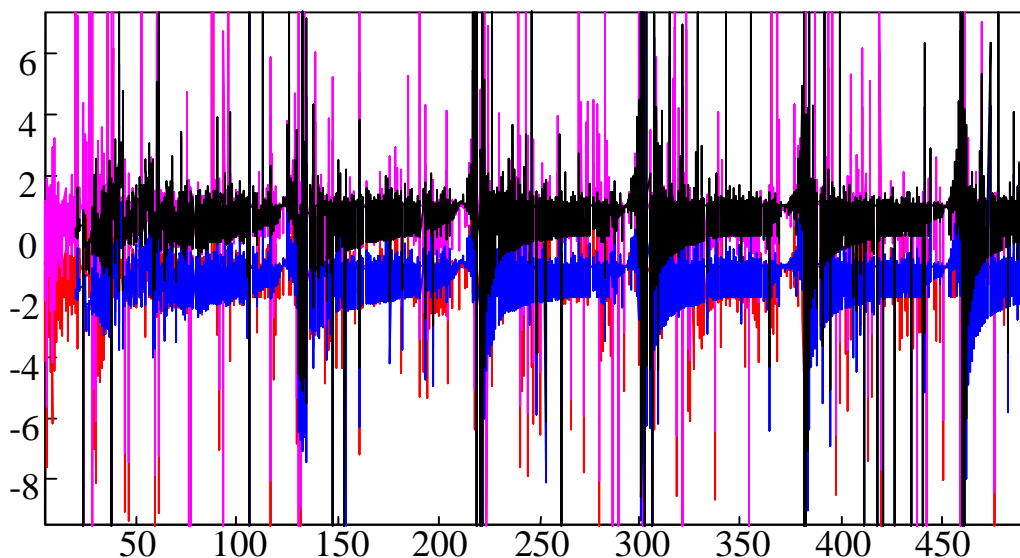


Рисунок 5 – Относительная погрешность вычисления второй производной Sample time 0,1; 1 (фрагмент)

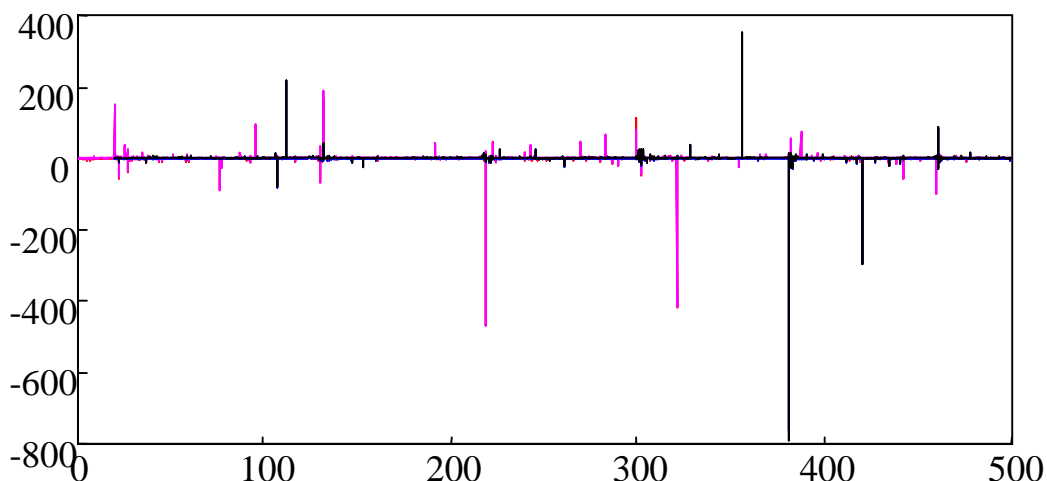


Рисунок 6 – Относительная погрешность вычисления второй производной Sample time 0,1; 1

Погрешность оценивалась по отношению к чисто аналоговой работе контура. Анализ результатов показал, что при вычислении только первой производной относительная погрешность может достигать 2000% ошибки. Наибольшая ошибка достигается при изменении знака ускорения сигнала задания. В среднем же при наличии на диапазоне работы 2000 комбинаций ADC она была 30-40%. Вычисление второй и третьей производной приводило к значительно большим погрешностям. Поэтому при использовании компенсаторов с необходимостью вычисления производных стоит ограничиваться первым порядком.

КОМПОНЕНТЫ УСПЕШНОГО ВНЕДРЕНИЯ ERP-СИСТЕМ

Внедрение автоматизированной системы управления является серьезным (и болезненным!) преобразованием на предприятии. Глубокое «погружение» в цели проекта может привести к перенесению его сроков в связи с пересмотром приоритетов или, в предельном случае, к отказу от его осуществления [1].

Однако позитивный эффект от грамотного и успешного в различных аспектах внедрения оправдывает ресурсы и усилия, направленные на его достижение.

В результате всестороннего анализа выделены основные компоненты успешного внедрения ERP-систем, положительно зарекомендовавшие себя при их учете и использовании.

1. Официальная инициация проекта [1-3].

Проект внедрения ERP-системы должен быть обязательно закреплен приказом генерального директора. В нем, кроме целей и сроков проекта, назначается руководитель проекта, обычно занимающий в организационной структуре предприятия положение более высокое, чем любой член команды проекта. Он и формирует команду проекта. В нее обязательно должны войти руководители подразделений и специалисты, заинтересованные в конечном результате и компетентные в предметной области проекта (в частности, из руководителей и специалистов финансовой и ИТ-служб, а также представителей производственных и сбытовых подразделений).

2. Поддержка проекта руководством [2].

Внедрение новой системы управления связаны с изменением рабочих и управленческих процессов, перераспределением ответственности и полномочий. Эти изменения часто вступают в конфликт с интересами тех или иных руководителей подразделений и сотрудников. В результате начинается противодействие изменениям. Поэтому руководитель организации должен целенаправленно поддерживать команду проекта и результаты ее работы.

3. Обеспечение необходимыми ресурсами [2].

Подразумевает приемлемый бюджет на развитие управленческих технологий и внедрение автоматизированной системы. Если точно определен желаемый результат, то можно рассчитать время, необходимое для его достижения, и бюджет. Управление человеческими ресурсами проекта предполагает учет затрат времени исполнителей. Учет факти-

чески потраченного времени нужен не только для адекватной оплаты труда исполнителей, но и для правильной оценки затрат на осуществление проекта.

4. Фиксация ожидаемого результата по этапам [2].

Весь объем работ делится на самостоятельные этапы, ожидаемый результат и время его достижения фиксируется для каждого этапа. Это позволяет контролировать риски проекта, двигаясь поступательно к намеченной цели. Переходить к очередному этапу можно только после выполнения трех условий: команда проекта выработала единое понимание результатов этапа; это понимание оформлено в виде документа; результаты этапа приняты заказчиком, то есть руководителем предприятия.

5. Коррекция целей/ожиданий [1-3].

Целям и ожиданиям проекта свойственно меняться по мере выполнения проекта. Инициацией изменений могут быть новые требования заказчика в свете нового видения стратегии развития предприятия (иных факторов). Своевременная корректировка позволит на нужном этапе проекта выбрать верное направление последующих действий в рамках проекта внедрения.

6. Мотивация исполнителей проекта [3].

Важно правильно понимать ожидания исполнителей, связанные с успехом проекта и использовать мотивационные факторы: карьерный рост, повышение зарплаты, достижение новой высоты в профессиональном росте, получение новых знаний.

Учет компонентов разной природы (организационной, финансовой, информационной и производственной), положительно зарекомендовавших себя при внедрении ERP-систем, позволит сделать проект внедрения систем данного класса успешным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Питеркин С.В., Оладов Н.А., Исаев Д.В. Точно вовремя для России. Практика применения ERP-систем. 2-е изд. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. С. 326-348.

2. Карпов Д.В. Проблемы внедрения ERP-систем // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2010, № 4 (1), с. 233-239

3. Филиппова О., Митрофанова Я. Проблемы внедрения ERP-систем на предприятиях // НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА РУСЕНСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ - 2012, том 51, серия 6.1. С. 43-47.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССА ОБЖИГА ИЗВЕСТИ В ДВУХШАХТНЫХ ПЕЧАХ

Режим термической обработки сырья оказывает большое влияние на свойства вяжущего, что отмечено при изучении состава и свойства воздушной извести на основе известняка [1-3].

Одними из самых распространенных аппаратов для обжига прочной кусковой являются шахтные печи. В них печной агрегат состоит из двух шахт круглого или квадратного сечения, соединенных между собой газоходом. Шахты работают в попеременном режиме. Загрузка шахт кусковым известняком производится сверху. В верхней части шахт расположены так называемые пиковые газовые горелки в количестве 10-15 шт., опущенные на глубину примерно 2,5 м. Дымовые газы от сжигания газообразного топлива проходят сверху вниз (к примеру) по левой шахте, обжигая известняк, а затем по соединительному газоходу поступают в правую шахту, также заполненную известняком, где отдают остатки своей теплоты свежезагруженному материалу, нагревая его, после чего удаляются с температурой чуть выше точки росы. Такой цикл длится 15 мин, после чего шахты меняются ролями. Обожженная известь удаляется из нижней части печи.

Следует отметить, что двухшахтные печные агрегаты обладают рядом достоинств, а именно [4]: высокой теплотехнической экономичностью; большой производительностью; простотой и надежностью конструкции; высокой концентрацией CO_2 в дымовых газах, позволяющей его в дальнейшем утилизировать.

При эксплуатации аппаратов данного класса замечены следующие недостатки, заключающиеся в более низком качестве получаемой извести по сравнению с вращающимися печами и неодинаковой реакционной способности извести поверхностных и глубинных слоев кусков обожженного известняка. Однако, при этом не следует забывать об основном достоинстве такой печи – более полном использовании теплоты дымовых газов. Такие двухшахтные печные агрегаты успешно эксплуатируются на Белорусском металлургическом заводе.

Участок обжига известняка на данном предприятии состоит из суточного бункера (хранение известняка), конвейера, скипового подъемника, шахтной печи (высота до 40 м), включающей бункер подачи (колошник), две шахты (сжигающая и несжигающая), от пяти до семи пиковых горелок на каждую камеру.

Дробленый известняк фракции 60-100 мм массой 15-20 кг, из суточного бункера пластинчатым конвейером направляется на заполнение ковша скипового подъёмника. Загрузка шахтной печи осуществляется с помощью ковша и подъёмного устройства (лебедки) под углом 80°. Далее ковш поднимается на высоту печи и опрокидывается, заполняя известняком колошник до 90%. При этом подается сигнал на движение следующего ковша для последующего заполнения бункера. При достижении минимального уровня шихты в двухшахтной печи равного 25 м один из затворов бункера открывается и бункер опорожняется.

Загрузка известняком шахтных печей происходит поочередно (каждые 15 минут) во время переключения, причем загрузке подлежит шахта, работающая в прямотоке. Известняк, попадая в печь, нагревается отходящими газами в зоне подогрева до температуры 250°C и высушивается.

Известняк, попавший в зону обжига, после зажигания горелок нагревается до температуры 1150°C и декарбонизируется. В качестве топлива для обжига известняка используется природный газ, который подается на вход пиковой горелки, где, смешиваясь с воздухом, нагнетаемым вентиляторами, образует пламя. При изменении температуры в зоне обжига, изменяется расход природного газа, а в зависимости от него изменяется расход воздуха. Такой способ подачи газа на горение обеспечивает равномерное его (и воздуха) распределение по сечению шахты и предотвращает пережог извести, поскольку в области горения топлива находится сравнительно холодный известняк. Для того, чтобы в зоне обжига, где температура наиболее высокая, не происходило спекание, известь постоянно выгружают через колосниковую решётку, находящуюся в нижней части шахты, т. е. проводят «шевеление».

Если известь попадает в часть шахты ниже соединительного канала (зона охлаждения), то она охлаждается холодным воздухом, подаваемым с помощью компрессора через разгрузочное устройство шахты, расход которого изменяется в зависимости от температуры в зоне охлаждения. После охлаждения до температуры равной 85°C известь поступает в разгрузочный бункер и с помощью системы клапанов подаётся на валковую дробилку.

По соединительному каналу продукты горения топлива и диссоциации карбонатов вместе с нагретым воздухом из прямоточной шахты поступают в противоточную шахту с температурой 810°C, в которой происходит нагрев известняка. Далее отходящие газы, под действием разрежения, создаваемого компрессором поступают в

межтрубное пространство теплообменника, в котором поддерживается температура 130-144°C путем изменения расхода охлаждающей воды и давление 3,2-4,4 кПа путем изменения расхода отходящих газов.

Для реализации системы автоматизации процесса обжига в шахтной печи были выбраны следующие переменные, подлежащие контролю и регулированию: масса дробленого известняка фракции 60-80 мм, уровень заполнения известняком колошника, температура отходящих газов в зоне подогрева, температура в зоне обжига, расход природного газа и воздуха в пиковой горелке, температура в зоне охлаждения, температура и давление в теплообменнике.

Обеспечение качества получаемой продукции обеспечивается набором локальных систем [5]: стабилизации соотношения топливо-воздух, стабилизации температуры в зоне охлаждения путем изменения расхода холодного воздуха, стабилизации температуры в зоне обжига путем изменения расхода топлива, стабилизации температуры и давления в теплообменнике путем изменения расхода охлаждающей воды и расхода отходящих газов, соответственно.

Стабилизация температурных режимов процесса обжига известняка в двухшахтной шахтной печи на основе разработанной системы автоматического управления ведет к улучшению качества выпускаемой продукции и снижению ее себестоимости до двух процентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вяжущие материалы / А.А. Пашенко, В.П. Сербин, Е.А. Старчевская. - Киев.: Вища школа, 1985. - 440 с.
2. Причкайтене Ю.К., Каминскас А.Ю. Влияние некоторых карбонатных добавок и углекислого газа на процесс твердения магензимального вяжущего вещества. - Сборник трудов ВНИИтеплоизоляции, вып. 8, 1976. - с. 123-129.
3. Липсон Г., Стипл Г. Интерпретация порошковых рентгенограмм. - М.: Мир, 1972. - 384 с.
4. Кузьменков, М.И., Хотянович, О.Е. Химическая технология вяжущих веществ. - Мн. БГТУ. 2008 - 264 с.
5. Барашко, О.Г., Сакович, А.А. Система автоматического регулирования процесса обжига в шахтной печи // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологические безопасные технологии. Материалы Междун. науч.-техн. конф. В 2-х частях. Часть 2. - Минск, 2014. - С.251- 253.

Badri Meparishvili, Petre Petashvili and Gulnara Janelidze
 (Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia)
**MULTI-ROBOT CONTROL ALGORITHM
 FOR MAPPING THE RADIATION AREAS**

1. Introduction

The task for the adaptive optimization algorithm in these environments is to find optimal results quickly after the change in environment is detected. Monitoring can be realized by continuously collecting sensory data from a distributed network of mobile multi-robot systems deployed in the field. Multi mobile sensor systems are reconfigurable wireless networks of distributed autonomous devices that can sense or monitor physical or environmental conditions cooperatively [1].

2. Brief Description of Algorithm.

Based on the PSO paradigm, each of particles represents a potential solution to an optimization problem, navigate through the search space [2]. The goal of algorithm is to converge to the global (over the search space) or local (into the particular cluster) optimum of a target function. Assuming that the set of particles with their parameters are given initial part of algorithm proceeds as follow steps [3]:

I. Initialize:

Each particle has three features:

p_k^i – for simplifying the calculation, the value of radiation in this position can be identified (this is the i -th particle at time or step k , notice vector notation) with the coordinates:

$$p_k^i = [x_k^i, y_k^i] \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

The particles are assumed to move within the search space iteratively. This is possible by adjusting their *position* using a proper position shift, called *velocity* (similar to search direction, used to update the position) and denoted as: v_k^i

$f(p_k^i)$ – fitness or objective (determines which particle has the best value in the swarm and also determines the best position of each particle over time.

The swarm is defined as a set:

$$p_k = \{p_k^i\}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

(a) Set parameters $N, c_1, c_2, x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}, G, \mu$.

where: c_1, c_2 are weighting factors, called the *cognitive* and *social* parameter, respectively.

The parameters c_1 and c_2 are important control parameters that affect the PSO's convergence.

(b) Set $k \leftarrow 0$

Generate N particles (in 2-D space) with random locations i.e. positions with their coordinates (Figure 1) and «velocities» (*the steps*) for each particle.

$$(c) p_o^i = p_{\min} + rand(p_{\max} - p_{\min}) \quad (3)$$

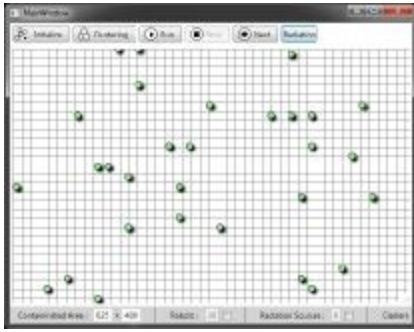
where: p_{\min} and p_{\max} are vectors of lower and upper limit values respectively.

Evaluate the fitness of each particle and store:

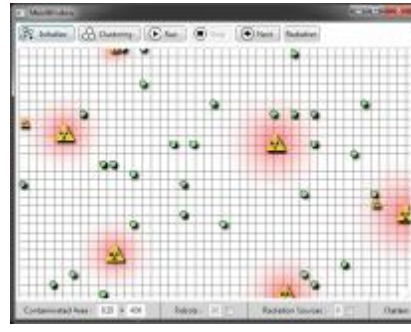
- particle best ever position (particle memory b^i here is same as p_o^i);
- best position in current swarm (influence of swarm).

Initial velocity is randomly generated.

$$v_0^i = \frac{p_{\min} + rand(p_{\max} - p_{\min})}{\Delta t} \quad (4)$$



a) random locations of particles



b) particles with sources of radiation

Figure 2

II. Clustering:

(a) Fitness function $f(p_k^i)$ evaluation for each particle in given coordinates.

(b) Election the leader (or leaders) as best position and the outsiders in the cluster (or clusters) [4]. Given a set of leaders with their positions $l_r = \{p_k^i\}$, $r = 1, 2, \dots, M$.

(c) Clustering of swarm (part of outsider particles around of each leader) by K-Means algorithm (Figure 2).

K-means clustering aims to partition the N outsiders into M sets: $L = \{l_r\}$, $r = 1, 2, \dots, M$, so as to minimize the within-cluster sum square:

$$\underset{L}{\operatorname{argmin}} = \sum_{l_c=1}^M \sum_{p_k^i \in L} \|p_k^i - p_k^j\|^2$$

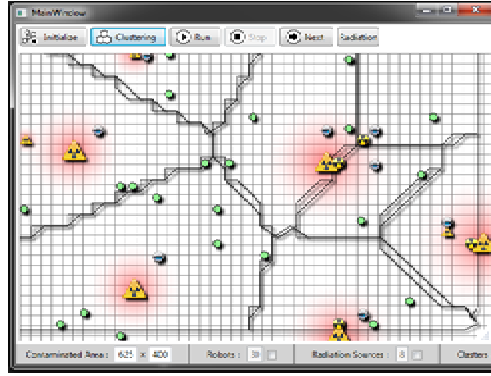


Figure 3

III. Updating:

(a) Velocity Update:

- Provides search directions.
- Includes deterministic and probabilistic parameters.
- Combines effect of current motion, particle own memory, and swarm influence.

$$v_{k+1}^i = wv_k^i + c_1 \text{rand} \frac{(p_k^l - p_k^i)}{\Delta t} + c_2 \text{rand} \frac{(p_k^g - p_k^i)}{\Delta t} \quad (5)$$

where:

w – inertia factor;

p_k^l – local best position;

p_k^g – global best position;

wv_k^i – current motion;

$\frac{(p_k^l - p_k^i)}{\Delta t}$ – particle memory influence;

$\frac{(p_k^g - p_k^i)}{\Delta t}$ – swarm influence.

This paper evaluates an adaptive approach to tune the c_1 and c_2 based on proportions: $c_1 = p_k^l / p_k^g$, $c_2 = 1 - (p_k^l / p_k^g)$

(b) Position Update:

Position of each particle is updated by own velocity vector.

$$p_{k+1}^i = p_k^i + v_{k+1}^i \Delta t \quad (6)$$

Constraints: If a particle is infeasible, last search direction (velocity) was not feasible. Set current velocity to zero.

$$v_{k+1}^i = c_1 \text{rand} \frac{(p_k^l - p_k^i)}{\Delta t} + c_2 \text{rand} \frac{(p_k^g - p_k^i)}{\Delta t} \quad (7)$$

(c) Memory Update:

At each iteration, after the update and evaluation of particles, best positions are also updated. Thus, the new best position p_{k+1}^g of leader l_{k+1}^r at iteration $k+1$ is defined as follows:

$$l_{k+1}^r = p_{k+1}^g = [x_{k+1}^g, y_{k+1}^g], \quad r=1,2, \dots, M \quad (8)$$

$$p_{k+1}^g = \begin{cases} p_{k+1}^i & \text{if } f(p_{k+1}^i) \leq f(p_k^g), \\ p_k^g & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

(d) Set $k \leftarrow k+1$.

IV. Stopping Criteria

Particles convergence (and entropy, respectively) metrics, as one of the criteria, can be defined by measuring the location or dispersion around the leader and is more convenient to use in some cases.

(a) Calculate the movement of the best position of leader:

$$\partial_{k+1} = |f(p_{k+1}^g) - f(p_k^g)| \leq \mu \quad (10)$$

where:

μ - specified tolerance.

(b) Calculate the degree (or measurement) of convergence of particles into the cluster:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \sqrt{|p_k^i - p_k^j|^2} \leq G \quad (11)$$

where:

p_{k+1}^c - position of convergence central point

$$p_{k+1}^c = \frac{1}{Q} \sum_{l=1}^Q \sqrt{|p_{k+1}^c - p_{k+1}^i|^2}, \quad i \neq j. \quad (12)$$

(c) Calculate the current value of function:

$$S = \partial_{k+1} + D \Rightarrow \min. \quad (13)$$

(d) Stopping criteria satisfied?

If “Yes”, go to IV (e).

If “No”, go to III (a).

(e) Output results.

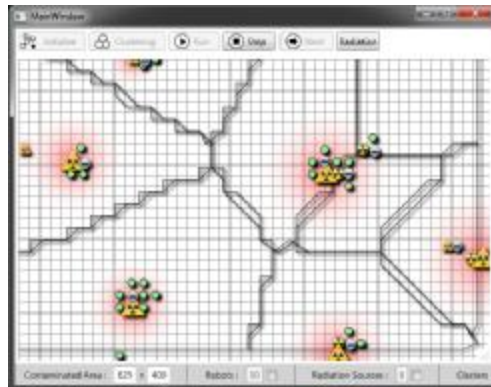


Figure 4 Final state

3. Conclusion

We have discussed the PSO algorithms as main tools for adaptive control of mobile sensor system. The task for the adaptive optimization algorithm in these environments is to find optimal results quickly after the change in environment is detected.

4. References

1. J.T.Feddela, C.Lewis, D.A.Schoenwald,"Decentralized Control of Cooperative Robotic Robots: Theory and Application", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Special Issue on Advances in Multirobot Systems, Vol. 18, N 5, October 2002, pp. 852-863.

2. K. E. Parsopoulos, M. N. Vrahatis. "Particle swarm optimization and intelligence : advances and applications". Published in the United States of America by Information Science Reference. Hershey, New York ISBN 978-1-61520-666-7, 2009.

3. Kervalishvili P., Meparishvili B. and Janelidze G. "Self-Organization Modelling Of Multi-Agent Systems". SynEnergy Forum (S.E.F.)-2. The conference for International Synergy in Energy, Environment, Tourism and Information Technology. Spetses, Greece, 2009.

4. Meparishvili B., Goderdzishvili G. and Janelidze G." Mobile Multi-Robot Systems Control Based on Evolutionary Algorithms", ERA-7, SynEnergy Forum. The Conference for International Synergy in Energy, Environment, Tourism and contribution of Information Technology in Science, Economy, Society and Education. T.E.I. ISSN 1791-1133, Piraeus, Greece, 1-8 pp. 2012.

**СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА
 ДЛЯ АВТООПЕРАТОРА ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ЛИНИИ**

Для исследований примем двухмассовую модель механизма передвижения автооператора, которая достаточно широко используется в задачах исследования динамики движения автооператора и оптимизации его движения.

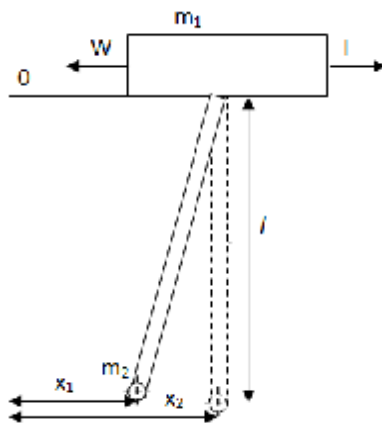


Рисунок 1 – Модель системы «рама-подвеска»

Приведена расчетная схема описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{m}_1 x_1 + m_2 x_2 = F - W \operatorname{sign} \dot{x}_1, \\ \ddot{x}_2 + \frac{g}{l} (x_2 - \bar{0}_1) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

В качестве критерия оптимизации выберем комплексный (кинематически-динамический) интегральный критерий:

$$I = \int_0^T \left(k_1 \dot{x}^2 + k_2 \frac{F - W}{m_1} \frac{\ddot{u}^2}{\dot{u}} \right) dt, \quad (2)$$

Для минимизации критерия (2) используем метод динамического программирования Р. Беллмана [3]. Основное функциональное уравнение запишем так:

$$\min_{\dot{u}} \left(k_1 y_1^2 + k_2 u^2 + \frac{\partial S}{\partial y_1} y_2 + \frac{\partial S}{\partial y_2} (u - w^2 y_1) \right) \dot{u} = 0 \quad (3)$$

Минимум правой части уравнения (3) искать по параметру управления u , для чего продифференцируем ее по u и приравняем полученное к нулю и найдем u :

$$u = - \frac{1}{2k_2} \frac{\partial S}{\partial y_2}. \quad (4)$$

Подставим полученное в уравнение (3), в результате чего получим:

$$k_1 y_1^2 + \frac{\partial S}{\partial y_1} y_2 - \frac{\partial S}{\partial y_2} y_1 w^2 - \frac{1}{4k_2} \frac{\partial^2 S}{\partial y_2^2} \dot{u}^2 = 0. \quad (5)$$

После нахождения корней уравнения (5) и подставления результата в уравнение (4), получим функцию оптимального управления:

$$u = \frac{y_1 \frac{\partial}{\partial y_1} k_2 w^2 - \sqrt{\frac{\partial}{\partial y_2} k_2 (k_1 + k_2 w^4)} \dot{u} - \sqrt{2} y_2 \sqrt{k_2 \frac{\partial}{\partial y_2} k_2 (k_1 + k_2 w^4)} \dot{u} - k_2 w^4 \dot{u}}{k_2}. \quad (6)$$

Автоматическая настройка	оптимального регулятора
clc, clear	end
global R Q A B1	x1= x(1,:);
W=tf(237.73, [1 0 6.55])	x2= x(2,:);
sys=ss(W)	t = 0:dt:T-dt;
[A B C D]=ssdata(sys)	subplot(2, 1, 1);
[n m]=size(A)	plot(t, x1, 'b'),grid on;
R=0.6*eye(n)	subplot(2, 1, 2);
Q=0.9*eye(m)	plot(t, x2, 'g'),grid on;
B1=B*ones(1,n)	C1=eye(n)
T=5	D1=zeros(n)
dt=0.01	
N=T/dt	
[k p e]= lqr(A, B1, Q, R)	
x = zeros(2, N);	
u= zeros(2, N-1);	
t(1)=0	
x(1,1)=1;	
x(2,1)=10;	
for i=1:N-1,	
u(:, i)= - k*x(:, i);	
x(:, i+1)=(A*x(:, i)+B1*u(:, i))*dt+x(:,i);	
y(i)=C*x(:,i);	

В результате получаем следующие графики динамики системы:

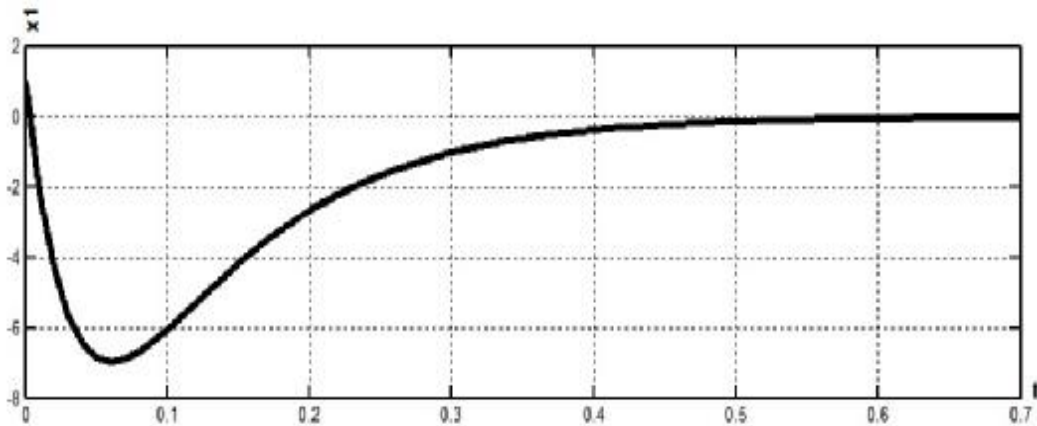


Рисунок 2 – График динамики системы относительно x_1

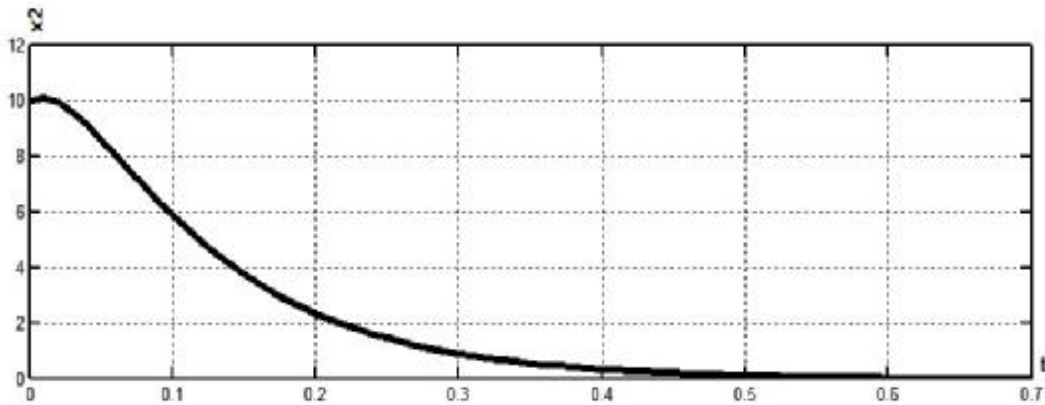


Рисунок 3 – График динамики системы относительно x_2

По полученным графикам мы можем видеть, что время регулирования составляет 0,5с, что является достаточно хорошим результатом, однако при разгоне отклонение от оптимальной величины составляет 70%.

Синтез структурной схемы оптимального регулятора

Используя полученную функцию оптимального управления, составим структурную схему системы с оптимальным регулятором.

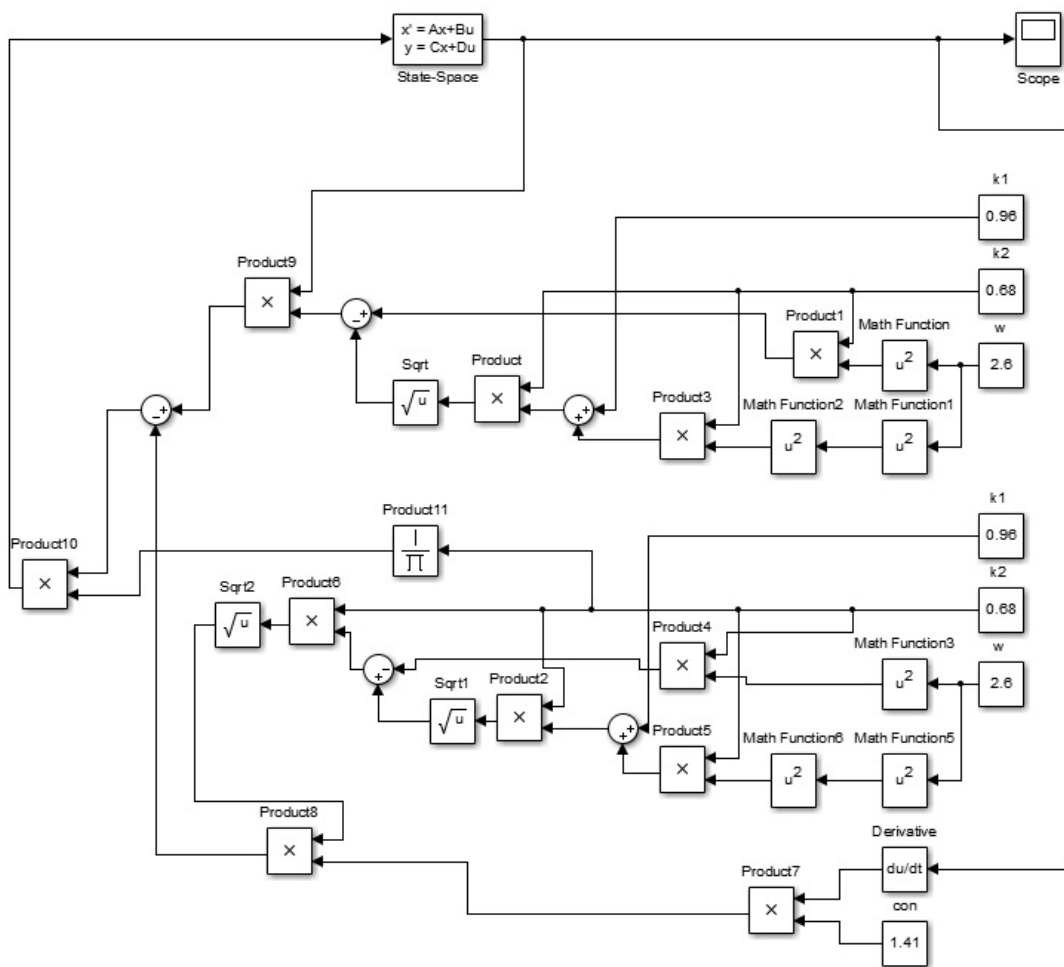


Рисунок 4 – Структурная схема системы с оптимальным регулятором

В результате моделирования мы получим следующие графики динамики системы (рис. 5).

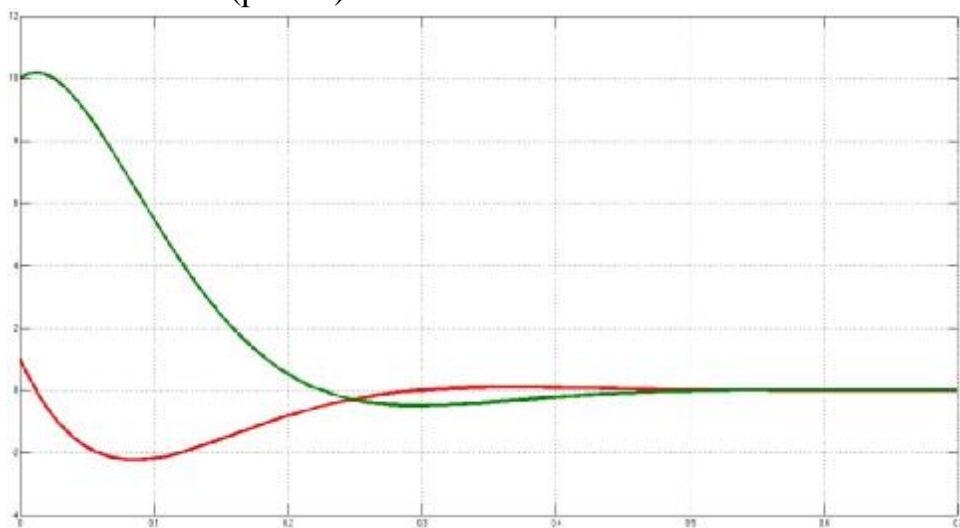


Рисунок 5 – Графики динамики системы с найденным оптимальным регулятором

На основе полученных данных мы можем видеть, что время регулирования составляет также 0,5с, однако перерегулирование при разгоне гораздо меньше, чем при автоматической настройке и составляет 22%.

Исходя из экспериментальных данных можно судить о том, что найденный оптимальный регулятор способен устранить колебания подвески при перемещении (разгон/торможение) рамы автооператора за довольно быстрый промежуток времени.

УДК 658.012.011.56

О.В. Герман, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

А.В. Заяц, асп.
(БГУИР, г. Минск)

ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается задача построения нечеткого регулятора на базе построения численного прогноза с использованием обучающего нечеткого множества. Поставленная задача сводится к (до)определению нечеткого вектора параметров регулируемого объекта с оценкой нечеткой меры принадлежности регулируемой величины на основе имеющего тренда. Известны подходы к прогнозированию нечетких последовательностей [1–3]. Они используют различный математический аппарат – генетические алгоритмы, функции распределения нечетких значений, нейронные сети и др. При этом качество нечеткого прогнозирования (оценивания на ближайший момент времени для заданной линии тренда) в значительной степени увязывается с качеством используемой математической модели. Достоинство предлагаемого подхода состоит в том, что не предполагается знания законов распределения разрядов случайных многомерных объектов, а также их взаимосвязи (парной и групповой корреляции).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЧЕТКОГО ПРОГНОЗНОГО ЗНАЧЕНИЯ

Пусть дана таблица с нечеткими векторами, в которой представлены векторы и значения меры их принадлежности к некоторому нечеткому множеству (скажем, A) и к его дополнению ($\sim A$). Диапазон изменения случайной величины может быть известным или нет.

x	$x1$	$x2$	$x3$	μ_A	$\mu_{\sim A}$
1	1	4	8	0.6	0.4
2	2	2	5	0.8	0.2
3	3	3	2	1	0
4	4	3	1	0.9	0.1
5	4	2	1	0.8	0.8
6	5	1	2	0.6	0.4
7	5	2	2	0.55	0.45
8	5	3	1	0.55	0.45

Столбец $\mu_{\sim A}$ указывает меру принадлежности к дополнительному множеству $\sim A$. Пусть дан вектор $x_z = \langle 3, 5, ? \rangle$. Нужно доопределить (спрогнозировать) недостающее значение третьего разряда и указать меру принадлежности полученного вектора к множеству A .

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для решения задачи используем модель нечеткого многомерного классификатора, предложенного в [4]. Эта модель в свою очередь базируется на основе четкого многомерного классификатора [5]. Прежде всего от «нечеткой» таблицы перейдем к четкой:

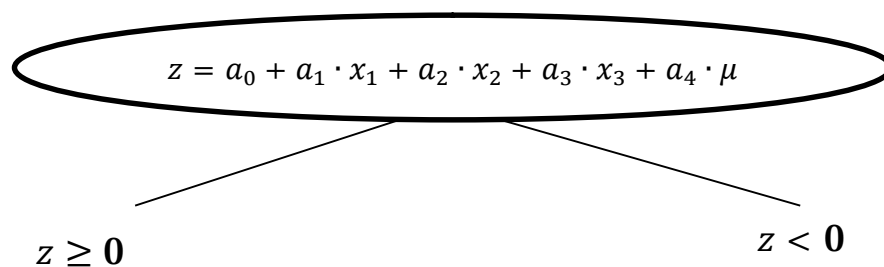
x	$x1$	$x2$	$x3$	μ_A	Y
1	1	4	8	0.6	+
2	1	4	8	0.4	-
3	2	2	5	0.8	+
4	2	2	5	0.2	-
5	3	3	2	1	+
6	3	3	2	0	-
7	4	3	1	0.9	+
8	4	3	1	0.1	-
9	4	2	1	0.8	+
10	4	2	1	0.2	-
11	5	1	2	0.6	+
12	5	1	2	0.4	-
13	5	2	2	0.55	+
14	5	2	2	0.45	-
15	5	3	1	0.55	+
16	5	3	1	0.45	-

Новый столбец Y указывает класс, к которому принадлежит многомерный объект. Здесь два класса (+ и - (равносильно A и $\sim A$)). Значение нечеткой меры (μ_A) становится четвертым разрядом векторов x , причем если $\mu_A \geq 0.5$, то объект относится к классу A . Четкий

классификатор представляет в общем случае дерево. Узлы дерева представляют линейные алгебраические неравенства вида

$$z = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot \mu \quad (1)$$

Коэффициенты неравенств(а) (1) находятся с помощью процедуры устранения невязок [5] по обучающей таблице (и ее производным). Если коэффициенты a_k ($k = 0,4$) известны, то, подставляя значения вместо переменных x_k, μ получим значение z , причем, если $z \geq 0$, то «идем» по дереву по ветви влево, иначе – по ветви вправо. Если узел конечный, то при $z \geq 0$ объект относится к классу A , иначе к классу $\sim A$. Поясняет сказанное рисунок.



В интересах простоты наш пример дает дерево с одной единственной корневой вершиной и соответствующим алгебраическим неравенством (решение получено в EXCEL Solver)

$$z = 0.923 - 0.368 \cdot x_1 - 0.164 \cdot x_2 - 0.164 \cdot x_3 + 3.273 \cdot \mu \geq 0 \quad (2)$$

Итак, строим прогнозный ряд для вектора $\langle 3, 5, ?, ? \rangle$. Для этого вектора не известна третья координата и мера принадлежности к множеству A . Из таблицы видим, что третья координата изменяется в диапазоне [1;8]. Далее предполагаем, что диапазон изменения переменной известен. Выберем в этом диапазоне $n > 2$ последовательно возрастающих равноудаленных значений (чем больше n , тем точнее ожидаемое прогнозное значение). Например, возьмем $n = 10$: 1; 1.77; 2.45; 3.24; 4.02; 4.8; 5.58; 6.36; 7.13; 8.

Возьмем теперь первый вектор $\langle 3, 5, 1 \rangle$ ($x_1 = 3, x_2 = 5, x_3 = 1$). Для этого вектора нужно найти меру принадлежности к множеству A . Опираясь на работы [4,5], выполняем следующий эксперимент. Последовательно рассматриваем ряд значений меры принадлежности μ_A , начиная с $\mu_A = 0$ и каждый раз увеличивая μ_A на d , где d - достаточно малая величина, например, $d = 0.1$. Для всех векторов, получаемых в ходе эксперимента, определяем принадлежность к множеству A на базе оценки (2), полученной выше. Заносим данные в таблицу. Обнаруживаем точку «перехода» вектора $\langle 3, 5, 1 \rangle$ из класса $\sim A$ в класс A с пятой строки (значения в столбце Y становятся положительными). По этим данным нетрудно получить общий результат: $\mu_A \langle 3, 5, 1 \rangle \approx 0.65$, $\mu_{\sim A} \langle 3, 5, 1 \rangle \approx 0.35$ (среднее между двумя разделяющими значениями:

0.3 и 0.4). Теперь строим такую же экспериментальную таблицу для вектора $\langle 3, 5, 1.77 \rangle$ и т.д.

Экспериментальная таблица для векторов $\langle 3, 5, _ \rangle$

x	$x1$	$x2$	$x3$	μ_A
1	3	5	1	0.65
2	3	5	1.77	0.65
3	3	5	2.45	0.55
4	3	5	3.24	0.55
5	3	5	4.02	0.45
6	3	5	4.8	0.45
7	3	5	5.58	0.45
8	3	5	6.36	0.35
9	3	5	7.13	0.35
10	3	5	8	0.25

По сути, эта таблица задает определение нечеткой меры на заданном диапазоне. Этим мы получаем решение задачи, а именно – для третьей координаты вектора $\langle 3, 5, ? \rangle$ определяем средневзвешенное значение из таблицы, равное 3,8577.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тукаева Э.М., Мухаметзянов И.З. Модель прогнозирования нечетких данных при решении бизнес задач предприятий ТЭК. – УэКС, №8, 2013.
2. Chen S.M. Forecasting enrolments based on fuzzy time series. – Fuzzy sets Systems, 1996, vol. 81, №3, p.p. 311- 319.
3. Демидов Л.А., Скворцова Г.С. Применение генетических алгоритмов для прогнозирования нечетких временных рядов. – Вестник РГРТУ, №1 (вып. 31), Рязань, 2010.
4. Боброва Н.Л., Герман О.В. Оценка адекватности нечеткого многомерного распознавателя на основе классифицирующего дерева. Информационные технологии и системы: Материалы международн. научной конференции, Минск, октябрь 2013, 242- 244.
5. Герман О.В., Боброва Н.Л. Многомерный нечеткий распознаватель на основе четкого распознавателя и его оценка. – Мн., Доклады БГУИР, №6(76), 2013, с.с.67- 71.

**ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ
ПОМЕЩЕНИЙ С НЕОДНОРОДНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКОЙ**

Оптимальные параметры воздуха представляют собой совокупность условий, наиболее благоприятных для самочувствия людей, или условий для правильного протекания технологического процесса. Создание оптимального состава воздушной среды в помещении может осуществляться путем удаления образовавшихся тепло-, газо- и влагоизбытков, пыли и добавления необходимого количества свежего воздуха с предварительной его подготовкой (охлаждение или нагрев, осушение или увлажнение, фильтрация и др.).

Система вентиляции — это комплекс оборудования, который обеспечивает необходимый воздухообмен в помещении, при этом отработанный воздух удаляется и заменяется свежим. Вентиляция, имеет огромное значение и для здоровья человека, и для самого здания и хранимых в нем материалов и установленного оборудования. Приточная система вентиляции используется для подачи в помещение свежего воздуха, который, кроме того что отфильтровывается, еще и может быть охлажденным или подогретым до заданной температуры, что под силу практически всем современным системам вентиляции

Поверхностные теплообменные аппараты являются основными элементами практически всех систем вентиляции. Процесс теплообмена в этих аппаратах отличается значительной распределенностью (неоднородностью) температур воздуха и воды. Температура изменяется вдоль трубки в пределах одного хода, между ходами и между рядами. Неравномерность температуры воздуха на выходе из воздухонагревателя может составлять десятки градусов и приближаться к половине перепада температур теплоносителя. Распределенность процесса существенно усложняет точный расчет и особенно аналитическое описание динамической характеристики аппарата.

Поскольку после теплообменного аппарата воздушный поток имеет ярко выраженный турбулентный характер и проходит через вентилятор, то в работе была рассмотрена схема поверхностного теплообменного аппарата в сосредоточенных параметрах, т. е. относительно средних по тепловому балансу температур воздуха на входе и выходе из аппарата.

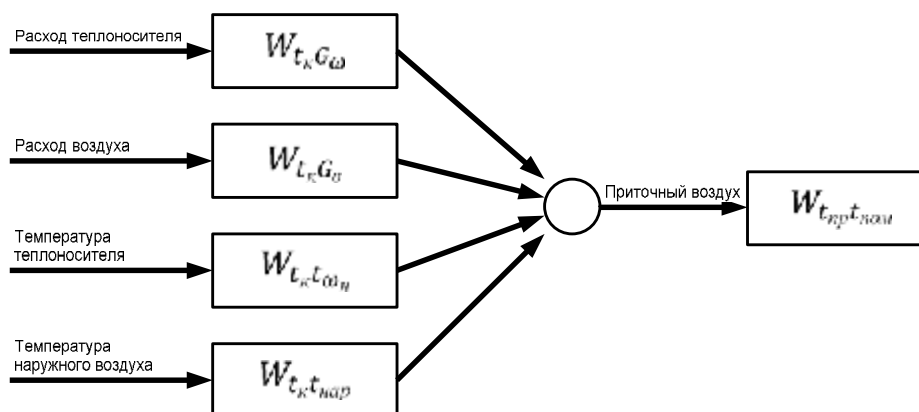


Рисунок 1 — Структурная схема системы вентиляции и помещения

Структурная схема вентиляционной системы и помещения представлена на рисунке 1. Для теплообменных аппаратов вентиляционных систем возмущающими воздействиями могут являться температура наружного воздуха, расход воздуха (если аппарат работает при переменном расходе), температура и расход теплоносителя через калорифер. В качестве управляющих воздействий, как правило, выступают расход теплоносителя или температура теплоносителя перед калорифером. Регулируемым параметром для системы вентиляции в целом является температура приточного воздуха, а для воздухоохладителя кроме температуры может потребоваться стабилизировать и влагосодержание.

Поскольку постоянная времени теплообменного аппарата в большой степени зависит от расхода теплоносителя через медные трубки калорифера, то при количественном регулировании интенсивности теплоотдачи, система должна быть однозначно классифицирована как нелинейная. Помимо постоянной времени от расхода теплоносителя еще будет зависеть и запаздывание, которое характеризует временную задержку на прохождение горячего теплоносителя от регулирующего органа до самого калорифера.

Математическое описание процесса теплообмена в помещении осложнено рядом факторов: источники теплоты произвольным образом распределены в объеме помещения; места подачи воздуха тоже расположены произвольно; мощности источников и расходы воздуха в отдельных частях помещения не сбалансированы [1]. Вследствие этого температура воздуха как регулируемый параметр оказывается распределенной сложным образом в объеме помещения. Источники теплоты в помещении лучисто-конвективные, при этом конвективная теплота поступает в воздух, а лучистая — на поверхность ограждений и оборудования. Плотность теплового потока на разных поверхностях

неодинакова. Вместе с изменением температуры воздуха происходит изменение температуры ограждений и оборудования, зависящее от размеров и теплофизических характеристик материалов, периода колебаний температуры (в периодическом процессе) [2]. Описание конвективного теплообмена осложнено тем, что его интенсивность, оцениваемая коэффициентом теплообмена переменная и может быть определена только приближенно, так как зависит от разных факторов.

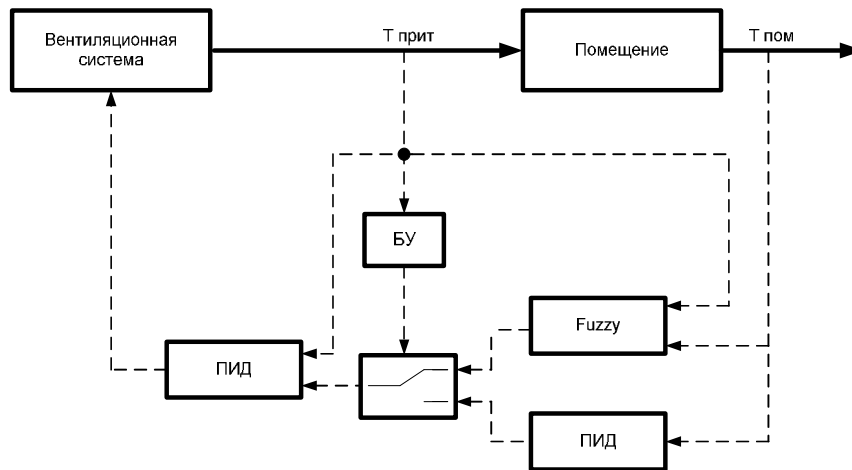


Рисунок 2 — Структурная схема гибридной системы управления

Учитывая пространственную распределенность параметров микроклимата в помещении; целый ряд нелинейных свойств, присутствующих в вентиляционной системе; транспортные запаздывания в математической модели помещения, которые нельзя не учитывать; а также физические ограничения, накладываемые на систему управления в целом, применение классических методов управления считается не приемлемым. Поэтому автором была предложена гибридная система управления (рисунок 2), которая за счет применения регулятора с нечеткой логикой позволяет уменьшить влияние больших постоянных времени и запаздываний в теплообменном аппарате вентиляционной системы, особенно в начальные моменты времени; применение второго канала в регуляторе нечеткой логики позволяет существенно уменьшить время переходного процесса.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сотников А. Г. Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции.- Л.: Машиностроение, 1984.- 240 с.
2. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха // Е.С. Бондарь, А.С. Гордиенко, В.А. Михайлов, Г.В. Нимич.- К.: Аванпост-Прим, 2005.- 560 с.

**ПОДСЕКЦИЯ: ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Председатель – канд. техн. наук, доцент
Кобринец Виктор Павлович
Секретарь – ассистент Лихавицкий Виталий Викторович

АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

В контексте сегодняшнего дня практически во все крупные производства внедрены системы, призванные максимально автоматизировать рабочий процесс. Это касается как работы управленцев, так и самого производственного процесса.

Автоматизация производства – это процесс в развитии машинного производства, при котором функции управления и контроля, ранее выполнявшиеся человеком, передаются приборам и автоматическим устройствам, основа развития современной промышленности, стремительно растущее направление. Цель автоматизации производства заключается в повышении эффективности труда, улучшении качества выпускаемой продукции, создании условий для оптимального использования всех ресурсов производства.

Следует отметить, что некоторые люди негативно относятся к автоматизации производства и повышению производительности труда, поскольку в рамках денежной системы это приводит к «технологической безработице», потере покупательной способности и средств к существованию для множества людей, в то время как рабочий день оставшихся работников не сокращается, а ответственность повышается. Однако у автоматизированного производства есть множество преимуществ, которые вместе с комплексным решением социальных последствий и проблем технологической безработицы, разумного применения достижений науки в технике с минимизацией нагрузки на окружающую среду позволят значительно повысить качество выпускаемой продукции, снизить его стоимость и увеличить прибыль.

Одной из важных задач для создания и работы оборудования является распознавание образов технологическим оборудованием без участия оператора. Данная функция применима во многих областях, таких как проверка выпускаемого продукта на качество, обеспечение точности, нанесение изображений на продукт и другие.

Использование оборудования, снабженного программным обеспечением для распознавания образов позволяет не только заменить работу оператора, но и повысить точность и скорость работы.

В случае использования роботизированной производственной техники для конкретного конечного продукта мы знаем как он должен выглядеть. В случае несложных форм конечного продукта мы можем сравнивать результат на конвейере с некоторыми легкогенерируемыми геометрическими фигурами. Например, стакан должен иметь круглое дно определенного диаметра, складываемые автоматом коробки

должны иметь форму параллелепипеда с заданными размерами. Для подобных сравнений может быть использовано преобразование Хафа. Оно служит для поиска на изображении фигур, заданных аналитически: прямых, окружностей и любых других, для которых вы сможете придумать уравнение с небольшим количеством параметров. Данный метод основывается на чисто математических расчетах, что значит, что нам не нужно связываться с машинным обучением, нейросетями.

Суть метода заключается в описании искомой фигуры уравнением. В классическом варианте данный метод используется для поиска прямых. В таком случае будет использоваться формула для описания прямой: $y = ax + b$. Затем создается аккумулятор: массив, размерность которого равна количеству неизвестных параметров пространства Хафа. В случае с поиском прямой будет использоваться двухмерный массив, так как имеются только два неизвестных параметра. Данный двухмерный массив можно назвать также Пространством Хафа. Одна прямая в обычном пространстве – это одна точка в пространстве Хафа.

Для работы с данным методом исходное изображение нужно бинаризовать (привести его к монохромному виду). Для каждой непустой точки необходимо определить множество прямых, которые могут через нее проходить. Для каждой точки и её соседей алгоритм определяет, достаточен ли вес границы в этой точке. Если да, то алгоритм вычисляет параметры прямой и увеличивает значение в ячейке аккумулятора, соответствующей данным параметрам.

После выполнения этих действий, необходимо найти ячейки аккумулятора с максимальными значениями. Для этого можно использовать пороговую фильтрацию. Так, по максимальным значениям на выходе могут быть определены наиболее подходящие прямые.

Также существует множество модификаций преобразования Хафа, позволяющих производить поиск и других фигур, таких как эллипсы, окружности и другие фигуры, которые можно описать как параметризуемые функции.

Данный метод не является сложным в реализации, однако имеет множество недостатков:

- результат сильно зависит от качества бинаризации исходного изображения, а это накладывает ограничения на сферу использования оборудования;

- является ресурсоемким, что повысит стоимость оборудования, на котором можно использовать программное обеспечение, разработанное с использованием преобразования Хафа;

- частые ошибки при распознавании (в основном из-за качества исходного изображения);

- низкая скорость работы;
- сужает область применения программного обеспечения.

Кроме методов, работающих на основе математических функций, можно использовать алгоритмы, основанные на машинном обучении (Machine Learning). Суть таких алгоритмов при решении задач распознавания объектов на изображении обычно сводится к следующему:

1) получение тестовой выборки с несколькими классами объектов (для каждого изображения существует набор признаков, по которым они были выбраны);

2) на основе этих данных алгоритм строит модель, по которой может в дальнейшем проанализировать новое изображение определив объект на нем в одну из групп по набору признаков.

Каждое из тестовых изображений – это точка в пространстве признаков. Её координаты это вес каждого из признаков на изображении.

Таким образом, имея данные об определенных признаках, алгоритм выделяет их в полученных для анализа изображениях. Для каждого релевантного случая в пространстве признаков будет существовать точка. Классификатор алгоритма разбивает пространство признаков таким образом, чтобы анализируемые изображения можно было поместить в диапазон значений этих признаков. Диапазон разбивается в зависимости от наличия аналогичных признаков у разных определяемых объектов.

На сегодняшний день существует множество вариантов реализации данной задачи в используемом производстве оборудования, однако данные методы с производением некоторых модификаций могут значительно увеличить свою производительность, а их использование в программном обеспечении для технологического оборудования, станков может стать более дешевым. На этапе первоначальной закупки подобное оборудование – достаточно серьезное финансовое вложение, и предприятие заинтересовано в его быстрой окупаемости. При модифицировании методов распознавания изображений можно добиться меньшей ресурсоемкости, а как следствие и возможности использования менее мощного, а значит более дешевого аппаратного обеспечения, что позволит производить более дешевый и доступный продукт.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Б. Яне. Цифровая обработка изображений / Б. Яне 2007 г.
- 2 А. Б. Орлов, И. А. Антамонов. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков ЧПУ на основе методологии рас-

познавания образов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки №10 2013 г.

3 Преобразование Хафа [Электронный ресурс] / Википедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Преобразование_Хафа. – Дата доступа: 15.09.2015.

4 Р. Гонсалес. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс 2012г.

УДК 611.53

С.Г. Тихомиров, проф., д-р техн. наук
 Ю.В. Пятаков, доц., канд. физ.-мат. наук
 О.В. Карманова, проф., д-р техн. наук
 В.И. Молчанов, доц., канд. хим. наук
 А. А. Маслов, асп.
 (ВГУИТ, г. Воронеж)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНЫ В ПРОЦЕССЕ ВУЛКАНИЗАЦИИ

Моделирование процессов вулканизации связано необходимостью расчета температурных полей в многоэлементных изделиях сложной конфигурации, теплофизические характеристики которых зависят от температуры [1,2]. Решение этой задачи позволяет моделировать процессы вулканизации изделий с целью неразрушающего контроля их качества, рассчитывать продолжительность процессов в широком диапазоне температур и оптимумов вулканизации с учетом теплофизических свойств и геометрических параметров объектов [2,3].

Постановка задачи. В качестве математической модели процесса рассмотрим систему уравнений теплового баланса вида:

$$C_k(T(t, x)) \frac{\partial T(t, x)}{\partial t} = \tilde{\lambda}_k [l_k(T(t, x)) \nabla^2 T(t, x)] + q_k(t, x), \quad x \in V_k, k=1, 2, \dots, K; \quad (1)$$

где $C_k(T(t, x))$, $l_k(T(t, x))$ соответственно объемная теплоемкость и теплопроводность k -го слоя шины; $T(t, x)$, $q_k(t, x)$ – температура и плотность тепловыделения в точке x k -го слоя в момент времени t : $q_k(t, x) = q_k^{сум} \times X(t, x) / \Delta t$, $q_k^{сум}$ – суммарное количество тепла, выделяемое в k -м слое; $X(t)$ – степень завершенности процесса вулканизации [4,5].

Систему уравнений (1) дополним начальными:

$$T(0, x) = T_0, \quad (2)$$

граничными:

$$T(t, x) = j_i(t, x), \quad x \in S_i, \quad i=1, 2; \quad (3)$$

и контактными условиями:

$$\lim_{x \rightarrow x} T(t, x) = \lim_{x \rightarrow x} T(t, x), \quad \lim_{x \rightarrow x} (T(t, x) \frac{\partial T(t, x)}{\partial n}) = \lim_{x \rightarrow x} (T(t, x) \frac{\partial T(t, x)}{\partial n}). \quad (4)$$

В (2)-(4) T_0 – начальная температура; S_1 и S_2 – поверхности контакта шины с пресс-формой и диафрагмой, соответственно; $x \in V_m$, $x \in V_p$, $x \in S_{m,p}$; $S_{m,p}$ – поверхность контакта смежных слоёв V_m и V_p , n - вектор нормали к $S_{m,p}$.

Степень завершенности процесса вулканизации $X(t)$ в точке x k -го слоя в момент времени t будем оценивать по формулам:

$$X(t) = 0, \text{ при } t < t_{\text{инд.}}; X(t) = (M(t) - M_0) / (M_{\text{max}} - M_0), \text{ при } t \geq t_{\text{инд.}}, \quad (5)$$

где $M(t)$, M_0 , M_{max} – текущее, минимальное и максимальное значения динамического модуля M , определяемые по данным контрольных испытаний образцов смеси при изотермическом режиме вулканизации [1]; $t_3 = t_3(t)$ – эквивалентное время вулканизации, $t_{\text{инд.}}$ – индукционный период вулканизации, определяемые по формулам:

$$t_3(t) = \int_0^t \exp(E_k R^{-1} ((T_1 + 27315)^{-1} - (T(t) + 27315)^{-1})) dt; t_{\text{инд.}} = \int_0^{t_{\text{инд.}}} \exp(E_{\text{инд.}} / R / (T(t) + 27315)) dt,$$

где E_k – энергия активации процесса вулканизации k -го слоя; R – универсальная газовая постоянная; $T(t)$ – текущее значение температуры в точке x в момент времени t , t_0 – константа, $E_{\text{инд.}}$ – энергия активации индукционного периода (с достаточной точностью может быть принято $E_k \gg E_{\text{инд.}}$).

Константу t_0 и значение $E_{\text{инд.}}$ определим по формулам:

$$E_{\text{инд.}} = R(T_2 + 27315)(T_1 + 27315) / (T_1 - T_2) \ln(t_{\text{инд.}}^1 / t_{\text{инд.}}^2), \quad t_0 = t_{\text{инд.}}^1 \exp(-E_{\text{инд.}} / R / (T_1 + 27315)),$$

где $t_{\text{инд.}}^1$ – индукционный период вулканизации при температуре T_1 ; $t_{\text{инд.}}^2$ – индукционный период вулканизации при температуре T_2 .

Решение системы уравнений (1)-(5). Введем в рассмотрение функции $S_k(T)$, $L_k(T)$, определенные следующим образом:

$$S_k(T) = \int_{T_0}^T C_k(t) dt, \quad L_k(T) = \int_{T_0}^T \rho_k(t) dt. \quad (6)$$

Тогда система уравнений теплопроводности (1) примет вид:

$$\rho_k S_k(t, x) / \rho_k t = D L_k(t, x) + q_k(t, x), \quad x \in V_k, \quad L_k(t, x) = L_k(T(t, x)) \quad (7)$$

Начальное условие (2) примет вид:

$$S_k(0, x) = L_k(0, x) = 0; \quad k=1, 2, \dots, K. \quad (8)$$

Граничные условия (3) примут вид:

$$S(t, x) = S^{(i)}(t, x), \quad L(t, x) = L^{(i)}(t, x); \quad x \in S_i, \quad i=1, 2; \quad (9)$$

где $S^{(1)}(t, x) = S_m(j_1(t, x))$, $L^{(1)}(t, x) = L_m(j_1(t, x))$, m – номер слоя, граница которого в точке x совпадает с S_1 ; $S^{(2)}(t, x) = S_n(j_2(t, x))$, $L^{(2)}(t, x) = L_n(j_2(t, x))$, n – номер слоя, граница которого в точке x совпадает с S_2 .

Контактные условия (4) примут вид:

$$S_m^l(t, \mathbf{x}) \Big|_{x_1 \hat{S}_{mp}} = S_p^l(t, \mathbf{x}) \Big|_{x_1 \hat{S}_{mp}} ; L_m^l(t, \mathbf{x}) \Big|_{x_1 \hat{S}_{mp}} = L_p^l(t, \mathbf{x}) \Big|_{x_1 \hat{S}_{mp}} ; \mathbb{P}_m(t, \mathbf{x}) \Big|_{x_1 \hat{S}_{mp}} = \mathbb{P}_p(t, \mathbf{x}) \Big|_{x_1 \hat{S}_{mp}} . \quad (10)$$

Далее будем полагать, что шина имеет осесимметрическую форму. В этом случае уравнение (7) удобно записать в цилиндрической системе координат Ox_1x_2 , ось Ox_1 которой совпадает осью симметрии шины:

$$\mathbb{P}_k(t, \mathbf{x}) \Big|_{\mathbb{P}} = \mathbb{P}_k^l(t, \mathbf{x}) \Big|_{\mathbb{P}_k^2} + \mathbb{P}_k^l(t, \mathbf{x}) \Big|_{\mathbb{P}_k^2} + \mathbb{P}_k(t, \mathbf{x}) \Big|_{x_2/x_2 + q_k(t, \mathbf{x})}, \quad \mathbf{x} \hat{V}_k, \quad \mathbf{x} = (x_1, x_2). \quad (11)$$

Численное решение системы уравнений (8)-(11) будем осуществлять методом конечно-разностной аппроксимации дифференциальных операторов в (11) на системе точек $\{t^{(m)}, \mathbf{x}_{j,i}\}$, где $t^{(m)} = t^{(m-1)} + Dt$; $t^{(0)} = 0$; $m = 1, 2, \dots, M_t$, Dt - шаг дискретизации по времени; $i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, K_i$. Точки $\mathbf{x}_{1,i}, \mathbf{x}_{2,i}, \dots, \mathbf{x}_{K_i,i}$; $i = 1, 2, \dots, N$ расположены на отрезках $[\mathbf{x}_{1,i}, \mathbf{x}_{K_i,i}]$, $\mathbf{x}_{1,i} \hat{S}_1$, $\mathbf{x}_{K_i,i} \hat{S}_2$. Способ аппроксимации операторов (11) описан в работе [1].

Пусть $\mathbb{W}(t^{(m)}, \mathbf{x}_{j,i})$ - вычисленное значение дифференциального оператора в правой части (11) в точке $\{t^{(m)}, \mathbf{x}_{j,i}\}$. Тогда, при $Dt \in C_{\min} D^2 / (l_{\max})$, на основе явной разностной схемы решения уравнения (11), имеет место соотношение:

$$S_k(t^{(m+1)}, \mathbf{x}_{j,i}) = S_k(t^{(m)}, \mathbf{x}_{j,i}) + Dt \mathbb{W}(t^{(m)}, \mathbf{x}_{j,i}), \quad \mathbf{x}_{j,i} \hat{V}_k,$$

где D - минимальное расстояние между точками $\mathbf{x}_{j,i}$; C_{\min} , l_{\max} - минимальное и максимальное значения теплоемкости и теплопроводности слоев шины. Учитывая, что $S_k(T)$ и $L_k(T)$ в (6) являются непрерывными и монотонными функциями аргумента T , значение температуры в точке $\mathbf{x}_{j,i}$ в момент времени $t^{(m+1)}$ можно определить по формуле:

$$T_k(t^{(m+1)}, \mathbf{x}_{j,i}) = S_k^{-1}(t^{(m+1)}, \mathbf{x}_{j,i}), \quad \mathbf{x}_{j,i} \hat{V}_k,$$

где S_k^{-1} - функция, обратная S_k .

Пример расчета. В примере выполнен расчет температурного поля для шины, имеющей наружный диаметр – 1,078 м, посадочный диаметр – 0,6096 м. Теплоемкость и теплопроводность слоев определялась соотношениями: $C_k(T) = c_k \gamma_k$, $l_k(T) = a_k - b_k \cdot T$. Значения параметров c_k, γ_k, a_k, b_k приведены в таблице.

Таблица - Теплофизические параметры компонентов шины

№	Наименование компонента	γ_k , кг/м ³	c_k , Дж/(кг·град)	a_k , Вт/(м·град)	b_k , Вт/(м·град·с)
1	Протектор	1162	717	0,2158	0,0002
2	Боковина	1154	663	0,30336	0,0004
3	Брекер	1126	641	0,26124	0,0003
4	Каркас	1121	615	0,2548	0,0003
5	Борт	3960	560	17,2	0,0001
6	Наполнительный шнур	1218	664	0,3426	0,0006

Расчет осуществлялся при заданных начальных: $T_0=25$ °С и граничных:

$$j_1(t, x) = j_2(t, x) = \begin{cases} 150 \text{ °С,} & \text{при } 0 \leq t \leq 2700 \text{ с,} \\ 25 \text{ °С,} & \text{при } t > 2700 \text{ с} \end{cases}$$

условиях.

На рисунке приведено распределение температуры и степень завершенности процесса $X(t)$ в момент времени $t = 3000$ с.

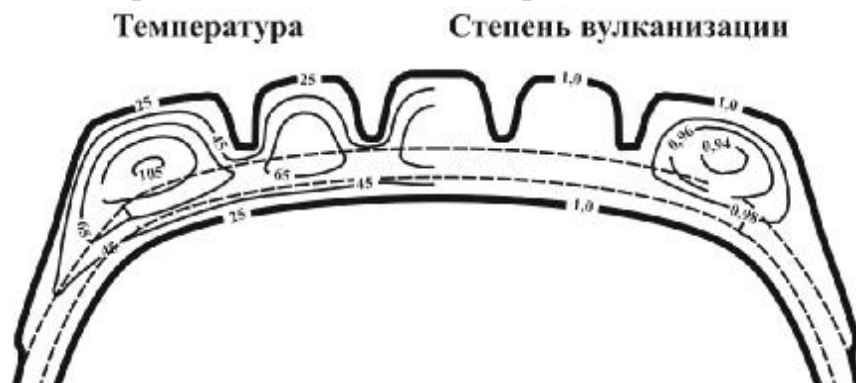


Рисунок – Распределение температуры и степени завершенности процесса вулканизации в момент времени $t = 3000$ с

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров, С. Г. Численный алгоритм расчета температурных полей пневматических шин в процессе вулканизации [Текст] / С.Г. Тихомиров, Ю.В. Пятаков, О.В. Карманова, В.И. Молчанов // Вестник ВГУИТ. – 2015. - № 2. С. 158-164.

2. Карманова, О. В. Моделирование кинетики неизометрической вулканизации массивных резиновых изделий [Текст] / О. В. Карманова, С. Г. Тихомиров, Ю.В. Пятаков, А. В. Касперович В. И. Молчанов // Труды БГТУ. – 2014. – № 4. – С. 100–104.

3. Лукомская, А. И. Расчеты и прогнозирование режимов вулканизации резиновых изделий [Текст] / А. И. Лукомская, П. Ф. Баденков, Л. М. Кеперша, – М.: Изд-во Химия, 1978. – 280 с.

4. Ищенко, В. А. Особенности расчетов режимов вулканизации пневматических шин с учетом трехмерности конструкции [Текст] / В. А. Ищенко, М. В. Шаптала // Системные технологии: региональный межвуз. сб. науч. трудов. – Днепропетровск, – 2008. – Вып. 2 (55). – С. 147 – 158.

5. Власко А. В. Влияние неизотермической вулканизации и механические свойства резиновых и резинокордных образцов [Текст] / А. В. Власко, М. Э. Сахаров, З. Порицкая // Каучук и резина – 1991. – № 6. С. 6-8.

УДК 621.515.(088.8)

С.Г. Тихомиров, проф., д-р техн. наук

Д.В. Арапов, доц., канд. техн. наук

С.С. Саввин, асп.

(ФГБОУ ВО ВГУИТ, г. Воронеж)

В.А. Курицын, канд. техн. наук,

(ЗАО «НПП «Центравтоматика», г. Воронеж)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АНТИПОМПАЖНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПРЕССОРОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

В системах, включающих компрессоры динамического действия (КДД), трубопроводы, емкости при определенных сочетаниях форм характеристик КДД и сети могут возникать и оставаться после снятия возмущения колебания подачи, напора и мощности. Эти автоколебания носят название «помпаж». Возникновение помпажа в современных высокодинамичных системах представляет большую опасность, так как это приводит к разрушению элементов системы и аварийному выбросу опасного газа в окружающую среду. Другим аварийным режимом, приводящем к поломке КДД, является торможение, вплоть до полной остановки, движущейся массы сжатого газа в межлопаточных каналах ротора, когда при достижении критических скоростей дальнейшее увеличение подачи газа оказывается невозможным. В этой связи важнейшей функцией системы автоматизации компрессорного агрегата является защита от режимов помпажа и торможения.

База знаний антипомпажной системы управления КДД (рис. 1) состоит из баз данных (блоки 1-4) и математического обеспечения.

Для расчета реального состояния промышленных газов используются (блок 5) уравнения Бенедикта – Вебба – Рубина (БВР), Ли – Эрбара – Эдмистера, Суги – Лю [1]. Первое служит для расчета волюметрических свойств газовой смеси и энтропии, второе – для определения энтальпий, третье – для расчета свойств неуглеводородных газов, если они входят в состав газовой смеси. Для холодильных паров наряду с БВР применено вириальное уравнение Боголюбова – Майера [2,3], представляющее собой степенной полином, описывающий зависимость коэффициента сжимаемости от плотности пара. Уравнения состояния решаются методом последовательных приближений.

Параметры, рассчитанные по уравнениям состояния, используются для контроля и диагностики состояния КДД (блок 9), а также в формулах (1), (2) приведения текущей степени сжатия к паспортной и наоборот (блок 6) паспортной степени сжатия к текущим условиям

всасывания. Приведение осуществляется согласно условия сохранения подобия треугольников скоростей рабочего колеса ротора в среднем и в характерных сечениях компрессора [4]:

$$p_{np} = \frac{\epsilon \epsilon \rho}{\epsilon \epsilon \rho} \frac{k-1}{h_n \star} - 1 \frac{\ddot{\omega} w_{nc}}{\ddot{\omega} w_{uz}} \frac{\ddot{\omega}^2}{\ddot{\omega}^2} \frac{\epsilon k_{nc} - 1}{\epsilon k - 1} \frac{\ddot{\omega}}{\ddot{\omega}} \frac{k \times z_{vc} \times R \times T_{vc}}{k_{nc} \times z_{nc} \times R_{nc} \times T_{nc}} + 1 \frac{\dot{u}}{\dot{u}} \frac{h_n \star_{nc}}{h_n \star_{nc} - 1}, \quad (1)$$

$$p_{nc}^{mek} = \frac{\epsilon \epsilon \rho}{\epsilon \epsilon \rho} \frac{k_{nc} - 1}{h_n \star_{nc}} - 1 \frac{\ddot{\omega} w_{uz}}{\ddot{\omega} w_{nc}} \frac{\ddot{\omega}^2}{\ddot{\omega}^2} \frac{\epsilon k_{nc} - 1}{\epsilon k_{nc} - 1} \frac{\ddot{\omega}}{\ddot{\omega}} \frac{k_{nc} \times z_{nc} \times R_{nc} \times T_{nc}}{k \times z_{vc} \times R \times T_{vc}} + 1 \frac{\dot{u}}{\dot{u}} \frac{h_n \star}{h_n \star - 1}, \quad (2)$$

где p_{np}, p_{nc}^{mek} - приведенная к паспортным условиям всасывания текущая и паспортная степень сжатия соответственно; p_{nc} - паспортное значение степени сжатия; p - текущая степень сжатия, равная отношению абсолютных давлений нагнетания и всасывания; w_{nc}, w_{uz} - паспортное и текущее измеренное значение скорости вращения ротора компрессора; k_{nc}, k - паспортное и расчетное текущее значение показателя изэнтропы газа; R_{nc}, R - паспортное и расчетное текущее значение газовой постоянной; T_{nc}, T_{vc} - паспортное и текущее значение абсолютной температуры газа на всасе компрессора; z_{nc}, z_{vc} - паспортное и расчетное текущее значение коэффициента сжимаемости газа на всасе компрессора; h_n - текущее значение политропного коэффициента полезного действия.

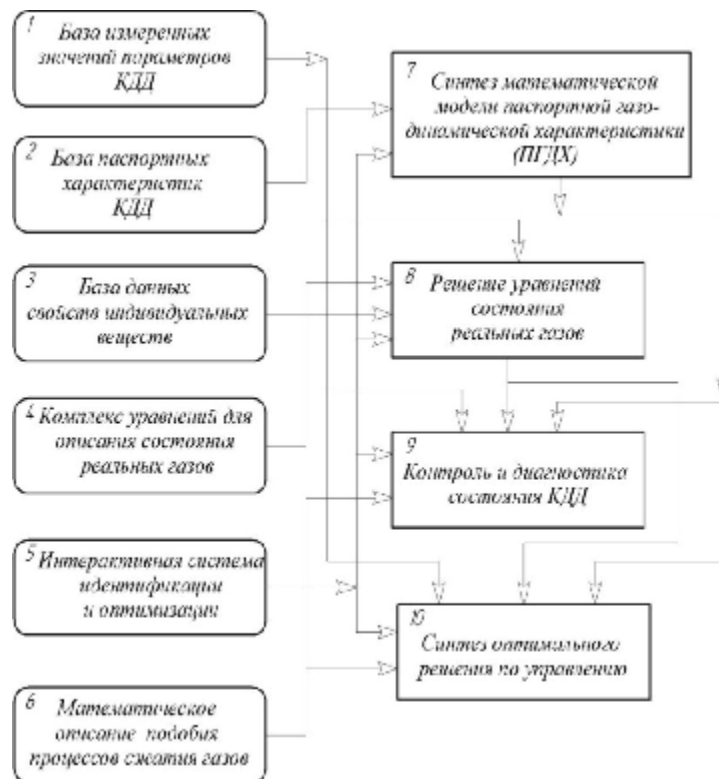


Рисунок 1 – Структура базы знаний антипомпажной системы управления

На основе формул (1) или (2) формируется переменная для антитомпажного регулятора.

Структуры моделей ПГДХ, наиболее употребляемых КДД можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 & 1) \text{ ПГДХ КДД с входной регулирующей дроссельной заслонкой:} \\
 & p_{nc} = a_1 + a_2 \times Q \times \sin y \times \exp(a_3 \times Q \times \sin y) + a_4 \times Q \times \exp(a_5 \times Q) + a_6 \times \sin y \times \\
 & \times \exp(a_7 \times \sin y) + a_8 \times Q \times \cos y \times \exp(a_9 \times Q \times \cos y) + a_{10} \times (Q \times \sin y)^{a_{11}} \times \\
 & \times \exp[a_{12} \times (Q \times \sin y)^{-1}] / \{a_{13} \times \exp[a_{14} \times Q \times \sin y]^{-1}\} + \\
 & + Q^{a_{15}} \times \sin^2 y / (a_{16} - \sin^2 y),
 \end{aligned} \tag{3}$$

где Q – объемный расход сжимаемого газа, $м^3 / с$; $a_1 - a_{16}$ – коэффициенты, y – угол открытия дроссельной заслонки.

Паспортные линии помпажа и торможения аппроксимируются зависимостями:

$$p_{nc}^{nm} = a_1 + a_2 Q_{nm}; \quad p_{nc}^{mp} = b_1 + b_2 Q_{mp}. \tag{4}$$

Отдельные точки линий помпажа и торможения определяются из решения соответственно уравнений:

$$dp_{nc} / dQ = 0; \quad dp_{nc} / dQ = 1, \tag{5}$$

при заданных углах открытия дроссельной заслонки.

2) ПГДХ КДД с регулируемым приводом:

$$\begin{aligned}
 & p_{nc} = a_1 + a_2 q + a_3 n + a_4 q^2 + a_5 n^2 + a_6 qn + a_7 \sqrt{qn} + \\
 & + a_8 / (qn) + a_9 (qn)^2; \quad q = Q / 1000; \quad n = N / 1000,
 \end{aligned} \tag{6}$$

где N – скорость вращения ротора компрессора, $об / мин$; $a_1 - a_9$ – коэффициенты регрессии.

Отдельные точки линий помпажа и торможения определяются по формуле (5) при заданных частотах вращения привода турбокомпрессора.

3) ПГДХ КДД с нерегулируемым электроприводом:

$$\begin{aligned}
 & p_{nc} = a_1 + a_2 \times q^{0.5} + a_3 \times q^2 + a_4 \times q^3 + a_5 \times q^4 + a_6 \times q^5 + \\
 & + a_7 \times q^6 + a_8 \times q^7 + a_9 \times q^8 + a_{10} \times q^9 + a_{11} \times q^{-1.5}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Линии помпажа и торможения рассчитываются по формулам (4), (5).

Для решения задач идентификации математических моделей и оптимизации разработана (модуль 5) интерактивная система, которая включает в себя метод Гаусса для решения систем линейных уравнений, генетический алгоритм и метод Хука-Дживса – для решения задач нелинейного программирования, алгоритм нейронной сети радиальных базисных функций (RBF) – для определения модели типа «черный ящик», а также развитый интерфейс для пользователя системой. Система реализована на языке программирования C# в среде

в среде MS VisualStudio 2010.

ПГДХ аппроксимируются таким образом, чтобы среднеквадратичная оценка относительной погрешности на всем диапазоне определения степени сжатия была менее $\pm 1,0\%$. Это необходимо для точного определения точек помпажа и торможения потока газа и соответствующих им точек заданного запаса устойчивости (ЗЗУ) к помпажу и торможению. В противном случае назначение ЗЗУ теряет смысл, так как он будет реализовываться с большой и непостоянной погрешностью.

Синтез оптимального решения по управлению включает расчет задания антипомпажному регулятору, который формируется в блоке 10 на основе ЗЗУ и моделей ПГДХ. При резком изменении расхода газа потребителем, автоматически, с предварением увеличивается значение ЗЗУ от первоначального до максимального подбираемого экспериментально. Соответственно этому увеличивается или уменьшается задание регулятору степени сжатия [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие / Р. Рид., Дж. Праусниц, Т. Шервуд / пер. с англ. под ред. Б.И. Соколова. – 3-е изд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
2. Пластинин, П.И. Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет / 2-е изд.-М.: Колос, 2000. – 456 с.
3. Бухарин, Н.Н. Моделирование характеристик центробежных компрессоров / Н.Н. Бухарин. – Л.: Машиностроение, 1983. – 214 с.
4. Рис, В.Ф. Центробежные компрессорные машины / В.Ф. Рис. – 3-е изд. перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1981. – 351 с.
5. Пат. 2434162 Российская федерация, МКИ F04 D27/2. Способ защиты компрессора от помпажа [Текст] / В.А. Курицын, Д.В. Арапов, Е.И. Пеганов [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Нижнекамнефтехим». – 2010119101/06; заявл. 11.05.2010; опубл. 20.11.2011, Бюл. №32 (Ч.III).

О.А. Фурса, доц., канд. техн. наук
О.Ю. Олейник, доц., канд. техн. наук
(ДВНЗ УДХТУ, г. Днепропетровск)

ЗАВИСИМОСТЬ КАЧЕСТВА РЕЗИНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ОТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА

При выполнении моделирования процесса производства резино-технических изделий, необходимо определить какие технологические параметры необходимо регулировать, и какие при этом выбирать регулирующие воздействия[1-2].

Известно, что высокий уровень деформационно-прочностных свойств резин обеспечивает фазовая морфология с минимальным размером частиц гетерофазы, в то время как для роста уровня адгезионного взаимодействия необходимо увеличение размера частиц гетерофазы[3].

В процессе исследования рассмотрели изменение следующих входных параметров: $X_{1,2}$ – каучуки, $X_{3,4,5}$ – низкомолекулярные соединения, X_6 – смесь, X_7 – наполнитель, C_1 – концентрация низкомолекулярных соединений. Для того, чтобы выяснить влияние того или иного параметра на конечный продукт, будем задавать 10% отклонение каждого параметра, как в положительную, так и в отрицательную сторону.

В качестве показателей качества конечного продукта будем рассматривать соотношение низкомолекулярных веществ и наполнителя в конечном продукте выраженное в долях, а также суммарный выход продукта ($\sum W$) выраженный в килограммах.

Другими словами, данный программный продукт позволяет определить в какой степени изменение того или иного технологического параметра повлияет на качество конечного продукта.

Для получения весовых коэффициентов влияния мы стабилизируем все входные параметры и задаем отклонение только одного (исследуемого параметра), после чего оцениваем качество продукта на выходе[4].

Для автоматизации систем управления, моделирование процесса производства пока единственный, практически доступный метод оценки управляющих алгоритмов и структурных схем управления.

Для решения поставленной задачи использовали программу ChemCAD, которая позволяет получить результаты расчетов совпадающие с данными промышленных экспериментов [4]. Это дает возможность решать как задачи определение влияния того или иного па-

раметра на конечный продукт так и повысить эффективность действующих производств, определяя оптимальные параметры процессов в отдельных аппаратах с позиции всего производства в целом.

Исходя из предложенного метода, для того чтобы определить требования к точности измерения того или иного входного параметра необходимо знать требования описывающие допустимые отклонения показателей качества конечного продукта. При помощи разработанного алгоритма рассчитаем, какое максимальное отклонение входного параметра не вызовет ухудшение параметров качества выходного продукта.

В результате проведенных исследований мы можем с высокой степенью достоверности сформулировать требования к точности измерения регулируемых параметров и выбрать регулирующие воздействия.

При помощи данного алгоритма можно оценивать влияние точности определения таких параметров протекания процесса, как температура, давление, уровень заполнения оборудования, на качество конечного продукта. Оценивать отклонение параметров технологического процесса можно не только в статическом, но и в динамическом режиме, при этом мы сразу можем получать зависимости параметров конечного продукта от заданного диапазона отклонений входных параметров.

Применение предложенного метода построения АСУ ТП позволяет получить достоверную информацию на стадии проектирования и соответственно построить оптимальную систему управления. Что в свою очередь позволяет оптимизировать затраты на создание контрольно измерительных систем и повысить качество производства резино-технических изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудьянов А., Беркут А., Системы автоматического контроля технологических параметров / А. Рудьянов.: Издательство Ассоциации строительных вузов 2005.-144 стр.
2. Ицкович Э. Л., Методы рациональной автоматизации производства / Э. Л. Ицкович. Инфра-Инженерия.: 2008.- 240 стр.
3. Донцов А.А. Каучук–олигомерные композиции в производстве резиновых изделий / А.А.Донцов, А.А. Канаузова, Т.В.Литвинова. - М.: Химия, 1986. - 216с.
4. Дьяконов В. MathCAD 2001: специальный справочник / В.Дьяконов. - СПб.: Питер, 2006. - 832с.

**ФОРМАЛЬНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ
ОПТИМАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С ЭНЕРГОЕМКИМИ ПОТРЕБИТЕЛЯМИ**

Переход от директивных методов распределения топлива к экономическим при неуклонном росте цен на энергоносители влечет за собой ряд принципиальных трудностей и предполагает решение комплекса взаимосвязанных задач. К их числу относятся: оптимизация распределения активной мощности между электростанциями энергосистемы с учетом потерь в сети и удельных расходов топлива; учет ограничений по поставкам топлива; режимно-экономическое взаимодействие генерирующих и потребляющих предприятий с учетом регулирующего эффекта нагрузки; выравнивание графиков нагрузки энергосистемы и промышленных предприятий; оперативное управление электропотреблением с оптимизацией режима работы системных потребителей-регуляторов. Комплексное рациональное использование топливно- энергетических ресурсов предполагает оптимальные режимы работы всех звеньев энергетического хозяйства. Однако традиционный подход к проблеме оптимизации учитывает, прежде всего, экономичное распределение нагрузок между генерирующими источниками энергии.

Вместе с тем решение полной задачи оптимизации должно быть получено с учетом оптимальной нагрузки потребителей, т.е. необходимо более правильно учитывать влияние выбранного оптимального режима на работу потребителей. Такой подход к проблеме оптимизации обеспечивает наибольшую эффективность работы одновременно всех звеньев энергохозяйства, включающих производство, передачу и распределение энергий с учетом интересов потребителей. Таким образом, полное решение всей проблемы возможно при переходе от отдельных режимно-экономических и организационно-технических мероприятий к их системному взаимодействию на основе создания динамической информационной модели. Согласно имеющимся сведениям, почерпнутым в различных зарубежных источниках информации, решение подобных задач в комплексной постановке отсутствует, хотя необходимость этого решения очевидна. Поставленная задача не только не решается, но даже не сформулирована в полном объеме, оптимизационные расчеты выполняются группами режимов энергоуправлений эпизодически в традиционной постановке, без

должного учета оптимальных графиков электропотребления промышленных узлов нагрузки. В силу несовпадения режимных интересов электрогенерирующей и электропотребляющей сфер, организация их взаимодействия сводится к отысканию компромисса, т.е. некоторой системы взаимных уступок сущность которых состоит в допустимых отклонениях каждой из взаимодействующих сторон. В современных условиях слишком явное предпочтение режимных интересов энергосистемы режимным интересам потребителей не может рассчитывать на профессиональную, общественную и административную поддержку. Тем не менее, представляется очевидным, что следует стремиться к достижению определенного компромисса, учитывающего интересы обеих сторон. Кроме того, поставленная задача в полном объеме пока не решена и в связи с необходимостью разработки комплекса взаимосвязанных задач, включающих создание системы мониторинга расходных характеристик промышленных предприятий, в том числе и определение их резервов регулирования с учетом дифференцированных по зонам суток тарифов, создание базы данных расходных характеристик удельного электропотребления и выработку механизма контроля за его соблюдением.

Определение расходных, приведенных расходных характеристик потребителей электроэнергии, а также процесс формирования характеристик и определение резерва регулирования для энергоемких промышленных предприятий без плотного взаимодействия с энергосистемой рассмотрен в ряде работ. Совместить требования вычислительной эффективности и охвата в моделях оптимизации многих факторов практически удается только при функциональной декомпозиции задачи, в частности, при раздельном решении задач оптимизации активных и реактивных мощностей.

В общем виде задачу комплексной оптимизации режимов ЭЭС с учетом вариации нагрузок можно сформулировать следующим образом. Необходимо минимизировать некоторую функцию, являющую собой эксплуатационные затраты, с учётом соответствующих ограничений в заданном временном интервале t . Обычно при оптимизации режимов в качестве целевой функции принимаются суммарные эксплуатационные издержки I в электроэнергетической системе (ЭЭС), зависящие нелинейно и неявно от параметров оптимизации:

$$I_t = I'_t(\mathbf{T}) + I''_t(\boldsymbol{\pi}) + I'''_t(\mathbf{y}), \quad (1)$$

где $I'_t(\mathbf{T})$ -- издержки, связанные с генерацией, включая расходы на топливо, и реализацией электроэнергии на временном интервале t ; $I''_t(\boldsymbol{\pi})$ — издержки, вызванные передачей электроэнергии, ее потреблением и затратами на систему управления мощностью потребителей (экономические потери от регулирования нагрузки); $I'''_t(\mathbf{y})$ — из-

держки, определяемые величиной ущерба от отклонения режимных и качественных параметров электроэнергии от своих оптимальных значений, в том числе и от недоотпуска энергии при аварийных и послеаварийных режимах работы.

Целевая функция (1) является сложной, поскольку мощности электростанций и нагрузочных узлов неявно связаны с другими переменными с помощью системы нелинейных уравнений установившихся режимов, уравнениями небаланса активной и реактивной мощностей в узлах ЭЭС, а также системой технологических и режимных ограничений. При этом независимые переменные (параметры оптимизации) можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} P_i, Q_i, i \in I_{PQ}; P_j, Q_j, j \in J_{PQ}; \\ P_i, U_i, i \in I_{PU}; P_j, U_j, j \in J_{PU}; U_0; \\ k'_{ij}, k''_{ij}, (ij) \in M_T, \end{array} \right\}$$

а зависимые переменные — в виде:

$$\left. \begin{array}{l} U'_i, U''_i, i \in I_{PQ}; U'_j, U''_j, j \in J_{PQ}; \\ \theta_i, i \in I_{PU}; \theta_j, j \in J_{PU}; P_0, \end{array} \right\}$$

P_i, Q_i — активная и реактивная мощности электростанций; P_j, Q_j — активная и реактивная мощности нагрузочных узлов; U'_i, U''_i — действительная и мнимая части вектора напряжения генерирующего узла ЭЭС; U'_j, U''_j — действительная и мнимая части вектора напряжения нагрузочного узла; k'_{ij}, k''_{ij} — действительная и мнимая части комплексного коэффициента трансформации регулируемого трансформатора в ЭЭС; $\theta_i(j)$ — тангенс половинного угла вектора напряжения узла $i(j)$; P_0, U_0 — активная мощность и напряжение базисного (опорного) узла; I_{PQ}, J_{PQ} — множество генераторных и нагрузочных узлов типа P, Q ; I_{PU}, J_{PU} — множество генераторных и нагрузочных узлов типа P, U ; I_{PU}, J_{PU} — множество ветвей схемы замещения ЭЭС, отображающих регулируемые трансформаторы; θ_i, θ_j — тангенс половинного угла вектора напряжения генераторного (нагрузочного) узла. Параметры оптимизации связаны с зависимыми переменными системой нелинейных уравнений установившихся режимов и уравнением небаланса активной мощности в ЭЭС в форме Y или Z , а также уравнениями баланса токов (напряжений) или мощностей в зависимости от формы отображения векторов узловых напряжений в схеме ЭЭС.

При записи уравнений установившегося режима в Y — форме для узлов $i \in I_{PQ}(J_{PQ})$ в виде небаланса токов в узлах ЭЭС, а для узлов $i \in I_{PU}(J_{PU})$ в виде небаланса активных в узлах, условия

ограничения типа равенств в задаче комплексной оптимизации режимов можно представить в следующей форме:

$$\begin{aligned}
 & I_{i(j)\text{нб}}(P_i, Q_i, U_i', U_i'', i \in I_{PQ}; P_j, Q_j, U_j', U_j'', j \in J_{PQ}; \\
 & P_i, U_i, \theta_i, i \in I_{PU}; P_j, U_j, \theta_j, j \in J_{PU}; U_0, k'_{ij}, k''_{ij}, (ij) \in M_T) = 0; \\
 & I_{i(j)\text{нб}}(P_i, Q_i, U_i', U_i'', i \in I_{PQ}; P_j, Q_j, U_j', U_j'', j \in J_{PQ}; \\
 & P_i, U_i, \theta_i, i \in I_{PU}; P_j, U_j, \theta_j, j \in J_{PU}; U_0, k'_{ij}, k''_{ij}, (ij) \in M_T) = 0; \\
 & P_{i(j)\text{нб}}(P_i, Q_i, U_i', U_i'', i \in I_{PQ}; P_j, Q_j, U_j', U_j'', j \in J_{PQ}; \\
 & P_i, U_i, \theta_i, i \in I_{PU}; P_j, U_j, \theta_j, j \in J_{PU}; U_0, k'_{ij}, k''_{ij}, (ij) \in M_T) = 0.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Первые два уравнения составляют для узлов типа P, Q , третье — для узлов типа P, U . Для решения данной системы нелинейных уравнений установившегося режима успешно используется известный метод Ньютона-Рафсона, причем на каждой итерации вместо системы (2) применяется линеаризованная система уравнений относительно приращений искомых переменных $U_i', \Delta U_i'', i \in I_{PQ}; \Delta U_i', \Delta U_i'', j \in J_{PQ}$ и $\Delta U, i \in I_{PU}; \Delta Q_j, j \in J_{PU}$ с элементами матрицы Якоби в качестве коэффициентов левых частей уравнений и небалансами токов и активных мощностей в узлах ЭЭС в правых частях уравнений. Независимые переменные связаны также с зависимыми с помощью уравнения небаланса активной мощности в ЭЭС вида

$$\begin{aligned}
 & P_{\text{онб}}(P_i, Q_i, U_i', U_i'', i \in I_{PQ}; P_j, Q_j, U_j', U_j'', j \in J_{PQ}; \\
 & P_i, U_i, \theta_i, i \in I_{PU}; P_j, U_j, \theta_j, j \in J_{PU}; U_0, k'_{ij}, k''_{ij}, (ij) \in M_T) = 0.
 \end{aligned}$$

Кроме ограничений-равенств в задаче имеют место ограничения-неравенства, налагаемые на параметры оптимизации:

$$\left. \begin{aligned}
 & \underline{P}_i \leq P_i \leq \overline{P}_i; \\
 & \underline{Q}_i \leq Q_i \leq \overline{Q}_i
 \end{aligned} \right\} i \in I_{PQ};$$

множество ветвей схемы энергосистемы, для которых учитываются ограничения на потоки активной мощности при оптимизации режимов. Таким образом, нелинейная целевая функция \mathbf{I} нелинейно и неявно зависит от большого количества факторов:

$$\mathbf{I} = \mathbf{f}(P_i, Q_i, U_i', U_i'', i \in I_{PQ}; P_j, Q_j, U_j', U_j'', j \in J_{PQ}; P_i, U_i, \theta_i, i \in$$

$$I_{PU}; P_j, U_j, \theta_j, j \in J_{PU}; Q_i, i \in P_{PU}; Q_j, j \in$$

$$J_{PU}; U_0; P_0; Q_0; k'_{ij}, k''_{ij}, (ij) \in M_T; P_{ij}, (ij) \in L). \text{ Степень нелинейно-}$$

сти целевой функции \mathbf{I} определяется, в основном, нелинейностью расходных характеристик станций ЭЭС, т.е. целевая функция \mathbf{I} в общем случае близка к квадратичной и имеет минимум. Разрешение поставленной проблемы представляет собой весьма сложную задачу, решение которой можно получить, например, с применением некоторых упрощений и допущений, основными из которых являются методы пространственной, временной и функциональной декомпозиции.

Баро Бандия
(БНТУ, г. Минск)

О.И. Александров, доц., канд. техн. наук

П.Д. Свирский, магистрант
(БГТУ, г. Минск)

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ МЕТОД ВЫБОРА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ РЕГИОНА

Составление перспективного плана развивающейся электро-энергетической системы (ЭЭС) подразумевает решение комплекса задач, обеспечивающих минимальные приведенные затраты. В проектный комплекс задач входят такие, как выбор состава генерирующего оборудования, построение оптимальной конфигурации сети, распределение нагрузок между станциями с минимизацией расхода топлива и с наименьшими потерями в электрических сетях, а также рациональная работа всего развивающегося региона с учетом межсистемных линий электропередачи. Формулировку данной проблемы можно описать с помощью *многокритериальной целевой функции*, которая включает в себя минимум суммарного расхода топлива, минимум потерь мощности и энергии, максимизацию резерва мощности в энергосистеме, максимизацию индекса системной надежности, приведенные затраты на поддержание системы управления мощностью потребителей и их суммарный ущерб при аварийных ситуациях. Основные показатели, необходимые для принятия оптимальных решений, должны быть разработаны на основе системного анализа с охватом всех определяющих факторов. Важным элементом такого планирования является оптимизация баланса мощностей, т.е. оптимизация текущих режимов за рассматриваемый интервал времени, когда параметры сети можно считать условно постоянными. При таком допущении каждый интервал рассматривается как независимый, а осуществление баланса между производством и потреблением электроэнергии (ЭЭ) необходимого качества считается гарантированным. В этом случае задача планирования оптимального развития данного региона распадается на ряд последовательных задач, результаты решения которых в агрегированном виде дают искомый перспективный вариант. Если при этом учтены ограничивающие условия по изменяющимся параметрам и достигнут минимум затратных средств, то планируемый вариант для исследуемого периода времени будет оптимальным.

При результирующей дефицитности развивающейся энергосистемы экономически целесообразные величины закупаемой мощности

и энергии определяются на основе технико-экономических и режимных расчетов с учетом технических, режимных, директивных и ценовых ограничений. Для расчетного уровня покупной мощности определяется оптимальная загрузка электростанций (ЭС) энергосистемы для планируемых максимальных режимов. Получаемое при этом рациональное значение дефицита мощности для разных нагрузок энергосистемы позволяет определить оптимальное количество покупной ЭЭ из соседних энергосистем на планируемый расчетный период.

Исходными данными для анализа перспективных режимов являются расчетные балансы мощности по энергосистеме, принимаемые на основе прогнозов электропотребления и электрических нагрузок на рассматриваемый перспективный период. Эти балансы разрабатываются для основного планируемого режима, а также для заданных режимов, которые могут иметь место при неблагоприятных сочетаниях, в частности, плановых ремонтов основного энергетического оборудования. В этом случае необходимо предусмотреть покрытие дефицита.

Таким образом, целевая функция в детерминированной постановке может быть сформулирована в виде:

$$Z = \{\sum_T^t \alpha_{1t} Y_{1t}(B) + \alpha_{2t} Y_{2t}(\pi) + \alpha_{3t} Y_{3t}(R) + \alpha_{4t} Y_{4t}(H) + \alpha_{5t} Y_{5t}(Зр) + \alpha_{6t} Y_{6t}(\Delta p)\} \rightarrow \min, \quad (*)$$

где $\alpha_{1t}, \dots, \alpha_{6t}$ – весовые корректирующие коэффициенты стоимости, определяемые на основании совместных экспертных оценок специалистов планово-перспективных и экономических служб.

Здесь $Y_{1t}(B)$ – суммарный расход топлива на электростанциях (ЭС) для прогнозируемого электропотребления, при котором обеспечивается минимум целевого функционала (*) при соблюдении основных ограничивающих условий по балансу мощностей ЭЭС; по регулировочному диапазону каждой ЭС и режимным двусторонним ограничениям. Индекс t – соответствует исследуемому интервалу периода T .

$Y_{2t}(\pi)$ – суммарные потери мощности в энергосистеме. При составлении эквивалентной схемы замещения основные перетоки мощности от шин передающих подстанций (П/СТ) соседних избыточных энергосистем представлены в виде генерирующих узлов, а шины принимающих П/СТ дефицитной энергосистемы – в виде потребительских узлов. Тогда потери активной мощности в общем виде могут оцениваться матричным выражением [1]:

$$\pi_p = [P, Q, p, q, U_0] \cdot B(P, Q, p, q, U_0) \cdot [P, Q, p, q, U_0]^*,$$

где P, p – векторы-строки активных мощностей в генерирующих и потребляющих узлах эквивалентной схемы замещения ЭЭС; Q, q – векторы-строки реактивных мощностей в генерирующих и потребляющих узлах соответственно; U_0 – номинальное напряжение базисного

(балансирующего) узла; $\mathbf{B}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{p}, \mathbf{q}, U_0)$ -- матрица коэффициентов потерь, причем векторы не содержат компонентов, соответствующих балансирующему узлу, а мощности в узлах потребления принимаются отрицательными; * -- символ транспонирования матрицы. Пользуясь введенными обозначениями, функцию минимизации потерь представим в виде $\pi_p \rightarrow \min \Delta P$ при условии соблюдения двусторонних ограничений для узловых мощностей.

$Y_{3t}(R)$ – наименьший за рассматриваемый период фактический резерв активной мощности в ЭЭС, который в общем виде может быть представлен следующим образом:

$$R = \min[R_0(t) = P(t) - p(t)] \rightarrow \max,$$

где $R_0(t) = P(t) - p(t)$, $t \in (T)$ – график резерва активной мощности в ЭЭС; $P(t)$ – планируемый график изменения располагаемой мощности ЭЭС в течение рассматриваемого интервала времени T ; $p(t) = p_{max}^{c.п.}(t) + p_{max}^{обм}(t)$, $t \in (T)$, – прогнозируемый график суточных максимумов нагрузки ЭЭС с учетом потерь в сети на период T ; $p_{max}^{c.п.}(t)$ – прогнозируемый график суточных максимумов собственного потребления с учетом потерь в сети; $p_{max}^{обм}(t)$ – прогнозируемый график выдачи мощности в ЭЭС в часы максимума нагрузки данной энергосистемы. Тогда с учетом изложенного можно записать: $Y_{3t} = 1/R$.

$Y_{4t}(H)$ – показатель системной надежности, который в самом общем виде может быть записан, как показатель эффективности работы ЭЭС следующим образом:

$$F = \frac{\sum_{l=1}^N A_l(t) - \Delta A_{\Sigma}(t)}{\sum_{l=1}^N A_l(t)}, \quad l \in N, t \in T,$$

где $\sum_{l=1}^N A_l(t)$ -- суммарная энергия, потребляемая элементами системы, причем, в зависимости от типа рассматриваемого элемента она может быть генерируемая, передаваемая и потребляемая; $\Delta A_{\Sigma}(t)$ – суммарный недоотпуск ЭЭ по всей ЭЭС; T – полное время, за которое рассчитывается недоотпущенная ЭЭ; l – текущий индекс элемента системы. В этом случае для приближенной оценки этого показателя можно принять: $Y_{4t} = 1/F$. Индекс системной надежности -- это отношение отпущенной энергии потребителю к энергии спроса [2]:

$$\delta = \frac{A_{отп}}{A_{отп} + \Delta A_{\Sigma}},$$

где $A_{отп}$ – отпущенная потребителям ЭЭ; ΔA_{Σ} – недоотпущенная ЭЭ из-за различных нарушений в системе, включая потерю устойчивости и отказы противоаварийной системной автоматики.

$Y_{5t}(3p)$ – приведенные затраты на поддержание системы управления мощностью потребителей. Здесь рассматриваются наиболее мощные и энергоемкие промышленные предприятия, которые могут фактически повлиять на совмещенный график нагрузки ЭЭС. В качестве совмещенного графика нагрузки может выступать график любой режимной энергетической иерархии – от группового графика крупного промышленного предприятия до эквивалентного графика нагрузки ЭЭС в составе ЭО. В этом случае оптимальный график нагрузки потребителей выполняется при условии $Y_{5t} \rightarrow \min$.

$Y_{6t}(\Delta p)$ – суммарный ущерб промышленных потребителей при ограничении их мощности на величину Δp в результате различных нарушений электроснабжения [3]. Количественная величина ущерба обычно определяется с помощью интегральных характеристик ущербов для узлов электропотребителей :

$$3(yT \sum_{t=1}^N Y_i \Delta P) \rightarrow \min,$$

где Y_i , руб/кВт·ч – ущерб i -го потребителя при его отключении (ограничении); ΔP – отключаемая мощность; t – время отключения; y – число отключений за период T .

Таким образом, минимизация функционала (*) позволит получить оценку стоимости перспективного плана создаваемой системы для электроснабжения развивающегося региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров О.И, Домников С.В., Бабкевич Г.Г. Оптимизация суточного режима энергосистемы...// Известия РАН. Энергетика и транспорт. – 1993. – № 1. – с. 81-97.
2. Скопинцев В.А. Качество электроэнергетических систем: надежность, безопасность, экономичность, живучесть. М.: Энергоатомиздат, 2009. – 331 с.
3. US Energy Information Admin., International Energy Statistics, 1997 – 2008. <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=9&cid=AR,AM,AU,AJ,BO,BE,BR,BU,CA,CH,EZ,DA,EN,FI,FR,GM,HU,IC,EI,IS,IT,JA,KZ,KG,LG,LH,MD,NL,NO,PL,RS,SW,TI,UP,UK,US,UZ,VE,&syid=1996&eyid=2008&unit=BKWH>

С.Г. Тихомиров, проф., д-р. техн. наук;
О.В. Карманова, проф., д-р. техн. наук;
И.А. Хаустов, доц., канд. техн. наук;
А.П. Попов, ассист.;
А.М. Скачков, асп.
(ФГБОУ ВПО ВГУИТ, г. Воронеж)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МОМЕНТОВ
МОЛЕКУЛЯРНО-МАССОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЫСОКОЭЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ
ТЕРМОМЕХАНОДЕСТРУКЦИИ**

Процессы термомеханической деструкции (ТМД) полимерных материалов, протекающие при нагревании вследствие воздействий механических напряжений, являются эффективным способом переработки синтетических каучуков и резинотехнических изделий, результатом применения которого может являться устранение их структурных дефектов, улучшение показателей качества и физических свойств [1].

При воздействии напряжения сдвига на полимер происходит разрыв макромолекул с последующим образованием макрорадикалов, вступление которых в различные химические реакции приводит к образованию полимеров различной молекулярной структуры: линейной, разветвленной, сетчатой и др. Основными результатами вышеописанных преобразований в течении ТМД являются:

1. Снижение молекулярной массы, протекающее с высокой скоростью на начальной стадии деструкции, после чего происходит замедление до тех пор, пока не будет достигнута кажущаяся молекулярная масса M_{lim} .

2. Процесс уменьшения вязкости полимерной среды, интенсивность которого по мере протекания деструкции стремится к нулю до тех пор, пока подвергающийся термообработке полимер стабилизируется и значение вязкости принимает постоянное значение.

3. Изменение молекулярно-массового распределения (ММР) полимеров.

Способность эффективно прогнозировать динамику вышеописанных характеристик полимерных материалов при термомеханообработке с конечной целью проектирования и расчета системы управления этим процессом позволит в дальнейшем производить улучшение качественных показателей каучуков и резинотехнических изделий.

Решение этой задачи не возможно без математического моделирования молекулярной динамики физико-химических превращений, происходящих в полимере при тепловом и механическом воздействиях.

Для математического описания этого процесса использовался вероятностно-кинетический подход. Так, при условии, что акт деструкции происходит равновероятно в произвольной точке x полимерной цепи l вероятность взаимодействия описывается выражением $P(x < l) = x/l$, а функция распределения полимерных молекул, подвергшихся процессу деструкции, имеет вид [2]:

$$F(x) = P\{x < l\} = \int_0^x j(l) dl + \int_x^{l_{\max}} \frac{xj(l)}{l} dl, \quad (1)$$

$$\frac{dF(x)}{dx} = \int_x^{l_{\max}} \frac{j(l)}{l} dl, \quad (2)$$

где $j(l)$ – функция плотности ММР полимера.

Пусть α – массовая доля полимерных цепей, не подвергшихся термомеханическому разрушению. Тогда характер изменения во времени первых моментов функции ММР в дискретной области (M_i^k – k -й момент на i -ом временном шаге процесса деструкции, k – номер начального момента) описывается следующим выражением:

$$M_n^k = \alpha M_{n-1}^k + (1 - \alpha) \overline{M}_n^k, \quad (3)$$

где:

$$\overline{M}_n^k = \int_0^{l_{\max}} x^k dx \int_x^{l_{\max}} \frac{j(l)}{l} dl = \int_0^{l_{\max}} \frac{j(l)}{l} \int_0^l x^k dx = \frac{1}{k+1} \int_0^{l_{\max}} \frac{j(l)}{l} l^{k+1} dl = \frac{1}{k+1} M_{n-1}^k. \quad (4)$$

Тогда, при условии, что α является функцией времени, выполнив комплекс преобразований, получаем выражение, описывающее изменение k -го момента функции ММР в процессе ТМД:

$$M^k(t) = M^k(0) \exp\left\{-\int_0^t \alpha^{k+1} dt\right\}. \quad (5)$$

Связь средневязкостной молекулярной массы с функцией ММР полимера описывается следующим выражением:

$$M_n = \int_0^{l_{\max}} x^b j(x) dx \int_0^1 u^{\frac{1}{b}} du, \quad (6)$$

где β – константа Марка-Кунна-Хаувинка. Тогда:

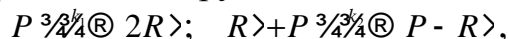
$$M_n(t) = M_n(0) \exp\left\{-\int_0^t \alpha^{\frac{1}{b}+1} dt\right\}. \quad (7)$$

В то же время, при термомеханической обработке (нагревании и воздействии сдвигового напряжения) каучука, возможно протекание следующих химических преобразований (реакций):

1. Из одной молекулы полимера (P) происходит образование двух молекул активных радикалов (R).

2. Рекомбинация молекул полимера в результате их взаимодействия с активными радикалами.

В результате использования кинетического подхода составлена схема химических реакций деструкции:



где R – активный радикал, P – неактивный полимер, k_1 – константа скорости образования активных радикалов, k_2 – константа скорости реакции рекомбинации.

Рассматриваемая схема описывается следующим уравнением:

$$\frac{dR}{dt} = k_1 \times P - k_2 \times R \times P, \quad (8)$$

где P – массовая концентрация полимера, R – массовая концентрация образующихся активных радикалов.

Так как $R(0)=0$ решение уравнения (8) имеет вид:

$$R(t) = -\frac{k_1}{k_2} (e^{-k_2 P t} - 1) = \frac{k_1}{k_2} (1 - e^{-k_2 P t}). \quad (9)$$

Изменение концентрации активных радикалов по мере протекания разрушения каучука описывается уравнением:

$$\frac{dR(t)}{dt} = (1 - a(t)) \times P. \quad (10)$$

С учетом (10) закон изменения β -го момента ММР полимера выглядит следующим образом:

$$M_n(t) = M_n(0) \times e^{-\frac{1}{P_0(b+1)k_2} k_1 (1 - e^{-k_2 P t})}. \quad (11)$$

Кинетические параметры k_1 и k_2 в уравнении (11) являются неизвестными величинами, для нахождения которых использовались экспериментальные данные изменения средневязкостной молекулярной массы процессов термомеханического разрушения бутадиенстирольного полимера, протекающего при различных температурных режимах. Оценка искомых констант производилась модернизированным методом покоординатного спуска, примененным ранее при идентификации кинетических параметров химических реакций термоокислительной деструкции полимеров в растворе [3].

Таблица 1 - Значения констант скоростей химических реакций ТМД

Температура ТМД, [°C]	k_1 , [с ⁻¹]	k_2 , [л·с ⁻¹ /моль]
100	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
120	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$

Результаты моделирования динамики средневязкостной молекулярной массы полимера, рассчитанные с использованием формулы (15) и их соответствие экспериментально полученным значениям отражены на рис. 1 и занесены в таблицу 2.

Таблица 2 - Величины погрешностей расчета

Температура ТМД, [°C]	Величина средней относительной приведенной погрешности расчета M_v , [%]
100	2,83
120	2,17
Среднее значение	2,50

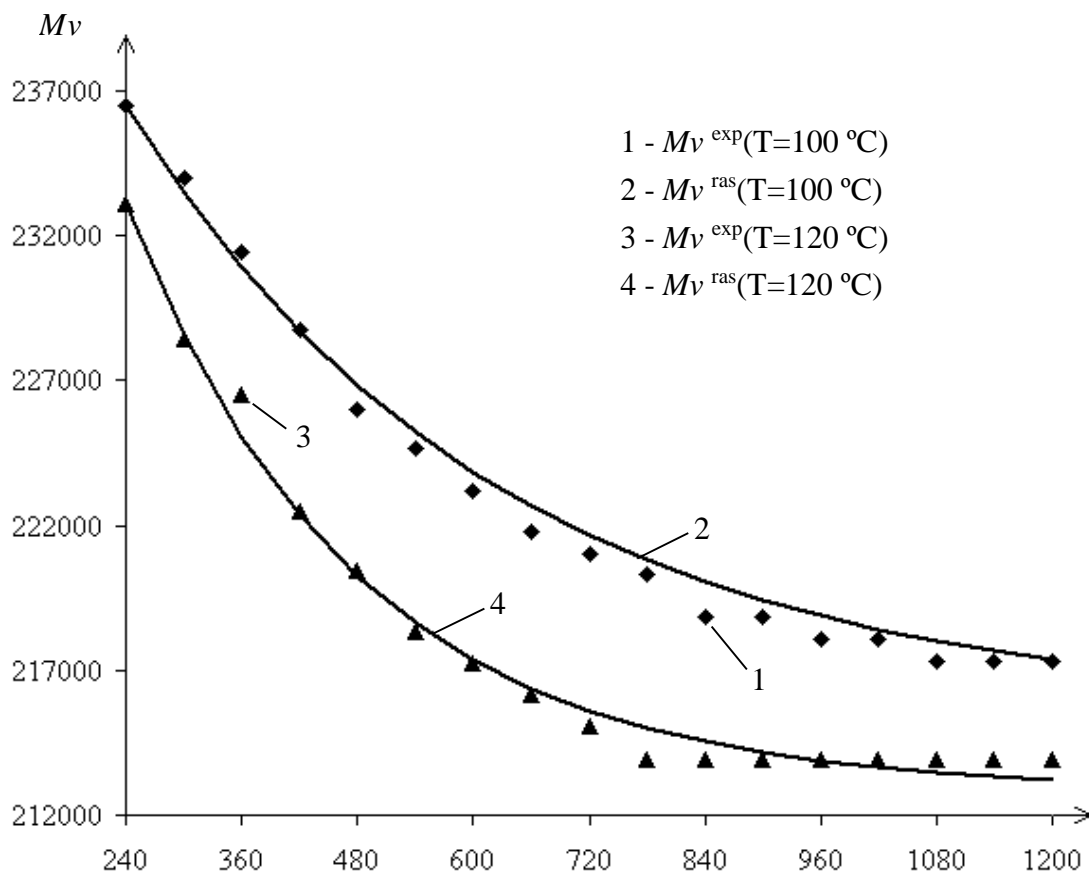


Рисунок 1 – Экспериментальные и рассчитанные с помощью зависимости (11) значения средневязкостной молекулярной массы деструктурируемого полимера t, c

Выполненные расчеты подтверждают адекватность разработанной модели, описывающих динамику изменения произвольного момента ММР полимера в процессе ТМД, что предоставляет возможность восстановления молекулярно-массового распределения полимера в текущий момент времени проведения термомеханического воздействия [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шутилин Ю.Ф. Физикохимия полимеров. – Воронеж, 2012 г. – 838 с.
2. Monitoring and Estimation of Basic Quality Parameters of Polymers During the Degradation Process in Grout / S. Tikhomirov, M. Se-

menov, I. Khaustov, A. Khvostov, A. Popov // Advances in Environmental Biology. –2014. – № 8 (10). – P. 283-289.

3. Попов А.П. Системный анализ, моделирование и управление периодическим процессом термоокислительной деструкции полимеров в растворе: Дис. ... канд. тех. наук. Воронеж: ВГУИТ, 2015. – С. 99-104.

4. Моделирование спектров механических потерь в эластомерах семейством универсальных распределений Пирсона [Текст] / В.К. Битюков, С.Г. Тихомиров, А.А. Хвостов, М.А. Зайчиков // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – №4(30).– С. 220-224.

УДК 630.377.4

В.С. Исаченков, ассист.;

В.А. Симанович, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск);

С.С. Карпович, канд. техн. наук
(БНТУ, г. Минск);

А.Ю. Сулимчик, студ.;

К.С. Обламский, студ.
(БГТУ, г. Минск)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕСНОЙ ТРЕЛЕВОЧНОЙ МАШИНЫ С ПРИЦЕПНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ, КАК ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

В Республике Беларусь в настоящее время по хлыстовой технологии трелевки заготавливается около 1,7 млн. м³ древесного сырья. Для такой технологии лесозаготовок основной проблемой является преодоление участков трелевочного и магистрального волоков со слабой несущей способностью грунтов. Поставленная задача может быть решена оснащением колесных трелевочных машин (КТМ) прицепным технологическим оборудованием (ПТО), что позволит перераспределить нагрузки и крутящие моменты на полуосях КТМ, увеличить проходимость, снизить затраты времени, тем самым увеличить производительность.

Постановка задачи. Разработать математическую модель движения КТМ с ПТО, и определить его основные параметры.

Задача была решена разработкой математической модели на основе синтеза динамических звеньев входящих в систему КТМ с ПТО при различных вариантах опорной системы и конструктивных типов технологического оборудования [1, 2].

В качестве основной модели КТМ принимался базовый трактор МТЗ-82.1. Выбор расчетно-кинематических и весовых параметров сравниваемых систем проводился на основе анализа показателей, оказывающих преимущественное влияние на динамику поведения всей транспортной системы: статистические величины крутящего момента на передних и задних полуосях; величины вертикальных ускорений в центре тяжести сравниваемых вариантов технологического оборудования; величины вертикальных ускорений водителя и сиденья [3, 4].

При составлении дифференциальных уравнений, входящих в математическую модель принимались следующие допущения: машина рассматривается как плоская симметричная система относительно продольной оси в вертикальной плоскости, проходящей через центр тяжести машины; машина движется по опорной поверхности прямолинейно, без спусков и подъемов; колебания масс системы малы; упругие характеристики шин и других упругих элементов линейные или кусочно-линейные, а силы сопротивления пропорциональны скорости деформации; высоты микронеровностей трелевочного волокна под колесами правой и левой колеи усредняются; высокочастотные колебания элементов трансмиссии как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами не рассматриваются; колебания в поперечной плоскости не связаны с продольно-вертикальными; беговая дорожка шины рассматривается в виде безинерционного обруча с радиусом, равным радиусу качения, а контакт колеса с дорогой точечным; шины имеют постоянный контакт с микропрофилем без пробуксовки и бокового проскальзывания; жесткость шин, подвески переднего моста, трансмиссии, ПТО и пачки хлыстов постоянны. Такие допущения позволили минимизировать количество обобщенных координат рассматриваемых моделей.

Рассматривались следующие типы технологического оборудования: в первом варианте выбрано канатно-чokerное технологическое оборудование; во втором варианте – гидрозажимной коник; а в третьем варианте – пачковый челюстной захват с гидроприводом, размещенный на специальной арке. В качестве опорной системы рассматривались одноосный, двухосный и трехосный модули, а также балансирная тележка.

Разработанный математический аппарат дал возможность получить в системе высокоуровневого программирования MATLAB 7.11.0 (R2010b) матрицы численных значений отклонений степеней свободы моделей, первые производные этих отклонений и соответствующие им моменты времени протекания процесса, что позволило определить все необходимые параметры оценки динамической

нагруженности КТМ, оснащенной различным по типу решению ПТО [3, 5].

Анализ проводился по результатам теоретических исследований, полученных при одинаковом объеме пачки деревьев, скорости перемещения КТМ и микропрофиле трелевочного волока. Критерием оптимизации явился выбор минимальные значения максимумов нормированных спектральных плотностей ускорений рассматриваемых обобщенных координат, а весовые и геометрические размеры ПТО были определены изменением входящих в динамическую систему параметров.

Заключение. Введение в конструкцию технологического оборудования для колесной трелевочной машины опорной оси и использование канатно-чокерного, по сравнению с другими типами, технологического оборудования позволяет минимизировать показатели энергетических затрат и динамической нагруженности в процессе трелевки при работе на грунтах с низкой несущей способностью.

Диапазон варьирования параметров одноосного канатно-чокерного ПТО составляет следующие величины: масса – 0,4...0,6 т; высота центра тяжести – 0,8...1,0 м; расстояние от заднего колеса машины до центра тяжести ПТО – 0,6...1,0 м; длина подвеса пачки хлыстов – 0,3...0,5 м; вертикальная жесткость шин опорной оси – 30...40 кН/м; вертикальную и горизонтальную приведенные жесткости сцепки – 0,9...1,05 кН/м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченков, В. С. Математическая модель колесной трелевочной машины /В. С. Исаченков, В. А. Симанович. // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2011. – Вып. XIII. – С.75–81.
2. Исаченков В. С., Симанович В. А. Обоснование параметров канатно-чокерного технологического оборудования // Труды БГТУ. 2012. № 2 (149): Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 39–42.
3. Силаев, А. А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин /А. А. Силаев. – М.: Машиностроение, 1972. – 192 с.
4. Протас П. А., Клоков Д. В. Аналитическое исследование процесса взаимодействия колесных трелевочных машин с пачкой хлыстов и волоком // Актуальные направления научных исследований XXI века: Теория и практика. –2014 – Т. 2: № 5–4. С. 256–260.
5. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов: пер. с англ. /Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1974. – 463 с.

УДК 621.311.003.13

Находов В., доц., канд. техн. наук (НТУУ “КПИ”, г. Киев)

Башкис А., проф., д-р техн. наук (ВГТУ, г. Вильнюс)

Иванько Д., асп. (ВГТУ, г. Вильнюс, НТУУ “КПИ”, г. Киев)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ СТАТЕЙ
ЭЛЕКТРОБАЛАНСОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Тенденцией функционирования промышленных комплексов экономически развитых стран является увеличение потребления энергоресурсов. Постоянный рост цен на энергоносители привел к необходимости развития и внедрения различных технологий энергосбережения. Инструментом, позволяющим решать целый ряд задач в области энергосбережения, в том числе и осуществления систематического контроля эффективности использования электроэнергии является построение и анализ электробалансов.

Очевидно, что наиболее достоверную информацию при построении электробалансов можно получить из автоматизированных систем учета. Однако на практике на большинстве предприятий отсутствует глубоко дифференцированный технический учет электропотребления. То есть, существующие системы учета позволяют получать информацию о потреблении электроэнергии только основными производственными подразделениями, а также наиболее энергоёмкими технологическими установками. Такая информация не позволяет объективно оценивать и анализировать уровень эффективности использования электрической энергии на предприятии. Поэтому, существует необходимость построения более детальных электробалансов, отражающих объем потребления электроэнергии каждым отдельно взятым технологическим агрегатом. Известными подходами к построению электробалансов является использование экспериментального, расчетно-аналитического или комбинированного метода [1]. При этом на сегодняшний день не существует единой методики решающей данную задачу.

Очевидно, что на промышленных предприятиях и их подразделениях одновременно работают сотни агрегатов. Охватить такое количество агрегатов приборами учета, даже временными, с экономической точки зрения нецелесообразно и далеко не всегда технически возможно. Поэтому практическое применение экспериментального метода построения электробалансов ограничено.

Использование эмпирических зависимостей для решения данной задачи также далеко не всегда применимо. Для многих типов агрегатов найти такие расчетные формулы не представляется возмож-

ным. Кроме того, на промышленных предприятиях, как правило, имеется немало агрегатов прошедших капитальные ремонты. Для такого оборудования даже имеющиеся эмпирические формулы не позволяют достаточно объективно определять расчетным путем объем их электропотребления. Поэтому на практике применение расчетно-аналитического метода для построения электробалансов зачастую сводится к использованию упрощенного подхода, при котором объем потребления электроэнергии любым отдельно взятым технологическим агрегатом или установкой определяется по формуле:

$$W_i = P_{\text{учт.}i} k_{3,i} T_i, \quad (1)$$

где $P_{\text{учт.}i}$ – установленная мощность i -го агрегата; $k_{3,i}$ – средний коэффициент его загрузки по мощности; T_i – продолжительность работы данного агрегата в течение соответствующего периода.

Для того, чтобы получить с помощью зависимости (1) достаточно объективный электрический баланс, необходимо иметь достоверные значения $k_{3,i}$ и T_i . Однако на большинстве предприятий учет этих показателей не ведется. В указанных условиях построение электробалансов таким методом осуществляется с использованием справочной литературы, где $k_{3,i}$ и T_i приведены в виде довольно широких интервалов. В зависимости от принятых значений указанных показателей том же объекте можно получить совершенно разные электробалансы. Таким образом, применение упрощенного расчетно-аналитического метода нельзя считать достаточно объективными.

В ряде публикаций авторов данной статьи [2,3] предложено в условиях неопределенности указанных исходных данных для построения электробалансов применять вероятностно-статистический подход. Этот подход основан на учете случайного характера, как объемов электропотребления технологических установок, так и факторов, на него влияющих, а также на использовании соответствующих вероятностно-статистических методов, которые позволяют строить значительно более достоверные электробалансы чем в случае применения расчетно-аналитического способа.

Предлагаемый авторами алгоритм построения электробалансов с использованием вероятностно-статистического подхода предполагает выполнение следующих основных действий.

1) Определение законов распределения объемов электропотребления технологических агрегатов.

Для этой цели могут быть использованы статистические данные о фактических расходах электроэнергии технологических агрегатов, которые имеются на реальных предприятиях крайне редко. Другим,

более реальным способом получения необходимых данных является применение экспертных методов и методов имитационного моделирования. Полученные таким путем данные являются псевдо реальными. Однако, как показали исследования их достаточно успешно можно применять для решения соответствующей задачи.

Опрос экспертов осуществляется с помощью специальных анкет (рисунок 1). При этом каждому эксперту предлагается на специальной шкале вертикальными и горизонтальными линиями обозначить интервалы, в которых могут находиться фактические величины коэффициентов загрузки и продолжительности работы конкретного технологического агрегата или установки, а также, используя таблицу 1, оценить, как часто действительные значения данных параметров могут находиться в пределах этих интервалов.

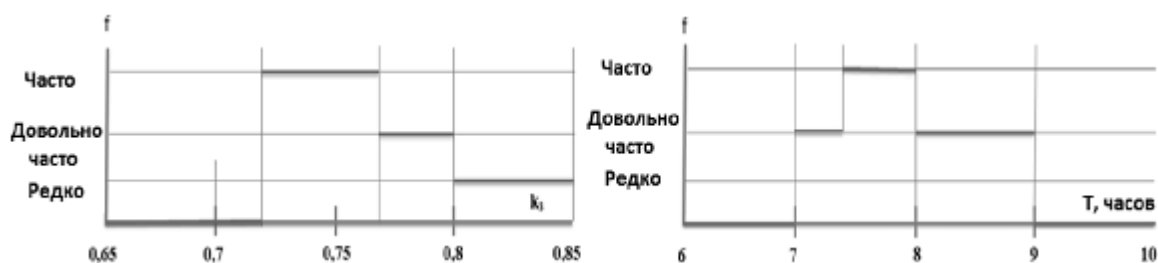


Рисунок 1 – Пример заполненной экспертной анкеты

Таблица 1 - Уровни, характеризующие частоту нахождения продолжительности работы и коэффициентов загрузки технологического оборудования в соответствующих интервалах

Частота	Характеристика уровня
Редко	Фактическая величина параметра находится в соответствующем интервале не чаще, чем в 20% случаев
Довольно часто	Фактическая величина параметра находится в соответствующем интервале в 20...50 % случаев
Часто	Фактическая величина параметра находится в соответствующем интервале чаще, чем в 50 % случаев

Далее на основании полученных экспертных гистограмм (рисунок 1) в соответствии с методом Монте-Карло необходимо сгенерировать некоторое, достаточно большое количество случайных значений продолжительности работы и коэффициентов загрузки каждого агрегата, а также различные варианты их сочетания.

Для всех сгенерированных вариантов сочетания случайных значений продолжительности работы и коэффициентов загрузки каждого агрегата по формуле (1) должны быть определены соответствующие им расчетные величины расхода электроэнергии.

Полученные псевдо реальные значения электропотребления для каждого агрегата позволяют построить для него эмпирическую гисто-

грамму распределения случайных значений расхода электрической энергии. После чего по критерию Пирсона необходимо осуществить проверку соответствия построенной эмпирической гистограммы тому или иному теоретическому закону распределения.

2) Определение параметров закона распределения каждого технологического агрегата, а также возможных минимальных и максимальных значений его электропотребления.

3) Определение наиболее вероятных численных значений статей электробалансов.

Наиболее вероятные значения объемов расхода электроэнергии каждым из технологических агрегатов при построении соответствующего электробаланса определяются путем распределения достоверно известной по данным учета величины суммарного электропотребления предприятия или его подразделения между конкретными агрегатами. При этом решается оптимизационная задача со целевой функцией (2) и ограничениями (3):

$$z = \mathop{\text{arg}}_{i=1}^n f(W_i) \text{ ® max} , \quad (2)$$

$$W_{i \min} \leq W_i \leq W_{i \max} , W_i > 0 , \mathop{\text{arg}}_{i=1}^n W_i = W_{np} , \quad (3)$$

где W_i – возможный объем электропотребления i -го агрегата; $f(W)$ – функция плотности распределения вероятностей электропотребления i -го агрегата, определённая с помощью имеющихся статистических данных или путем экспертного опроса; W_{np} – общий объем потребления электрической энергии на предприятии или в его подразделении, известный на основании данных учета.

В результате использования приведенного выше алгоритма могут быть построены более достоверные электробалансы, чем в случае применения упрощенного расчетно-аналитического метода. Такие балансы можно получать для различных периодов времени и по результатам их анализа можно устанавливать показатели, необходимые для проведения оперативного контроля эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волобринский С.Д. Электрические нагрузки и балансы промышленных предприятий. - М. -Л.: Энергия, 1976. -154 с.
2. Находов В.Ф., Бориченко О.В. Йомовірсно-статистичний підхід до побудови енергобалансів виробничо-господарських об'єктів // Промелектро. – 2007. - №6. – С.45-54.
3. В.Ф.Находов, О.В.Бориченко, Д.О.Іванько, І.В.Якобюк Виявлення «проблемних» ділянок схеми електропостачання для ве-

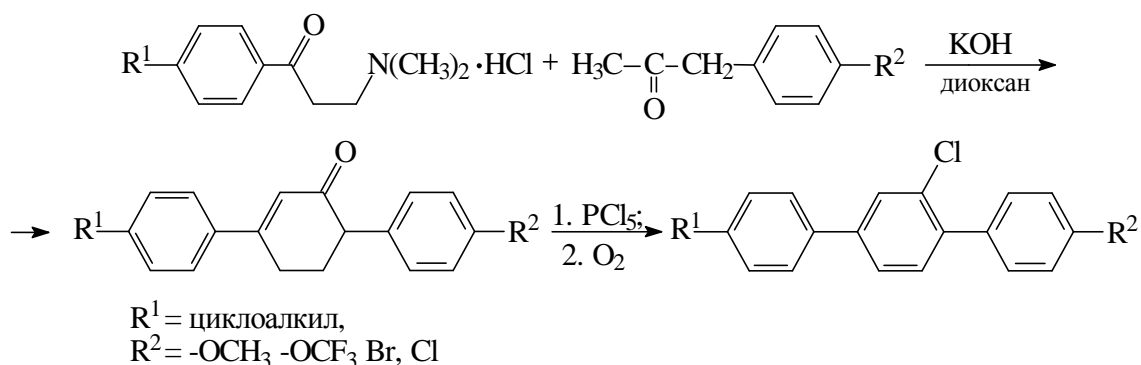
УДК 661.17

Д.А. Литвинов, магистрант; К.И. Трусов, студ.;
О.И. Александров, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

СИНТЕЗ ПРОИЗВОДНЫХ РЯДА ЦИКЛОГЕКСЕНОНА И ПАРА-ТЕРФЕНИЛА КАК КОМПОНЕНТОВ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

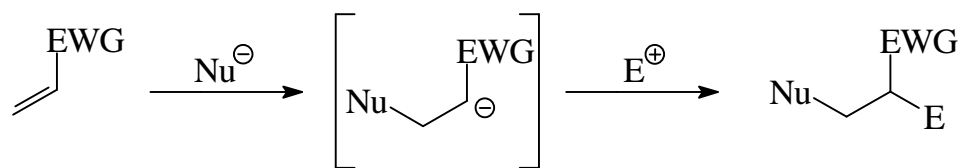
Синтез циклогексенонов и терфенилов на их основе

В качестве компонентов жидкокристаллических материалов широко применяются вещества, содержащие в своей структуре несколько циклических фрагментов, что позволяет жидкокристаллической фазе существовать в достаточно широком интервале температур [1]. К таким веществам относятся тер- и кватерфенилы, а также их аналоги. В ходе выполнения исследования разработана схема получения мезогенных веществ в два этапа.



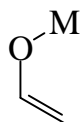
Получение алкиларилциклогексенонов

Первый этап представляет собой нуклеофильное присоединение (A_N) по кратной углерод-углеродной связи, сопряженной с электроноакцепторной группой (EWG), и называется реакцией Михаэля. Общее уравнение имеет вид, представленный ниже. Область синтетического применения реакции Михаэля охватывает широкий круг задач, связанных с созданием углерод-углеродных связей в самых различных структурах. Простота описываемого способа проведения реакции присоединения послужила причиной его применения для синтеза аддуктов, которые могут в дальнейшем легко подвергаться внутримолекулярным циклизациям, что обеспечит возможность получения разнообразных циклических соединений.



EWG = -CHO
 -COR
 -CO₂R
 -CN
 -NO₂
 -SO_nPh (n = 1, 2)

Nu = Hal, OH, OR', OC(O)R', SR', NR₂, CN, etc
 Alk-M, $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{M}$, $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{M}$, Ar-M



В качестве непредельных субстратов этих реакций используются алкены, содержащие различные электроноакцепторные группы. Эти субстраты имеют общее название – акцепторы Михаэля. Наличие электроноакцепторных групп обуславливает электрофильный характер двойной связи и создает предпосылки к эффективной стабилизации отрицательного заряда в карбанионном интермедиате, образующимся на стадии присоединения нуклеофильной частицы. Природа нуклеофильного реагента, используемого в этой реакции, может варьироваться в очень широких пределах. Реализация A_N реакции включает активацию акцептора Михаэля (например, сопряженного енона) под действием основного катализатора [2].

На этой основе разработана методика эффективного получения 1,5-дикарбонильных производных из легкодоступных исходных веществ. В качестве акцептора Михаэля использовано циклическое α,β-непредельное карбонильное соединение – фенилвинилкетон **59**. Данный енон получен *in situ* из четвертичной аммониевой соли 3-диметиламино-1-R-фенилпропан-1-она (соли Манниха) **60**, в результате обработки ее сильным основанием. Что касается нуклеофильных компонентов, то сочетание проводится с использованием замещенного фенилацетона **61**.

Образующейся в результате реакции Михаэля 1,5-дикетон **62** способен претерпевать внутримолекулярную альдольную конденсацию с образованием циклогексенона **63**.

Строение синтезированных веществ подтверждено данными ¹H ЯМР-спектроскопии. В спектре соединения **63d** присутствуют сигналы протонов двух ароматических колец в виде двух пар дублетов для *para*-дизамещенных фрагментов. При 6.58 м.д. наблюдается синглетный сигнал протона β-положения к карбонильной группе. При 3.63 м.д., 2.92 – 2.84 м.д. и 2.46 – 2.28 м.д. проявляются сигналы протонов

циклогекс-2-енонового фрагмента в виде группы мультиплетов. В области 2.51 м.д., 1.94 – 1.82 м.д. и 1.52 – 0.91 м.д. проявляются сигналы протонов 4-бутилциклогексильного фрагмента в виде группы мультиплетов (рисунок 1).

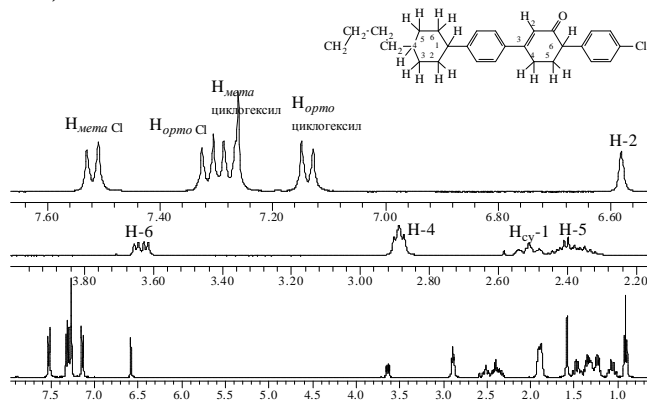
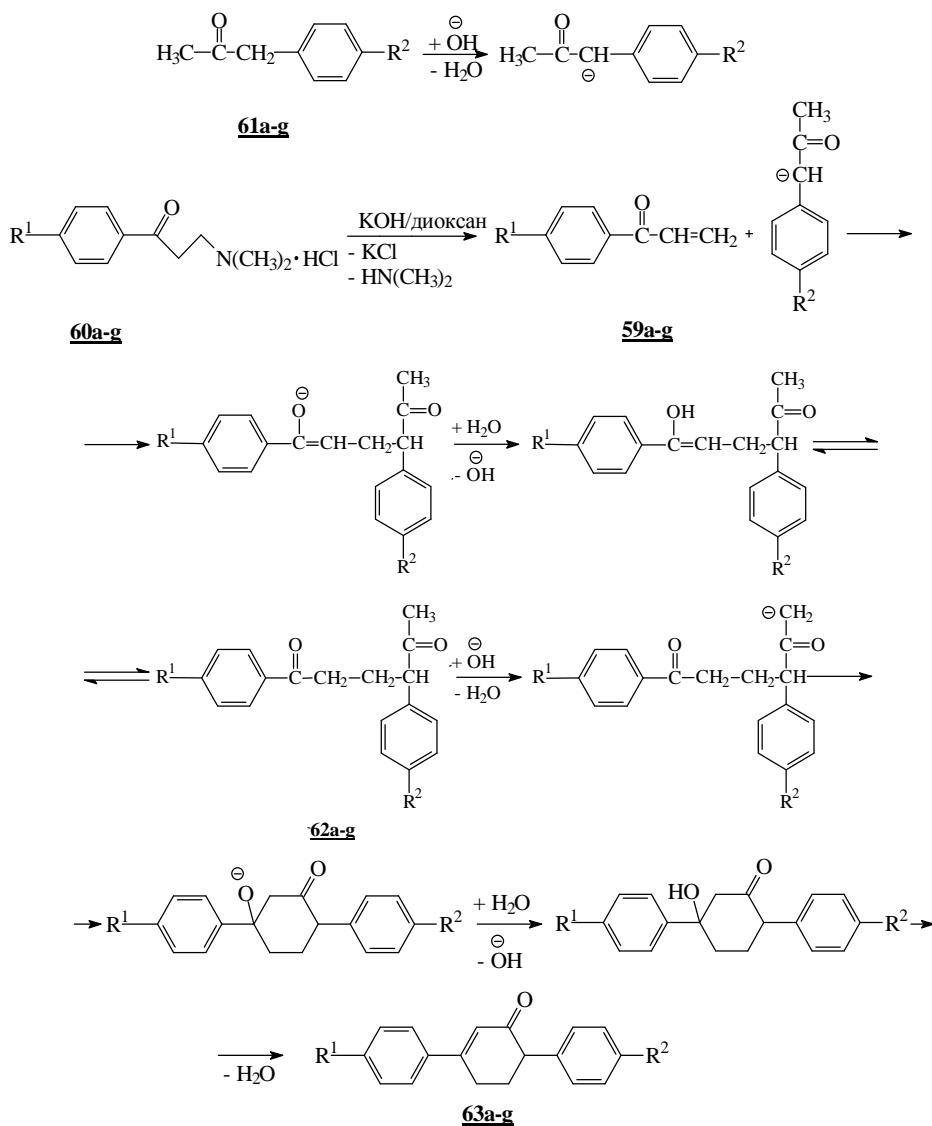
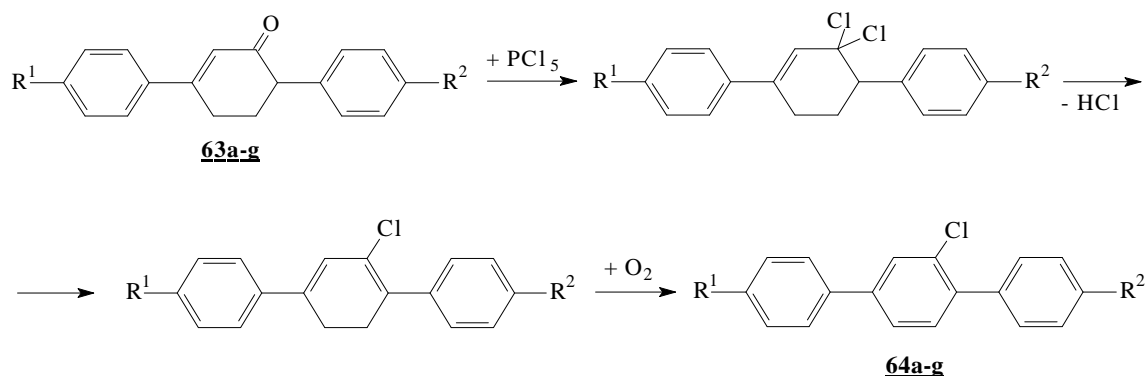


Рисунок 1 – ^1H ЯМР спектр циклогексенона **63d**



Получение замещенных *para*-терфенилов

На втором этапе действием хлорида фосфора (V) и кислорода воздуха на циклогексеноны **63a-g** синтезировали целевые продукты **64a-g**, содержащие циклоалкильный и замещенный терфенильный фрагменты.



Строение синтезированных веществ подтверждено данными ¹H ЯМР-спектроскопии. В спектре соединения **64e** присутствуют сигналы протонов всех трех ароматических колец в виде двух пар дублетов для *para*-дизамещенных фрагментов и двух дублетов и дублет-дублета для тризамещенного ароматического кольца. При 3.87 м.д. наблюдается синглетный сигнал протонов метокси группы. В области 2.52 м.д., 1.91 м.д. и 1.61 – 0.91 м.д. проявляются сигналы протонов 4-пропилциклогексильного фрагмента в виде группы мультиплетов (рисунок 2).

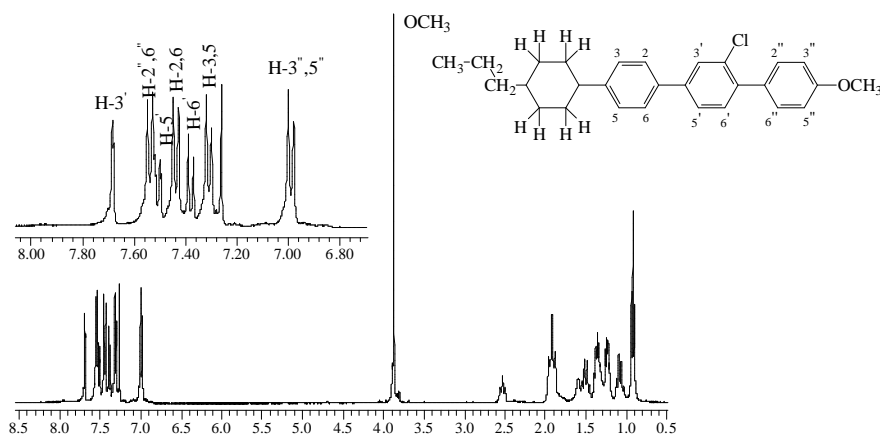


Рисунок 2 – ¹H ЯМР спектр *para*-терфенила **64e**

Исходя из структуры терфенилов, можно говорить об их высокой гидролитической, фотохимической устойчивости и устойчивости к окислению, что не накладывает дополнительных ограничений на применение ЖКМ.

Ни одно из индивидуальных жидкокристаллических соединений не обладает набором свойств, требуемых для практического использования. Поэтому применяются многокомпонентные композиции, состоящие из индивидуальных соединений, максимально отвечающих этим требованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Томилин, М.Г. Свойства жидкокристаллических материалов / М.Г. Томилин, С.М. Пестов – СПб.: Политехника, 2005 – 296 с.
2. Смит, В.А. Основы современного органического синтеза / В.А. Смит, А.Д. Дильман, – М.: Бинном, 2009.

УДК 62.83

В.П. Кобринец, доц., канд. техн. наук;
В.В. Лихавицкий, ассист.
(БГТУ, г. Минск)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОЛОННЫ К-102

Среди нормируемых показателей качества нефтепродуктов, относящихся к выходным координатам колонны, основными являются следующие: температуры 98% отбора фракции 140–180° ($T_{98}^{(1)}$), температуры 98% отбора фракции 180–230° ($T_{98}^{(2)}$) и температуры 50% отбора фракции 230–360° ($T_{98}^{(3)}$). Текущие значения этих параметров измеряются специальными анализаторами, входящими в состав измерительного комплекса колонны. Требования, предъявляемые к этим температурам имеют вид:

$$T_{98 \min}^{(1)} \leq T_{98}^{(1)} \leq T_{98 \max}^{(1)}; T_{98 \min}^{(2)} \leq T_{98}^{(2)} \leq T_{98 \max}^{(2)}; T_{50 \min}^{(3)} \leq T_{50}^{(3)} \leq T_{50 \max}^{(3)}. \quad (1)$$

Применительно к данным выходным координатам математическая модель колонны примет следующий вид:

$$T_{98}^{(1)} = m_{11} (t_{B1} - \bar{t}_{B1}) + m_{12} \ln P_K + m_{13} \frac{\alpha l_{W1} W_1}{\epsilon d_F F} - \frac{\bar{W}_1 \ddot{\alpha}}{F \ddot{\alpha}} + m_{14} \frac{\alpha l_{W1} W_1}{\epsilon d_F F} - \frac{\bar{W}_1 \ddot{\alpha}^2}{F \ddot{\alpha}} +$$

$$+ m_{15} \frac{\alpha Q_1}{\epsilon Q_F} - \frac{\bar{Q}_1 \ddot{\alpha}}{Q_F \ddot{\alpha}} + m_{16} \quad (2)$$

$$T_{98}^{(2)} = m_{21}(t_{B2} - \bar{t}_{B2}) + m_{22} \ln P_K + m_{23} \frac{\alpha W_2}{\epsilon} \frac{W_2}{d_F F} - \frac{\bar{W}_2}{F} \frac{\ddot{\alpha}}{\emptyset} + m_{24} \frac{\alpha W_2}{\epsilon} \frac{W_2}{d_F F} - \frac{\bar{W}_2}{F} \frac{\ddot{\alpha}}{\emptyset} +$$

$$+ m_{25} \frac{\alpha W_1}{\epsilon} \frac{W_1}{d_F F} - \frac{\bar{W}_1}{F} \frac{\ddot{\alpha}}{\emptyset} + m_{26} \frac{\alpha Q_2}{\epsilon} \frac{Q_2}{Q_F} - \frac{\bar{Q}_2}{Q_F} \frac{\ddot{\alpha}}{\emptyset} + m_{27} \frac{\alpha Q_1}{\epsilon} \frac{Q_1}{Q_F} - \frac{\bar{Q}_1}{Q_F} \frac{\ddot{\alpha}}{\emptyset} + m_{28}$$

$$T_{50}^{(3)} = m_{31}(t_{B3} - \bar{t}_{B3}) + m_{32} \ln P_K + m_{33} \frac{\alpha W_3}{\epsilon} \frac{W_3}{d_F F} - \frac{\bar{W}_3}{F} \frac{\ddot{\alpha}}{\emptyset} + m_{34} \frac{\alpha W_3}{\epsilon} \frac{W_3}{d_F F} - \frac{\bar{W}_3}{F} \frac{\ddot{\alpha}}{\emptyset} +$$

$$+ m_{35} \frac{\alpha W_2}{\epsilon} \frac{W_2}{d_F F} - \frac{\bar{W}_2}{F} \frac{\ddot{\alpha}}{\emptyset} + m_{36} \frac{\alpha W_1}{\epsilon} \frac{W_1}{d_F F} - \frac{\bar{W}_1}{F} \frac{\ddot{\alpha}}{\emptyset} + m_{37} \frac{\alpha Q_3}{\epsilon} \frac{Q_3}{Q_F} - \frac{\bar{Q}_3}{Q_F} \frac{\ddot{\alpha}}{\emptyset} +$$

$$+ m_{38} \frac{\alpha Q_2}{\epsilon} \frac{Q_2}{Q_F} - \frac{\bar{Q}_2}{Q_F} \frac{\ddot{\alpha}}{\emptyset} + m_{39} \frac{\alpha Q_1}{\epsilon} \frac{Q_1}{Q_F} - \frac{\bar{Q}_1}{Q_F} \frac{\ddot{\alpha}}{\emptyset} + m_{310}$$

где: $T_{98}^{(1)}$, $T_{98}^{(2)}$, $T_{50}^{(3)}$ – оценки истинных температур. $T_{98}^{(1)}$, $T_{98}^{(2)}$, $T_{50}^{(3)}$; величины m_{ij} ; $i = 1, 2, 3$, $j = \overline{1, n_i}$ ($n_1 = 6, n_2 = 8, n_3 = 10$) – настраиваемые коэффициенты; P_K – давление в колонне, t_{B1}, t_{B2}, t_{B3} – температуры на перетоке в отпарные секции К-103/1, К-103/2, К-103/3, соответственно, F – нагрузка колонны по сырью; W_1, W_2, W_3 – отборы фракций 140-180, 180-230, 230-360°C, соответственно, $d_F, d_{W1}, d_{W2}, d_{W3}$ – удельные плотности поступающей нефти, фракций 140-180°C, 180-230°C, 230-360°C, соответственно; Q_F – количество тепла, поступающее в единицу времени с нефтью; Q_1, Q_2, Q_3 – количество тепла, отводимое в единицу времени с помощью верхнего, 1-го и 2-го циркуляционных орошений, соответственно.

$$Q_F = h(t_F, d_F) d_F F, \quad (5)$$

$$Q_i = \dot{\epsilon} h(t_{i1}, d_{si}) - h(t_{i2}, d_s) \dot{\epsilon} d_{si} S_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (6)$$

где t_{i1}, t_{i2} – температуры жидкости i -го циркуляционного орошения, измеряемые соответственно при выходе из колонны и при входе в колонну после теплообменника, d_{si} – удельная плотность жидкости, S_i – расход циркуляционного орошения; $h(t, d)$ – удельное теплосодержание углеводородов, находящихся в жидкой фазе с плотностью d при температуре t , и которое рассчитывается по формуле:

$$h(t, d) = (0.403 + 0.405 \times 10^{-3} t^2) \times d^{-0.5}. \quad (7)$$

Величины, помеченные чертой сверху, в уравнениях (2), (3), (4) имеют среднестатистические значения, определяемые по экспериментальным данным, как средние значения соответствующих параметров.

Введем следующие обозначения:

$$\dot{y}_1 = \dot{T}_{98}^{(1)}, \dot{y}_2 = \dot{T}_{98}^{(2)}, \dot{y}_3 = \dot{T}_{50}^{(3)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= t_{B1} - \bar{t}_{B1}; & X_2 &= \ln P_K; & X_3 &= \frac{d_{W1}W_1}{d_F F} - \frac{\bar{W}_1}{\bar{F}}; & X_4 &= \frac{Q_1}{Q_F} - \frac{\bar{Q}_1}{\bar{Q}_F}; \\ X_5 &= t_{B2} - \bar{t}_{B2}; & X_6 &= \frac{d_{W2}W_2}{d_F F} - \frac{\bar{W}_2}{\bar{F}}; & X_7 &= \frac{Q_2}{Q_F} - \frac{\bar{Q}_2}{\bar{Q}_F}; & X_8 &= t_{B3} - \bar{t}_{B3}; \\ X_9 &= \frac{d_{W3}W_3}{d_F F} - \frac{\bar{W}_3}{\bar{F}}; & X_{10} &= \frac{Q_3}{Q_F} - \frac{\bar{Q}_3}{\bar{Q}_F}. \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом обозначений (8) и (9) уравнения математической модели (2), (3), (4) примут вид:

$$\dot{T}_{98}^{(1)} = m_{11}X_1 + m_{12}X_2 + m_{13}X_3 + m_{14}X_3^2 + m_{15}X_4 + m_{16} \quad (10)$$

$$\dot{T}_{98}^{(2)} = m_{21}X_5 + m_{22}X_2 + m_{23}X_6 + m_{24}X_6^2 + m_{25}X_3 + m_{26}X_7 + m_{27}X_4 + m_{28} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_{50}^{(3)} &= m_{31}X_8 + m_{32}X_2 + m_{33}X_9 + m_{34}X_9^2 + m_{35}X_6 + m_{36}X_3 + \\ &+ m_{37}X_{10} + m_{38}X_7 + m_{39}X_4 + m_{310} \end{aligned} \quad (12)$$

в соответствии с принятой ранее классификацией координат, характеризующих протекание процесса ректификации нефти, на выходные, управляющие и возмущающие, введем следующие определения. Принимаем в качестве вектора выходов вектор

$$y = (y_1, y_2, y_3) = (T_{98}^{(1)}, T_{98}^{(2)}, T_{50}^{(3)}), \quad (13)$$

вектора управления – вектор

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_6) = (W_1, W_2, W_3, S_1, S_2, S_3), \quad (14)$$

вектора возмущений – вектор

$$w = (w_1, w_2) = (F, t_K), \quad (15)$$

вектора режимных параметров – вектор

$$r = (r_1, r_2, \dots, r_9) = (t_{B1}, t_{B2}, t_{B3}, t_{11}, t_{21}, t_{31}, t_{12}, t_{22}, t_{32}) \quad (16)$$

С учетом принятых обозначений (8), (9) вектор X входных координат объекта, включающий в себя вектор управления u , возмущений w и режимных параметров r можно представить в следующем виде:

$$X(u, w, r) = (X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_{10}) \quad (17)$$

С учетом принятых обозначений модель процесса ректификации, представленную уравнениями (2)–(7), а также уравнениями (10)–(12) можно записать в виде:

$$\dot{Y}_i = m_i^T j_i(X), \quad i = 1, 2, 3, \quad (18)$$

где j_i - вектор-функции, которые будем считать известными; $m_i = (m_{i1}, \dots, m_{in_i})$ - вектор подстраиваемых коэффициентов.

Для определения векторов m_i ($i = 1, 2, 3$) в модели (18) необходимы измеренные значения векторов y (13), u (14), w (15), r (16) в установившемся режиме работы колонны.

Для этой цели были использованы данные измерений величин технологических параметров, являющихся компонентами векторов y , u , w , r за 1 сутки непрерывного измерения с дискретностью 6 секунд. Из этого массива необходимо выбрать данные, соответствующие установившемуся режиму работы колонны. Эту задачу можно решить, выбрав необходимые интервалы времени между измерениями с учетом динамических свойств основных каналов управления колонной.

Предварительно при обработке экспериментальных данных были определены динамические свойства данных каналов. При этом установлено, что величины постоянных времени T и времени запаздывания t примерно одинаковы для каждого канала. Для них были получены следующие оценки: $10' \leq T \leq 20'$ и $25' \leq t \leq 35'$.

Поэтому из указанного массива были выбраны данные, измеренные с дискретностью 30 минут. Кроме того, между измерениями векторов u , w , r и вектора y принят временной интервал, равный 30 минут. Всего было выбрано данных 48 измерений векторов y , u , w , r . С использованием данных по формуле (7) рассчитано удельное теплосодержание нефти (h_F), циркуляционных орошений на выходе и на входе в колонну (h_{ij}), по формулам (5) и (6) – количество тепла, поступающего в единицу времени в колонну (Q_F) и количество тепла, отводимого с помощью верхнего (Q_1), 1-го (Q_2) и 2-го (Q_3) циркуляционных орошений.

На основании исходных данных по соотношениям (9) были рассчитаны для всех точек измерений значения компонента вектора входных координат X ($X_1 - X_{10}$). По данным с использованием метода наименьших квадратов определены для уравнений математической модели (10), (11), (12) значения подстроечных коэффициентов m_{ij} . Таким образом, математическая модель статики процесса ректификации имеет вид:

$$y_1 = -0.051652X_1 + 45.876X_2 - 10644X_3 - 1051100X_3^2 - 8.6466X_4 + 170.1 \quad (19)$$

$$y_2 = -0.49071X_5 + 7.8907X_2 + 4884.8X_6 + 327040X_6^2 + 432.59X_3 - 55.74X_7 + 374.76X_4 + 255.43 \quad (20)$$

$$y_3 = -0.070238X_8 + 24.395X_2 + 377.25X_9 + 84989X_9^2 - 528.9X_6 + 392.18X_3 - 17.534X_{10} - 21.685X_7 + 415.13X_4 + 304.16 \quad (21)$$

Оценка на адекватность уравнений (19), (20), (21) дала положительный результат. Это означает, что полученная математическая модель может быть использована как для расчета статических режимов работы колонны, так и для прогнозирования значения ее выходных координат по измеренным значениям входных координат.

УДК: 004.632.5:004.415.2

Д.П. Кункевич, доц., канд. техн. наук;
Ю.В. Полозков, доц., канд. техн. наук
(БНТУ, г. Минск);

О.И. Александров, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ВРАЩЕНИЯ

Автоматизация технологической подготовки производства является наиболее важной задачей в повышении эффективности промышленного производства. При этом особую актуальность имеет проблема описания конструкторско-технологических элементов (КТЭ), совокупностью которых может быть представлена поверхность технического объекта при разработке технологии его изготовления [1°–°3]. В процессе описания КТЭ наиболее объективным и стабильным фактором выступает геометрическая форма поверхности. В связи с этим в докладе на примере деталей типа «тела вращения» рассмотрены вопросы декомпозиции глобальной поверхности деталей на составляющие отсеки поверхности и синтеза геометрической структуры КТЭ, заданных множеством отсеков поверхности. В таком аспекте показан подход к систематизации КТЭ, направленной на автоматизацию процедур построения баз данных и создания шаблонов описания геометрической структуры КТЭ.

Поверхность деталей может быть представлена множеством КТЭ, геометрическая конфигурация которых на уровне отсеков может быть описана в виде [3, 4]:

$$M = \langle S, O_S, Q_P \rangle, \quad (1)$$

где S – множество отсеков поверхности, O_S – множество взаимных отношений между отсеками, Q_P – множество свойств КТЭ.

В соответствии с (1) общий алгоритм описания КТЭ с помощью отсеков поверхности предусматривает составление таблиц основных терминов с их цифровым кодированием, декомпозицию глобальной поверхности детали на множество отсеков, описание отсеков на основе этих терминов и анализ взаимных структурно-геометрических отношений между отсеками [3]. В результате декомпозиции поверхности, при выполнении которой элементарными (базовыми) конструктами являются отсеки поверхности, формируется информация, позволяющая описать структурно-геометрическую конфигурацию, как дискретных фрагментов технического объекта, так и его поверхности в целом (рис. 1). Это позволяет варьировать глубиной дискретного представления для обеспечения корректного толкования понятия «конструктивно-технологический элемент» в различных практических ситуациях. На практике КТЭ трактуются весьма неоднозначно в зависимости от производственных условий, целей проектирования, опыта специалистов и др. Так, в ряде случаев, фрагмент поверхности неизменной пространственной формы может выступать в качестве КТЭ детали (рис. 1, *а*), собственно самой (целостной) деталью (рис. 1, *б*), а также представляться множеством отдельных КТЭ (рис. 1, *в*), например торец, фаска и др. При этом технологии изготовления этого фрагмента в зависимости от различных вариантов интерпретации КТЭ могут принципиально отличаться.

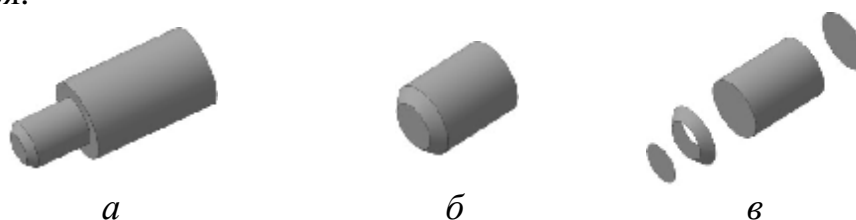



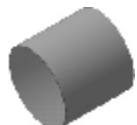



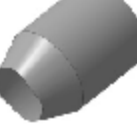


Рисунок 1 – Пример вариантов представления КТЭ

Для управления глубиной дискретного представления КТЭ были разработаны принципы систематизации КТЭ различного уровня дискретизации, а также алгоритмы синтеза КТЭ на основе заданного множества отсеков поверхности и уровня дискретного представления [4]. В представленном варианте систематизации КТЭ предложено принять в качестве основного инварианта описания КТЭ количество ограничивающих отсеков. По данному признаку КТЭ можно распределить на n -уровней. Также было введено понятие замкнутости КТЭ, что позволило отнести к элементам 1-го уровня плоский, конический и любые другие отсеки поверхности и обеспечило универсальность построения иерархии КТЭ. Элементы 2-го и последующих уровней представляют собой комбинации элементов 1-го уровня. Ввиду того, что элементы 1, 2 и 3-го уровней позволяют

структурно описывать базовые геометрические тела, которые на практике могут представлять собой относительно простые цельные детали и отверстия, данные элементы могут быть приняты в качестве основных для синтеза структур, описывающих более сложные КТЭ. На каждом уровне могут быть созданы классы КТЭ, инвариантной частью которых в основном является взаимное расположение отсеков поверхностей. В состав создаваемых классов входят группы, которые подразделяют КТЭ по признаку замкнутости. Группы могут подразделяться на подгруппы в зависимости от особенностей геометрической конфигурации поверхности. По признакам групп и подгрупп окончательно формируется представление о геометрической форме поверхности КТЭ.

На основе этой систематизации реализуется построение таблиц-шаблонов составных КТЭ путем добавления информации о КТЭ различных уровней. Это наглядно демонстрируется в таблице 1 на примере синтеза КТЭ 4-го уровня, ограниченного плоским, коническим, цилиндрическим и сферическим отсеками, которым присвоены определенные индексы.

Таблица 1 - Построение матриц-шаблонов составных КТЭ

	Основной КТЭ 2-го уровня	Добавление КТЭ 1-го уровня	Добавление КТЭ 1-го уровня	Результат КТЭ 4-го уровня																																																																											
Вариант I																																																																															
	<table border="1"> <tr><td></td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		1	4	1	0	3	4	0	0	<table border="1"> <tr><td></td><td>1</td><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		1	4	3	1	0	3	0	4	0	0	3	3	0	0	0	<table border="1"> <tr><td></td><td>1</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		1	4	3	2	1	0	3	0	0	4	0	0	3	0	3	0	0	0	3	2	0	0	0	0	<table border="1"> <tr><td></td><td>1</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		1	4	3	2	1	0	3	0	0	4	0	0	3	0	3	0	0	0	3	2	0	0	0	0
		1	4																																																																												
1	0	3																																																																													
4	0	0																																																																													
	1	4	3																																																																												
1	0	3	0																																																																												
4	0	0	3																																																																												
3	0	0	0																																																																												
	1	4	3	2																																																																											
1	0	3	0	0																																																																											
4	0	0	3	0																																																																											
3	0	0	0	3																																																																											
2	0	0	0	0																																																																											
	1	4	3	2																																																																											
1	0	3	0	0																																																																											
4	0	0	3	0																																																																											
3	0	0	0	3																																																																											
2	0	0	0	0																																																																											
Вариант II	Основной КТЭ 2-го уровня	Добавление КТЭ 2-го уровня	Добавление КТЭ 2-го уровня	Результат КТЭ 4-го уровня																																																																											
																																																																															
	<table border="1"> <tr><td></td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		1	4	1	0	3	4	0	0	<table border="1"> <tr><td></td><td>1</td><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		1	4	3	1	0	3	0	4	0	0	3	3	0	0	0	<table border="1"> <tr><td></td><td>1</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		1	4	3	2	1	0	3	0	0	4	0	0	3	0	3	0	0	0	3	2	0	0	0	0	<table border="1"> <tr><td></td><td>1</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		1	4	3	2	1	0	3	0	0	4	0	0	3	0	3	0	0	0	3	2	0	0	0	0
	1	4																																																																													
1	0	3																																																																													
4	0	0																																																																													
	1	4	3																																																																												
1	0	3	0																																																																												
4	0	0	3																																																																												
3	0	0	0																																																																												
	1	4	3	2																																																																											
1	0	3	0	0																																																																											
4	0	0	3	0																																																																											
3	0	0	0	3																																																																											
2	0	0	0	0																																																																											
	1	4	3	2																																																																											
1	0	3	0	0																																																																											
4	0	0	3	0																																																																											
3	0	0	0	3																																																																											
2	0	0	0	0																																																																											

В варианте I таблицы 1 к взятому за основу КТЭ 2-го уровня добавляется один новый цилиндрический отсек поверхности. Это

выполняется путем увеличения размера таблицы-шаблона на один столбец и одну строку, соответствующих новому сопряженному отсеку, и записи в ячейку, расположенную на пересечении последней строки и предпоследнего столбца, кода взаимного расположения предпоследнего и последнего отсеков. По аналогии можно добавлять данные о новом отсеке в начало таблицы. В результате получается таблица-шаблон, описывающая КТЭ 3-го уровня. Окончательное решение для КТЭ 4-го уровня формируется путем повторения описанной процедуры для записи данных о сферическом отсеке поверхности. Таким образом, последовательное добавление новых отсеков к рассматриваемой таблице-шаблону позволяет описывать КТЭ различных уровней. Помимо последовательного добавления КТЭ 1-го уровня при создании таблиц-шаблонов новых КТЭ может применяться синтез КТЭ, описанных таблицами-шаблонами других уровней (таблица 1, вариант П). Окончательное описание структурно-геометрической конфигурации требуемого КТЭ формируется посредством задания или анализа размерных характеристик составляющих отсеков его поверхности. Предложенный вариант систематизации КТЭ, основанный на анализе объективных данных о структурно-геометрическом строении дискретных отсеков поверхности создает возможности варьирования геометрической структурой КТЭ для поиска наиболее оптимального решения по их дискретному описанию и может эффективно использоваться для разработки алгоритмов автоматизации создания шаблонов КТЭ заданного уровня или диапазона уровней структурно-геометрического описания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологической подготовки производства в машиностроении^о/ В.°Д. Цветков [и др.]°; под общ. ред. О.°И. Семенкова. – Мн., Вышэйшая школа, 1977. – Т. 2. – 336 с.
2. Цветков, В. Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирование технологических процессов / В.Д. Цветков. Мн.: Наука и техника, 1979. – 264 с.
3. Полозков, Ю.В. Алгоритмизация описания геометрической формы конструкторско-технологических элементов деталей с помощью отсеков поверхности/ Ю.В. Полозков, А. В. Евтушенко // Вестник Брестского гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2013. – №4 (82). – С. 33–36.
4. Полозков, Ю. В. Системное представление структурно-геометрической конфигурации конструкторско-технологических элементов деталей типа «тела вращения» / Ю. В. Полозков, Д.П. Кункевич, А.В. Бородуля // Весці НАН Беларусі, Сер. физ.-тэхн. навук. – 2015. – №2. – С. 90–97.

Давидович Л.М., доц., канд. техн. наук;
Кузьмицкий И.Ф., доц., канд. техн. наук;
Савчук В.П., доц., канд. физ.-мат. наук
(БГТУ, БГУ Минск)

ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КАЛАНДРИРОВАНИЯ

В настоящее время отсутствует математическая модель формирования толщины листа, что существенно сдерживает конструирование АСР процессом каландрования.

Из анализа реологических моделей, наиболее простой и в тоже время достаточно полно отражающей основные свойства полимерного материала при формировании размеров листа, является модель Максвелла.

С целью линеаризации полученной нелинейной системы дифференциальных уравнений можно применить хорошо зарекомендовавший себя метод малого параметра.

Учитывая сложный характер протекания процесса, следует использовать метод декомпозиции. т. е. разбить процесс на участки с качественно различным характером поведения материала и четко выраженными граничными условиями. Такими участками могут быть зона принудительной деформации материала в межвалковом зазоре и свободная зона, соответствующая отрыву материала от валкового каландра, на котором происходит реализация напряжений.

При составлении модели необходимо получить уравнения, как в статическом, так и в динамическом режимах с учетом выделенных зон процесса.

Будем предполагать следующее:

1) длина валков велика по сравнению с толщиной материала в зазоре, что позволяет рассматривать плоское движение материала, т.е. считать, что компоненты скорости и давления определяются соотношениями

$$U = v(x, y);$$

$$P = P(x, y),$$

где U – скорость материала (среды); v – скорость валков;

2) валки имеют одинаковые радиусы и вращаются в противоположных направлениях с одинаковыми угловыми скоростями. Это допущение не имеет принципиального значения и вводится лишь для упрощения теоретических выкладок;

3) диаметр валков $2r$ значительно меньше расстояния между ними $2h_0$,

$$\frac{h_0}{r} = \varepsilon \ll 1;$$

4) температура материала за время прохождения зазора между валками практически не изменяется, т.е. процесс изотермический;

5) перерабатываемый материал несжимаем, т.е. $\rho = \text{const}$.

Движение среды рассматривается в плоскости X_1OX_2 , т.е. в плоскости перпендикулярной осям валков (рисунок 1).

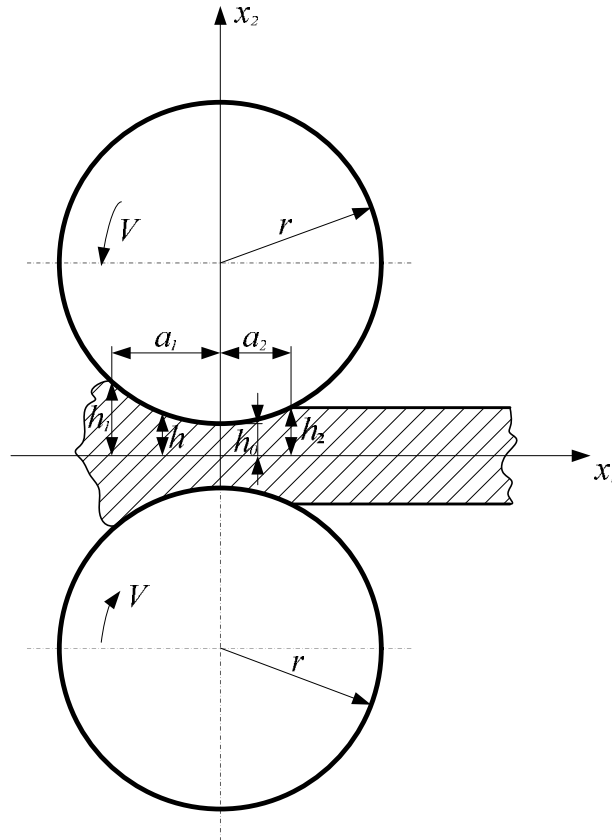


Рисунок 1

Тогда

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{DV_k}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial X_k} + \frac{\partial P_{k1}}{\partial X_1} + \frac{\partial P_{k2}}{\partial X_2} \\ \rho &= \frac{DU_k}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial X_k} + \frac{\partial P_{k1}}{\partial X_1} + \frac{\partial P_{k2}}{\partial X_2} \end{aligned} \quad (1)$$

где $k = 1, 2$

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial t} + U_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{D}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial t} + V_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial}{\partial x_2} \end{aligned}$$

ρ , P – плотность и давление среды; V_1 , V_2 – составляющие скорости вдоль осей OX_1 , OX_2 соответственно; P_{ki} – компоненты девиатора напряжений.

К уравнению (1) необходимо присоединить уравнение неразрывности, которое для плоского течения несжимаемой жидкости запишется

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2}{\partial x_2}, \quad (2)$$

$$P_{ki} + t_0 \frac{DP_{ki}}{Dt} = \mu \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right), \quad (3)$$

где $k, i = 1, 2$; t_0 – постоянная, называемая временем релаксации напряжений в среде; μ – коэффициент вязкости среды.

Уравнения (1) – (3) представляют собой замкнутую систему для нахождения P, U_k, P_{ki} . Для решения этой системы необходимо сформулировать граничные и начальные условия. Картина течения среды будет, очевидно, симметричной относительно Ox_1 , поэтому на этой оси будем иметь следующие условия:

$$x_2 = 0: P_{12} = P_{21} = 0, U_2 = 0 \quad (4)$$

В силу симметрии течения достаточно рассмотреть движение среды в области

$$a_1 \leq x_1 \leq a_2, \quad 0 \leq x_2 \leq f + f_1,$$

где $x_2 = f(x_1) + f_1(t)$ – уравнение поверхности валка, соприкасающейся со средой; $f_1(t)$ – расстояние на которое переместилась ось валка вдоль оси Ox_2 за время t (предполагается, что $f_1(0) = 0$).

На поверхности валка принимаем условие прилипания, следовательно, на поверхности вращения валков скорость течения расплава полимера равна скорости вращения валка:

$$x_2 = f + f_1: U_\tau = V_1 + \frac{df_1}{dt} \sin \varphi, \quad U_n = \frac{df_1}{dt} \cos \varphi, \quad (5)$$

где U_t, U_n – касательная и нормальная составляющие скорости среды; $V_1(t)$ – скорость любой точки поверхности валка (рисунок 2).

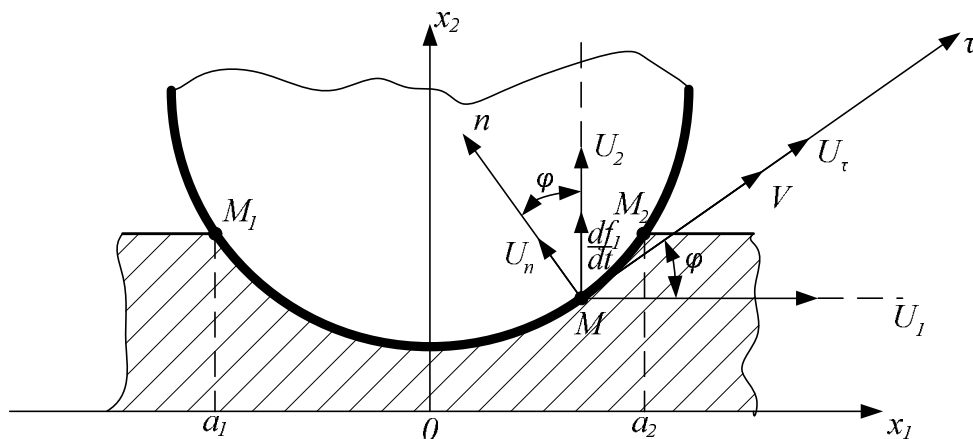


Рисунок 2

Представим, что
 $U_n = U_2 \cos \varphi - U_1 \sin \varphi,$

$$U_t = U_1 \cos j + U_2 \sin j .$$

Тогда условие (5) разделив на $\cos j$ перепишем:

$$\begin{aligned} x_2 = f + f_1: \quad U_1 + U_2 \frac{df}{dx_1} &= V_1 \sqrt{1 + \frac{df}{dx_1} + \frac{df}{dt} \frac{df_1}{dx_1}}, \\ U_2 - U_1 \frac{df}{dx_1} &= \frac{df_1}{dt}. \end{aligned} \quad (6)$$

В точке $M_2 [f(a_2) + f_1(t), a_2(t)]$ среда отрывается от поверхности валка и при дальнейшем движении будет ограничиваться лишь свободной поверхностью, на которой $P_{nn} = 0, P_{nt} = 0$ (P_{nn}, P_{nt} - проекция на нормаль и касательную к поверхности напряжения). Свободная поверхность в точке M_2 плавно сопрягается с поверхностью валка, поэтому в точке M_2 имеем условие:

$$x_2 = f(a_2) + f_1(t), x_1 = a_2(t): P_{nn} = 0, P_{nt} = 0. \quad (7)$$

В точке $M_1 [f(a_1) + f_1(t), a_1(t)]$ среда захватывается валком и увлекаются в зазор благодаря прилипанию частиц среды к поверхности валка. Следовательно, в точке M_1 имеет место лишь условие

$$x_2 = f(a_1) + f_1(t), x_1 = a_1(t): P_{nn} = 0. \quad (8)$$

Выразим P_{nn} и P_{nt} через давление P и компоненты девиатора напряжений получим:

$$P_{nt} = (-P_{11} \sin j + P_{12} \cos j) \cos j + (-P_{12} \sin j + P_{22} \cos j) \sin j ,$$

$$P_{nn} = [(P + P_{11}) \sin j - P_{12} \cos j] \sin j + (-P_{12} \sin j + (P + P_{22}) \cos j) \cos j .$$

$$x_2 = f(a_2) + f_1(t), x_1 = a_2(t):$$

$$P \left[1 + \left(\frac{df}{dx_1} \right)^2 \right] + P_{22} + P_{11} \left(\frac{df}{dx_1} \right)^2 - P_{12} \frac{dt}{dx_1} = 0, \quad (9)$$

$$(P_{22} - P_{11}) \frac{df}{dx_1} + P_{12} \left[1 + \left(\frac{df}{dx_1} \right)^2 \right] = 0;$$

$$x_2 = f(a_1) + f_1(t), x_1 = a_1(t):$$

$$P \left[1 + \left(\frac{df}{dx_1} \right)^2 \right] + P_{22} + P_{11} \left(\frac{df}{dx_1} \right)^2 - P_{12} \frac{dt}{dx_1} = 0.$$

Таким образом, задача исследования движения среды в зазоре каландра состоит в решении уравнений (1) – (3) с условиями (4), (6), (7).

Н.В. Карпович, магистрант;
И. Ф. Кузьмицкий, канд. техн. наук;
Д.С. Карпович, канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ПРИМЕРЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Основными формами представления объектов с распределенными параметрами, как и в случае объектов с сосредоточенными параметрами, являются представление в виде дифференциальных уравнений в частных производных, представление в виде передаточных функций, представление в виде временных характеристик, представление в виде частотных характеристик.

Особенностью распределенных систем является наличие пространственных составляющих в сигнале входа и выхода.

Как известно, в сосредоточенных системах импульсная переходная функция характеризует реакцию системы на единичный идеальный импульс, переходная характеристика характеризует реакцию системы на единичную ступенчатую функцию, а комплексная передаточная функция – реакцию системы на гармоническое входное воздействие. В распределенных системах к временным входным воздействиям, рассмотренным выше, необходимо добавить пространственную форму.

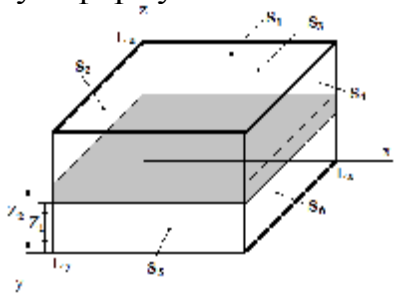


Рисунок 1 – Объект управления

В настоящей работе в качестве объекта управления выступает температурное поле многослойной пластинки, которая представлена на рисунке 1. Управляющим воздействием служит тепловой поток, распределенный по поверхности, а функцией выхода – температурное поле $T(x,y,z,t)$. Поверхности S_3, S_5, S_4 теплоизолированы, а поверхности S_2, S_6 поддерживаются при постоянной температуре.

При описании объектов с распределенными параметрами можно выделить три подхода:

1. Представление в форме дифференциальных уравнений в частных производных. Уравнение Фурье можно записать в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y, \quad 0 < z < L_z,$$

где $T(x, y, z, t)$ - фазовая переменная; x, y, z , - пространственные координаты; a - заданный коэффициент; L_x, L_y, L_z - заданные числа.

Граничные и начальные условия для уравнения (1) имеют вид:

$$T(0, y, z, t) = T(x, 0, z, t) = T(L_x, y, z, t) = T(x, L_y, z, t) = 0$$

$$\frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial z} = 0, \quad T(x, y, L_z, t) = U(x, y, t), \quad T(x, y, z, 0) = 0. \quad (2).$$

Общий способ решения - использование приближенных численных методов. Наиболее широко распространены методы сеток.

Основная идея метода сеток - аппроксимация искомой непрерывной функции совокупностью приближенных значений, рассчитанных в некоторых точках области - узлах. Совокупность узлов, соединенных определенным образом, образует сетку. Сетка, в свою очередь, является дискретной моделью области определения искомой функции.

Общий алгоритм метода сеток:

1. Построение системы в заданной области (дискретизация задачи);
2. Получение системы алгебраических уравнений относительно узловых значений (алгебраизация задачи);
3. Решение полученной системы алгебраических уравнений.

Наиболее часто используют 2 вида метода сеток:

- метод конечных элементов.
- метод конечных разностей.

В методе конечных разностей используются, как правило, регулярные сетки, шаг которых постоянен либо меняется по несложному закону. Расстояние между соседними узлами - шаг сетки.

В методе конечных элементов исходная область определения функции разбивается с помощью сетки, в общем случае неравномерной, на отдельные подобласти - конечные элементы. Искомая непрерывная функция аппроксимируется кусочно-непрерывной, определенной на множестве КЭ. Практически МКЭ применяют в виде специальных программных систем, например, PDE Toolbox/MATLAB.

2. Определение реакции системы на входной сигнал, представленный в виде комбинации дельта функций в пространственной и временной областях

$$w(x, t) = d(x - m) \cdot d(t - t), \quad (3)$$

где x, μ - заданные точки пространства,
 t, τ - временные независимые переменные.

Реакция объекта на входное воздействие $\omega(t, x)$ представляется в виде функции Грина $G(x, t, \mu, \tau)$ или импульсной переходной функцией.

Реализация данного подхода сопряжено с определенными трудностями при использовании распространенных математических пакетов.

3. Определение реакции объекта на собственные вектор-функции оператора объекта. В этом случае распределенный объект (систему) структурно можно представить бесконечной совокупностью независимых условно сосредоточенных контуров. Передаточная функция каждого условно сосредоточенного контура может быть представлена в виде отношения аналитических целых функций.

Разложим входное воздействие $U(x, y, t)$ в ряд Фурье. Учитывая граничные условия (2), входное воздействие может быть представлено в виде:

$$U(x, y, t) = \sum_{n, \gamma=1}^{\infty} C_{n, \gamma}(t) \times \sin(\psi_n \times x) \times \sin(\tilde{\gamma}_\gamma \times y),$$

где $y_h = p \times h / x_L$; $\tilde{\gamma}_g = p \times g / y_L$.

Передаточная функция объекта по h, g ($h, g = \overline{1, \infty}$) моде входного воздействия:

$$W_{0, n, \gamma}(p) = \frac{\bar{H}_{n, \gamma}(p) \times \sin(\psi_n \times x) \times \sin(\tilde{\gamma}_\gamma \times y)}{C_{n, \gamma}(p) \times \sin(\psi_n \times x) \times \sin(\tilde{\gamma}_\gamma \times y)} = \frac{\exp(-b_{h, g} \times z_L) + \exp(-b_{h, g} \times z_L)}{\exp(b_{h, g} \times z_L) + \exp(-b_{h, g} \times z_L)}, \quad (h, g = \overline{1, \infty}),$$

где $b_{h, g} = \frac{p^2}{\epsilon a} + y_h^2 + \tilde{\gamma}_g^2$, ($h, g = \overline{1, \infty}$).

Таким образом, рассматриваемый распределенный объект может быть представлен в виде совокупности передаточных функций $W_{0, n, \gamma}(p)$ ($h, g = \overline{1, \infty}$).

В зависимости от особенностей теплового объекта и необходимости в определении выходных параметров объекта управления с учетом влияния входного или входных воздействий можно воспользоваться любым из представленных выше способов описания.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Eyges, Leonard, The Classical Electromagnetic Field, Dover Publications, New York, 1972.
2. Рапопорт Э. Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
3. Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975. – 568 с.
4. Коваль В. А. Спектральный метод анализа и синтеза распределенных управляемых систем. – Саратов: СГТУ, 1997. – 191 с.
5. Рапопорт Э. Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Металлургия, 1993. – 278 с.
6. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.

О. Н. Суша, асп.;

В.Б. Михайлов, доц., канд. физ.-мат. наук
(БГТУ, г. Минск);А.Г. Жижченко, научн. сотрудник
(ФТИ НАН Беларуси, г. Минск)

ТЕМПЕРАТУРНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И МЕТОДЫ ЕГО СНИЖЕНИЯ

Одной из важнейших задач современного деревообрабатывающего производства является повышение производительности круглопильных станков за счет улучшения эксплуатационных свойств дереворежущего инструмента и оптимального выбора режимов резания. Многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями доказано, что основной причиной потери работоспособности круглых пил, оказываются температурные напряжения, вызванные неравномерным нагревом пильного диска. Сильнее она нагревается у зубчатого венца. В программе ANSYS была приложена температура к зубьям круглой пилы [2] заданная формулой (1.1)

$$A = 500 - 200 \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.1)$$

где ω - скорость вращения, рад/с; t - время, с; φ - сдвиг фаз, рад

При моделировании распределение температуры с учетом периодического взаимодействия круглой дисковой пилы с обрабатываемым материалом была графически представлена распределение температур (рисунок 1).

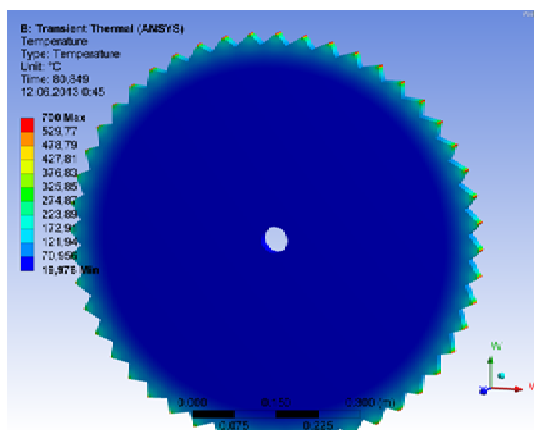


Рисунок 1 – Нагрев круглой пилы при продольной распиловке

Исходя, из которого можно подтвердить ранее сделанный вывод о минимальном влиянии температуры в зоне резания на температурное поле инструмента [2].

Распределение температуры в дереворежущем инструменте также можно получить численным способом [3]. Из численных методов в настоящее время широко используемым является метод

конечных разностей. Данный метод мы использовали для решения дифференциального уравнения (1.2) теплопроводности

$$\frac{\partial J}{\partial t} = a \frac{\partial^2 J}{\partial x^2}. \quad (1.2)$$

Решив данное уравнение (1.2) получим окончательное выражение (1.3) распространение температуры дереворежущего инструмента.

$$T_{m,k+1} = \frac{ad_t}{d_x^2} (T_{m+1,k} + T_{m-1,k}) - \frac{2ad_t}{d_x^2} T_{m,k} + \frac{\ddot{Q}}{c} T_{m,k}. \quad (1.3)$$

Применив данное выражение в программе MATLAB, был получен график теплового поля (рис. 2). На данном графике отображена зависимость температуры от времени и длины.

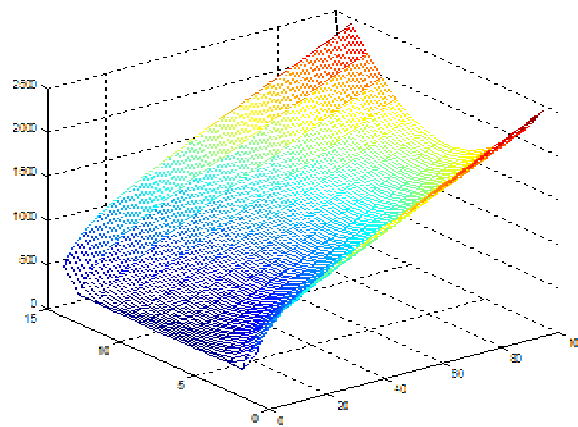


Рисунок 2 – График решения уравнения теплопроводности численным методом

Таким образом, при помощи численного метода всегда возможно удовлетворить граничным условиям задачи и решить сложные задачи. С последующим визуальным представлением полученных результатов. Перепад температуры режущего инструмента вызывает появление сжимающих напряжений [2] на периферии пилы (рис. 3)

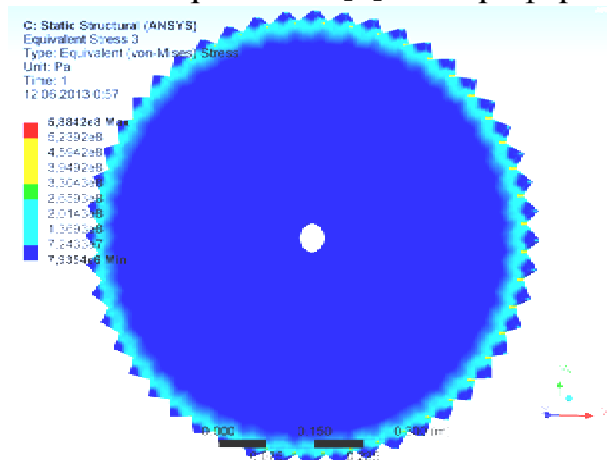


Рисунок 3 – Температурное напряжение режущего инструмента

В современной научной и производственной практике разработан и применяется ряд способов компенсации температурных напряжений, таких как применение более прочных материалов, улучшенных конструкций пил (проковка, вальцовка, выравнивание температуры диска, прорези и щелевые компенсаторы в круглой пиле) и пильных агрегатов.

Приведенные выше способы компенсации температурных напряжений имеют существенные недостатки [4]. Проковка — трудоемкая операция, слабо поддается механизации, для ее выполнения необходимы высококвалифицированные специалисты. Несколько менее трудоемка вальцовка, выполняемая на вальцовочном станке. Далее искусственная стабилизация или ликвидация температурного перепада на основе оснащения станков устройствами для охлаждения периферии или нагрева средней зоны пилы. Следующий метод эффективный и не требующий значительных материальных затрат это способ создания компенсационных прорезей. Создание прорезей снижает влияние температурных воздействий. Однако конструкция прорезей выбирается интуитивно, а обоснованность той или иной формы разрезов, как правило, доказывается экспериментальными методами.

Контроль круглых пил может осуществляться жесткостным методом, частотным методом или контролем плоскостности диска. Также зарубежные специалисты проводили работы по контролю пил на основании спектра звуковых колебаний, определении анизотропии магнитной проницаемости металла, магнитно-индукционного способа, способа остаточного поля и рентгенографических измерений [5]. На данный момент наибольшее распространение получили методы определения, напряженного состояния измерением частоты собственных колебаний круглой пилы. Современные методы неразрушающего контроля позволяют дать довольно точную картину распределения напряжений в ферромагнитном материале. Такими методами являются рентгеновская дифрактометрия, магнитные методы (измерение коэрцитивной силы, магнитной проницаемости, высшие гармоники, остаточная намагниченность, проводимость, магнитный и акустический эффекты Баркгаузена, метод вихревых токов, поверхностный и объемный ультразвук) [4]. Важным фактом является то что у всех этих методов возможно установить корреляционную зависимость между механическими и физическими характеристиками.

Использование теоретических разработок и результатов исследований позволит обоснованно производить разработку норм расхода инструмента, режимов подготовки и эксплуатации пил. В практике расчета работоспособности пил могут быть использованы принципы

расчета напряжений, скорости развития дефектов, а также значения вязкости разрушения инструментальной стали.

Анализ работ, посвященных исследованию напряжений в дисковых пилах, показывает, что ряд вопросов, связанных с учетом различных факторов требует дальнейшего развития, а отдельные результаты нуждаются в уточнении. В настоящее время для анализа напряженного состояния представляется целесообразным использовать численные методы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новые исследования резания древесины / Ивановский Е. Г., Василевская П. В., Лауриер Э. М. «Лесная промышленность», 1972. 128 с.
 2. Моделирование поведения режущего инструмента в пакете Ansys / О. Н. Суша, Д. С. Карпович, //Материалы VIII- ой республиканской научной конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы математики и вычислительной техники», Брест, 21-23 ноября 2013 г.: – Брест: БГТУ, 2013. – С. 36 – 39.
 3. Аналитический и численный метод решения уравнения теплопроводности / Д. С. Карпович, О.Н. Суша //Труды БГТУ, Минск, 2015
 4. Стахийев Ю.М. Работоспособность плоских круглых пил.– М. :Лесная промышленность, 1989.– 384 с.
- ГОСТ 980-80. Пилы круглые плоские для распиловки древесины. Технические условия [Текст]/ Введ. 01.07.82. М.: Изд-во стандартов, 1980. — 25 с.

УДК 652.52

В. П. Кобринец, доц., канд. техн. наук; Д.Н. Пронин, магистр
(БГТУ, г. Минск)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СУШКИ В БАРАБАННЫХ СУШИЛКАХ

Основные цели системы управления процессом сушки материала в барабанной сушилке:

1. Поддержание желаемого качества высушенного продукта, независимо от возмущения в процессе сушки и колебания подачи питания.
2. Максимизация пропускной способности при оптимальной энергетической эффективности и минимуме затрат.
3. Избежание пересушки и недосушки.
4. Стабилизация процесса сушки.
5. Оптимизация производительности процесса сушки.

Наиболее желательная выходная переменная для контроля процесса сушки – содержание влаги в продукте, но ее зачастую очень трудно измерить непосредственно. Часто, содержание влаги в высушенных продуктах, может быть выведено из температуры и влажности отходящего газа, хотя нужно с осторожностью применять соответствующие тепловой и массовый балансы. В некоторых особых случаях это может даже привести к серьезной ошибке, если используется только температура выхлопных газов (без одновременного измерения влажности).

Прямой контроль и постоянное измерение содержания влаги в твердых материалах позволит получить значительные улучшения при контроле сушиллки, обеспечивая немедленные измерения содержания влаги на выходе сушиллки и автоматической компенсацией факторов, которые нарушают работу управления.

Процессы тепло- и массообмена (влагообмена) в барабанной сушилке зависят от ее конструктивных характеристик (размеров, числа и профиля лопаток и т. д.), а также от технологических параметров (числа оборотов барабана, угла наклона аппарата, расхода, температуры и влагосодержания воздуха и материала на входе в сушилку). При определении динамических свойств данного аппарата естественно считать его конструктивные характеристики неизменными. Таким образом, в качестве возмущающих воздействий (входных величин) принимаем изменения расхода, температуры и влагосодержания материала и воздуха на входе в сушилку.

При составлении математической модели барабанной сушилки сделаем следующие допущения:

1. Теплоемкости материала, влаги (воды) и барабана и коэффициенты теплоотдачи от воздуха к материалу и барабану постоянны по длине и в поперечном сечении сушилки, а также во времени

2. Температура и влагосодержание материала распределены по длине аппарата и сосредоточены в его поперечном сечении (одномерная задача), так как при вращении барабана материал хорошо смешивается.

3. Поперечное сечение слоя материала, находящегося на лопастях барабана, значительно меньше его длины, а скорость воздуха намного больше скорости перемещения материала вдоль сушилки. Температура и влагосодержание воздуха одинаковы по длине и в поперечном сечении слоя материала и равны температуре и влагосодержанию на выходе

4. Передачей тепла материалу при соприкосновении его с лопастями барабана пренебрегаем

5. Температура барабана в статике равна температуре воздуха на выходе из сушилки

6. Передачей тепла от воздуха к материалу путем лучеиспускания пренебрегаем

7. Движение материала по сечению аппарата происходит равномерно, без турбулентного смещения

При составлении уравнений сохранения энергии для воздуха и материала учитываем лишь тепло, затраченное на нагрев «сухого» материала, поскольку тепло, переданное воздухом материалу и затраченное на испарение влаги из него, возвращается обратно в воздух вместе с испаренной влагой.

Структурную схему барабанной сушилки можно представить следующим образом:



На основании анализа процесса сушки как объекта управления можно определить воздействия, оказывающие влияние на данный объект:

- Возмущающие воздействия: входное влагосодержание материала; расход материала; входное влагосодержание воздуха
- Регулирующие воздействия: расход теплоносителя; расход первичного воздуха; расход вторичного воздуха.
- Регулируемая величина: выходное влагосодержание материала.

Для разработки математической модели процесса сушки с учетом распределенности параметров с учетом приведенных допущений составляем следующие дифференциальные уравнения:

Уравнение сохранения энергии для воздуха

$$LI_1 - LI_2 - \alpha_{f,r,m} F_M \left(t_{2r} - \frac{t_{1M} - t_{2M}}{2} \right) - \alpha_{f,r,b} F_b (t_{2r} - t_b) = M_r \frac{dI_2}{d\tau} \quad (1)$$

Уравнение сохранения массы для влаги в воздухе

$$L(d_1 - d_2) + G(w_1 - w_2) = M_r \frac{dd_2}{d\tau} \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии для материала

$$c_M G \frac{\partial t_M}{\partial \bar{y}} + c_M t_M \frac{\partial G}{\partial \bar{y}} - \alpha_{f, \Gamma, M} F_M (t_{2\Gamma} - t_M) + \frac{\partial}{\partial \tau} (c_M M_M t_M) = 0 \quad (3)$$

Уравнение сохранения массы для сухого материала

$$\frac{\partial G}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial M_M}{\partial \tau} = 0 \quad (4)$$

Уравнение сохранения массы для влаги в материале

$$G \frac{\partial w}{\partial \bar{y}} + w \frac{\partial G}{\partial \bar{y}} + K F_M (w - w_{\text{равн.}}) + \frac{\partial}{\partial \tau} (M_M w) = 0 \quad (5)$$

Уравнение сохранения энергии для сушильного барабана

$$\alpha_{f, \Gamma, \delta} F_{\delta} (t_{2\Gamma} - t_{\delta}) = c_{\delta} M_{\delta} \frac{dt_{\delta}}{d\tau} \quad (6)$$

где \mathbf{L} – расход теплоносителя (по абсолютно сухому веществу), \mathbf{I} – энтальпия, α_f – поверхностный коэффициент теплообмена, \mathbf{F} – площадь, \mathbf{t} – температура, \mathbf{M} – количество вещества, \mathbf{d} – влагосодержание теплоносителя, \mathbf{G} – расход материала (по абсолютно сухому веществу), \mathbf{c} – истинная теплоемкость, \mathbf{K} – коэффициент сушки

На основании данных уравнений, которых получена система нелинейных уравнений в частных производных. Проведена линеаризация данной системы и получена математическая модель процесса сушки по основным динамическим каналам.

$$\begin{aligned} & a_1 \frac{d\Delta t_{2\Gamma}}{d\tau} + a_2 \Delta t_{2\Gamma} + a_3 \frac{d\mu_{2d}}{d\tau} + a_4 \mu_{2d} = \\ & = a_5 \Delta t_{1\Gamma} + a_6 \Delta t_{1\Gamma} + a_6 \mu_L + a_7 \Delta t_{1M} + a_7 \Delta t_{2M} + \\ & \quad + a_8 \Delta t_{\delta} + a_9 \mu_{1d} + a_{10} \mu_{F, M} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & a_{11} \frac{d\mu_{2d}}{d\tau} + a_{12} \mu_{2d} = \\ & = a_{13} \mu_{1d} + a_{14} \mu_{1w} + a_{15} \mu_L - a_{14} \mu_{2w} + a_{16} \mu_G \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & a_{17} \frac{\partial \Delta t_M}{\partial \bar{y}} + a_{18} \frac{\partial \Delta t_M}{\partial \tau} + a_{19} \Delta t_M = \\ & = a_{19} \Delta t_{2\Gamma} + a_{20} \mu_{F, M} + a_{21} \frac{\partial \mu_{M, M}}{\partial \tau} + a_{22} \frac{\partial \mu_G}{\partial \bar{y}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mu_G}{\partial \bar{y}} + a_{23} \frac{\partial \mu_G}{\partial \tau} = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & a_{24} \frac{\partial \mu_w}{\partial \tau} + a_{25} \frac{\partial \mu_w}{\partial \bar{y}} + a_{26} \mu_w + [a_{27} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{28}] \mu_{2d} + \\ & + [a_{29} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{30}] \Delta t_{2\Gamma} + [a_{31} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{32}] \frac{\partial \mu_G}{\partial \tau} + \\ & + a_{33} \exp(-a_0 \bar{y}) \mu_L + [a_{34} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{35}] \frac{\partial \mu_G}{\partial \bar{y}} + [a_{36} \exp(-a_0 \bar{y}) \\ & + a_{39}] \mu_G = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$a_{38} \frac{d\Delta t_6}{d\tau} + a_{39} \Delta t_6 = a_{39} \Delta t_{2\Gamma} \quad (12)$$

Однозначность решения системы уравнений (7-12) зададим крайними условиями

$$\text{При } y = 0 \quad \mu_w = \mu_{1w} \quad \Delta t_m = \Delta t_{1m} \mu_G = \mu_{1G}$$

$$\text{При } \tau = 0 \quad \Delta t_{2\Gamma} = \mu_{2d} = \Delta t_m = \mu_G = \mu_w = \Delta t_6 = 0$$

Применяя к уравнениям (7-12) преобразование Лапласа $\varphi(p) = L|F(\tau)|$ и $\varphi(s) = L|F(\bar{y})|$ и одно обратное преобразование $F(y) = L^{-1}|\varphi(s)|$ можно получить передаточные функции по каналам, приведенным на структурной схеме.

УДК 628.978

В. П. Кобринец, доц., канд. техн. наук;
Н. П. Коровкина, доц., канд. пед. наук;
Н. Н. Пустовалова, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, Минск)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК

Для оценки эффективности электроприводов наиболее значимы такие электромеханические показатели, как удельный электромагнитный момент, номинальная мощность при равных габаритах, мощность на единицу объема сердечника, коэффициент полезного действия при равных габаритах, номинальной частоте вращения.

В работе применен модифицированный метод многокритериального ранжирования для оценки электромеханических показателей (показатель качества) сравниваемых двигателей, характеризующихся вышеперечисленными параметрами. Сущность предлагаемого метода наиболее наглядно можно пояснить при его пошаговой реализации:

1. Выбираются сравниваемые двигатели. Формируется таблица, во второй колонке, которой перечисляются наиболее важные параметры сравниваемых двигателей (таблица 1).

2. На основании составленной таблицы эксперт предварительно определяет числовое значение показателя качества каждого двигателя, участвующего в сравнительном анализе, которое заносится в последнюю строку каждой колонки (таблица 1, «оценка эксперта»). Лучший двигатель, по мнению эксперта, оценивается в один балл, остальное – в пределах от единицы до нуля).

3. Окончательно сформированная таблица является исходным материалом для расчета показателя качества двигателей, минимально зависящего от субъективизма и квалификации эксперта.

4. Таблица представляет поле параметров двигателей и экспертных оценок по каждой колонке. Они связываются между собой аналитической зависимостью в виде функций $y = f(x)$, где x – параметры двигателей; y – оценки эксперта. Функции определяются для каждой строки параметров.

5. По найденным функциям пересчитываются значения параметров и эти значения являются новыми параметрами двигателей в аналитической системе расчета показателя качества (таблица 2).

6. Для каждой колонки таблицы 2 по имеющимся числовым значениям определяют агрегирующую (обобщенную) функцию как среднее геометрическое, которое и предлагается считать показателем качества

По данной методике приведем метод расчета показателей эффективности электроприводов с двигателем постоянного тока (ДПТ), асинхронным с частотно-регулируемым приводом (АД) и вентильно-индукторным приводом (ВИП). В основу расчета кладется экспертная оценка качества эталонного оборудования. Среди имеющихся образцов эксперт выбирает наилучшее эталонное оборудование, которое оценивается им в 0.9 – 1 балл. Устройство плохого качества оценивается 0 или значением, близким к нулю. Оценки остальных образцов находятся между 0 и 1.

В таблице 1 представлены параметры электроприводов и экспертные оценки.

Таблица 1 - Значения параметров электроприводов и их экспертные оценки

№ п/п	Параметры	Условное обозначение	Привод сДПТ	Привод с АД	ВИП
1	Длина сердечника статора, мм	X_1	140	146	130
2	Номинальная мощность $P_{ном}$, кВт	X_2	7	9	11,3
3	Удельный электромагнитный момент, Н*м	X_3	5,48	6,75	9,5
4	Мощность на единицу объема сердечника (относительно МПТ)	X_4	1	1,23	1,74
5	Номинальный КПД, %	X_5	76	81	86
6	Оценка эксперта		0,5	0,7	0,9

Далее определяются функции, характеризующие зависимость значений экспертных оценок от значений параметров приводов. Исследования показали, что наилучшую точность дает построение таких функций в виде полиномов второго порядка $y = ax^2 + bx + c$. С помощью опций среды Excel и разработанной на языке

VisualBasicForApplication программы были рассчитаны коэффициенты **a, b** и **c** полиномов второго порядка.

Полученные функции:

$$Y = 0,0046 x_1^2 - 1,2775x_1 + 89,517$$

$$Y = -0,003x_2^2 + 0,1485x_2 - 0,3911$$

$$Y = -0,0211x_3^2 + 0,4153x_2 - 1,1428$$

$$Y = -0,6451x_4^2 + 2,3082x_2 - 1,1631$$

$$Y = -17x_5^2 + 0,04x_5 - 2,54$$

По данным функциональным зависимостям вновь рассчитываем значения параметров, и для каждого образца оборудования определяем агрегирующую функцию как среднее геометрическое. Значение этой агрегирующей функции считаем обобщенным показателем эффективности оборудования. Соответствующие значения функций и показателей качества для рассматриваемого примера представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Значения функций принадлежности и показателей качества

№ п/п	Параметры	Привод сДПТ	Привод с АД	ВИП
1	Длина сердечника статора, мм	0,827	1,056	1,182
2	Номинальная мощность $P_{ном}$, кВт	0,501	0,702	0,904
3	Удельный электромагнитный момент, Н*м	0,499	0,699	0,898
4	Мощность на единицу объема сердечника (относительно МПТ)	0,500	0,700	0,900
5	Номинальный КПД, %	0,500	0,700	0,900
6	Показатель качества	0,553	0,760	0,951

Данные таблицы 2 показывают преимущество двигателей ВИД над асинхронным двигателем и двигателем постоянного тока по таким показателям как удельный электромагнитный момент, номинальная мощность на единицу объема сердечника, КПД, т. к. показатель качества ВИП – 0,951, АД – 0,760, ДПТ – 0,553.

В качестве примера рассмотрим расчет эффективности применения ВИД на приводе электродвигателей насосов. Исходными величинами для расчета эффективности применения вентильно-индукторного двигателя явились следующие: номинальные мощности асинхронного двигателя и ВИД, коэффициенты полезного действия этих двигателей, число часов работы за год. Экономический эффект от реализации энергосберегающего мероприятия определяли с учетом приведения к номинальному режиму эксплуатации оборудования, т.к. при труднопрогнозируемом режиме работы оборудования и значительном его отклонении от номинального годовая экономия электро-

энергии и за более длительный период может существенно отличаться от расчетной.

Экономия электрической энергии при замене асинхронных двигателей на ВИД одинаковых мощностей определяем по величине снижения потерь:

Разность потерь мощности АД и ВИД:

$$\Delta P = \Delta P_{1АД} - \Delta P_{ВИД} = P_{ном} \times (1/\eta_{АД} - 1/\eta_{ВИД}), \text{кВт},$$

где $\Delta P_{1АД}$, $\Delta P_{ВИД}$ – потребляемые мощности соответственно АД и ВИД, кВт; $P_{ном}$ – номинальная мощность двигателей АД и ВИД, кВт; $\eta_{АД}$ – КПД асинхронного двигателя; $\eta_{ВИД}$ – КПД вентильно-индукторного двигателя.

Экономия электрической энергии в год:

$$\Delta W = P_{ном} \times (1/\eta_{АД} - 1/\eta_{ВИД}) \times t, \text{кВт}\cdot\text{ж}/\text{год}, \text{ где}$$

t – число часов работы в году, $t = 4300$ час.

В таблице 3 приведены исходные данные, оценка экономии электроэнергии при замене асинхронных двигателей вентильно-индукторными.

Таблица 3 - Данные об оценке экономии электроэнергии

№ п/п	$P_{ном}$, кВт	$\eta_{ад}$, о.е.	$\eta_{-вид}$, о.е.	ΔP , кВт	ΔW , кВтч
1	2,8	0,83	0,92	2,28	9836
2	13	0,85	0,92	1,19	5117
3	14	0,85	0,94	1,57	6751
4	18,5	0,84	0,92	1,92	8234
5	18,5	0,7	0,92	6,32	27176
6	22	0,87	0,92	1,37	5891
7	30	0,88	0,94	3,31	14233
8	45	0,87	0,94	3,87	16632
9	55	0,86	0,92	4,1	17630
10	75	0,70	0,92	25,62	112875
11	90	0,79	0,94	18,18	78174
12	95	0,88	0,92	1,37	20425
13	110	0,88	0,94	8,8	37840
14	132	0,87	0,92	8,25	39732
15	160	0,87	0,94	2,87	61920

Заключение

Использование вентильно-индукторных двигателей наряду с техническими преимуществами этих двигателей, дает значительную экономию электроэнергии на предприятиях при сравнительно небольшом сроке окупаемости.

Результаты выполненных расчетов свидетельствуют о принципиальной возможности и реальной практической эффективности замены асинхронных двигателей вентильно-индукторными.

СЕКЦИЯ № 3
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕОРИИ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ

Председатель – д-р физ.-мат.наук, профессор
Марченко Владимир Матвеевич

Секретарь – канд. физ.-мат. наук, доцент Асмыкович Иван Кузьмич

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ ЗАДАЧ С МАЛЫМ ПАРАМЕТРОМ ПРИ СТАРШЕЙ ПРОИЗВОДНОЙ

Граничные задачи для систем обыкновенных дифференциальных уравнений (о. д. у.) являются довольно распространенным классом задач вычислительной математики, прикладное значение которых широко известно. Они распространены в механике, акустике, динамике жидкостей, физике и других областях науки и техники. Многие методы численного решения дифференциальных уравнений в частных производных и ряд задач оптимизации в конечном счете приводят к необходимости решения граничных задач для о. д. у. и систем.

Граничные задачи с малым параметром при старшей производной в большинстве своем являются математическими моделями, решения которых отличаются сложным характером поведения, в частности, им присуще развитие пограничных слоев либо внутренних переходных слоев с большими градиентами решений. Это значительно усложняет решение такого рода задач [1].

Часто в приложениях встречаются граничные задачи, у которых коэффициент при производной второго порядка мал по сравнению с коэффициентом при производной первого порядка. Они называются сингулярно возмущенными. Их решение может быстро изменяться вблизи граничных точек, т. е. мы имеем пограничный слой. Причина трудности решений задач с пограничным слоем заключается в неустойчивости численного процесса [2]. Для решения названных выше задач предлагается метод дифференциальной ортогональной прогонки с введением в зонах пограничных слоев регулирующих коэффициентов.

Рассмотрим двухточечные граничные задачи для обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с малым параметром при старшей производной вида:

$$\begin{cases} \epsilon y''(x) + a(x)y'(x) - b(x)y(x) = f(x), & 0 < x < 1, \\ y(0) = A, \quad y(1) = B, \quad a(x) > 0, \quad b(x) > 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \epsilon y''(x) + b(x)y(x) = f(x), & 0 < x < 1, \\ y(0) = A, \quad y(1) = B, \quad b(x) > 0, \quad \epsilon > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $\epsilon > 0$ – малый параметр при старшей производной. Задача вида (1) имеет один пограничный слой, а задача вида (2) – два пограничных слоя [2].

Представим обыкновенные дифференциальные уравнения (1)-(2) в виде системы о. д. у. вида

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = a_{11}(x)y_1 + a_{12}(x)y_2 + f_1(x), & 0 < x < 1, \\ \dot{y}_2 = a_{21}(x)y_1 + a_{22}(x)y_2 + f_2(x) \end{cases} \quad (3)$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} a_1 y_1(a) + b_1 y_2(a) = g_1, & a_1^2 + b_1^2 = 1, \\ a_2 y_1(b) + b_2 y_2(b) = g_2, & a_2^2 + b_2^2 = 1, \end{cases} \quad (4)$$

где $a_{ik}(x)$, $(i, k = 1, 2)$, $f_1(x)$, $f_2(x)$ – функции, непрерывные на отрезке $[a, b]$, a_i , b_i , g_i – заданные постоянные. Предположим, что существует и, причем, единственное искомое решение задачи (3), (4). Обозначим это решение через $y_1(x)$ и $y_2(x)$.

В виде системы уравнений (3) можно представить любое линейное о. д. у., причем коэффициенты $a_{ik}(x)$ в этом случае будут зависеть от $\epsilon > 0$, т.е. $a_{ik}(x) \rightarrow a_{ik}(x, \epsilon)$. В свою очередь, граничные условия вида (4) представлены в общем виде, что позволяет рассматривать более широкий класс задач.

Введем вспомогательную функцию $Q(x)$ и новые неизвестные функции [3]:

$$\begin{cases} \dot{u} = m_1(x, \epsilon)y_1(x) \sin Q(x) + m_2(x, \epsilon)y_2(x) \cos Q(x), \\ \dot{v} = m_1(x, \epsilon)y_1(x) \cos Q(x) - m_2(x, \epsilon)y_2(x) \sin Q(x), \end{cases} \quad (5)$$

где $\epsilon > 0$, $m_1(x, \epsilon) > 0$ и $m_2(x, \epsilon) > 0$ функции, в известной мере моделирующие профили пограничных слоев. В зонах пограничных слоев их выбор должен быть строго согласован с поведением функций $y_1(x)$ и $y_2(x)$. Регулирующие множители $m_1(x, \epsilon) > 0$ и $m_2(x, \epsilon) > 0$ нужно выбирать таким образом, чтобы произведения $m_1(x, \epsilon)y_1(x)$ и $m_2(x, \epsilon)y_2(x)$ были в необходимой мере стабилизированы. Выражения для искомого решения и его производной получаются из последних соотношений.

$$\begin{cases} m_1(x, \epsilon)y_1(x) = \sin Q(x)u(x) + \cos Q(x)v(x), \\ m_2(x, \epsilon)y_2(x) = \cos Q(x)u(x) - \sin Q(x)v(x), \end{cases} \quad (6)$$

В некоторых случаях можно полагать $m_1(x, \epsilon) \rightarrow 1$. В зонах пограничных слоев, вблизи точки $x=0$ наблюдается быстрый рост решения и особенно градиента решения, т.е. его производной. Для нейтрализации этого роста введем регулирующий множитель для задачи (1) в виде:

$$m_2(x, \epsilon) = -2\epsilon \operatorname{cth} \frac{\sqrt{a^2(x) + 4b(x)\epsilon}}{2\epsilon}.$$

Для задачи вида (2) регулирующий множитель будет иметь вид:

$$m_2(x, \epsilon) = \sqrt{\frac{\epsilon}{b(x)}} \operatorname{th} \sqrt{\frac{b(x)}{\epsilon}}.$$

Полученные множители регулируют поведение функции $y(x)$ и его производной $y'(x)$ вблизи зон пограничных слоев.

Имеет место тождество:

$$u^2(x) + v^2(x) \approx (m_1(x, \epsilon)y_1(x))^2 + (m_2(x, \epsilon)y_2(x))^2.$$

Оно показывает, что порядок роста функций $u(x)$ и $v(x)$ одинаков с порядком роста функций $m_1(x, \epsilon)y_1(x)$ и $m_2(x, \epsilon)y_2(x)$.

Приведенный алгоритм метода дифференциальной ортогональной прогонки дает возможность применять единый подход к решению граничных задач с малым параметром при старшей производной и с возникающими при этом одним и двумя пограничными слоями.

В качестве наглядной демонстрации свойств и практической реализации приведенного в данной работе метода предлагается решение двух задач с малым параметром при старшей производной и с возникающими при этом пограничными слоями [4].

Пример 1. Решить граничную задачу с двумя пограничными слоями вида

$$\epsilon y''(x) - y(x) = \cos^2 px + 2\epsilon p^2 \cos 2px$$

с граничными условиями: $y(0) = 0, y(1) = 0, \epsilon = \frac{1}{400}$.

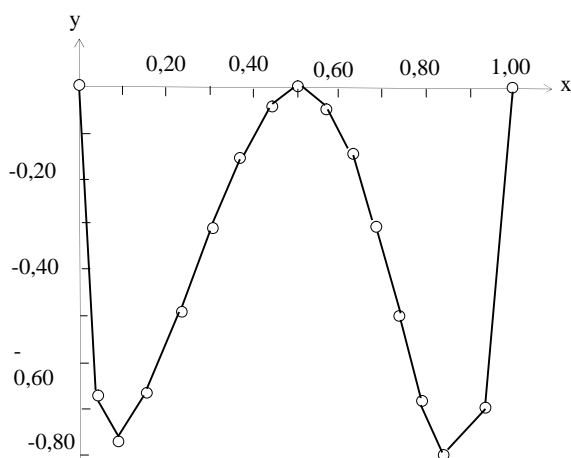


Рисунок 1 – Графическая иллюстрация решения задачи 1

Пример 2. Решить граничную задачу с одним пограничным слоем вида

$$\epsilon y''(x) + 2xy'(x) + (1 + x^2)y(x) = 0$$

с граничными условиями: $y(-1) = 2, y(1) = 1, \epsilon = \frac{1}{5}$.

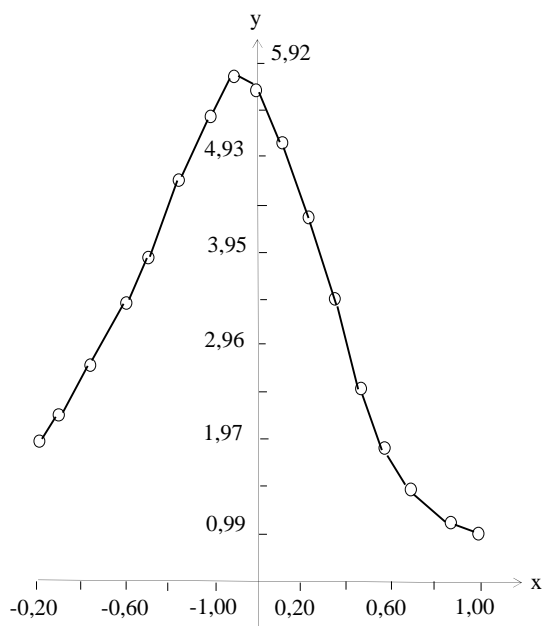


Рисунок 2 – Графическая иллюстрация решения задачи 2.

Предложенные двухточечные граничные задачи были выполнены в приложении MSEXCEL.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / М. Наука. 1974.
2. Холл Д. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений /пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – С. 312
3. Соловьева И. Ф. Решение граничных задач с пограничным слоем // Труды БГТУ. Сер. №6 (153), физ.-мат. науки и информ. – 2012. - С.21–23.
4. Дулан Э., Миллер Дж., Шилдерс У. Равномерные численные методы решения задач с пограничным слоем /пер. с англ. М., 1983. - С. 200.

УДК 517.977.1

В.М. Марченко, проф., д-р физ.-мат. наук;
 О.Н. Пыжкова, доц., канд. физ.-мат. наук
 (БГТУ, г. Минск)

УПРАВЛЯЕМОСТЬ И ДОСТИЖИМОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ ГИБРИДНЫХ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ

В докладе рассматриваются гибридные дискретно-непрерывные системы [1], в которые управление входит только в дискретную составляющую, что в совокупности можно квалифицировать как непрерывные системы, управляемые дискретным регулятором.

1. Постановка задачи. Рассмотрим объект управления, описываемый следующей дискретно-непрерывной системой:

$$\dot{x}(t) = A_{11}x(t) + A_{12}y(kh), t \in [kh, (k+1)h), \quad (1)$$

$$y(kh+h) = A_{21}x(kh) + A_{22}y(kh) + Bu(kh), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $y(kh) \in \mathbb{R}^m$, $u(kh) \in \mathbb{R}^r$, $h > 0$, и $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}, B$ - постоянные матрицы соответствующих размеров.

Начальные условия для системы (1), (2) зададим в виде

$$x(0) = x(+0) = x_0, \quad y(0) = y_0. \quad (3)$$

Определение. При заданном моменте времени $t_1 = qh$, $q \in \mathbb{N}$, система (1), (2) называется

а) t_1 -относительно управляемой, если для любых начальных данных $x_0 \in \mathbb{R}^n$, $y_0 \in \mathbb{R}^m$ в (3) найдется управление $u(kh) \in \mathbb{R}^r$, $k = 0, 1, \dots, q-1$, такое, что соответствующее решение $x(t), t \in [0, t_1]$, $y(kh), k = 0, 1, \dots$, системы (1), (2) с начальными условиями (3) обладает свойством $x(t_1) = 0, y(t_1) = 0$;

б) t_1 -относительно управляемой по x , если для любых начальных данных $x_0 \in \mathbb{R}^n$, $y_0 \in \mathbb{R}^m$ в (3) найдется такое управление $u(kh) \in \mathbb{R}^r$, $k = 0, 1, \dots, q-1$, что соответствующее решение $x(t), t \in [0, t_1]$, $y(kh), k = 0, 1, \dots$, системы (1), (2) с начальными условиями (3) обладает свойством $x(t_1) = 0$;

в) t_1 -относительно управляемой по y , если для любых начальных данных $x_0 \in \mathbb{R}^n$, $y_0 \in \mathbb{R}^m$ в (3) найдется такое управление $u(kh) \in \mathbb{R}^r$, $k = 0, 1, \dots, q-1$, что соответствующее решение $x(t), t \in [0, t_1]$, $y(kh), k = 0, 1, \dots$, системы (1), (2) с начальными условиями (3) обладает свойством $y(t_1) = 0$;

г) t_1 -относительно достижимой, если для любых векторов $x_0, x_1 \in \mathbb{R}^n$; $y_0, y_1 \in \mathbb{R}^m$ в (3) найдется управление $u(kh) \in \mathbb{R}^r$, $k = 0, 1, \dots, q-1$, такое, что соответствующее решение $x(t), t \in [0, t_1]$, $y(kh), k = 0, 1, \dots$, системы (1), (2) с начальными условиями (3) обладает свойством $x(t_1) = x_1, y(t_1) = y_1$;

д) t_1 -относительно достижимой по x , если для любых векторов $x_0, x_1 \in \mathbb{R}^n; y_0 \in \mathbb{R}^m$ в (3) найдется управление $u(kh) \in \mathbb{R}^r, k = 0, 1, \dots, q-1$, такое, что соответствующее решение $x(t), t \in [0, t_1], y(kh), k = 0, 1, \dots$ системы (1), (2) с начальными условиями (3) обладает свойством $x(t_1) = x_1$;

е) t_1 -относительно достижимой по y , если для любых векторов $x_0 \in \mathbb{R}^n; y_0, y_1 \in \mathbb{R}^m$ в (3) найдется управление $u(kh) \in \mathbb{R}^r, k = 0, 1, \dots, q-1$, такое, что соответствующее решение $x(t), t \in [0, t_1], y(kh), k = 0, 1, \dots$ системы (1), (2) с начальными условиями (3) обладает свойством $y(t_1) = y_1$.

Задача. Найти параметрические критерии относительной t_1 -управляемости и достижимости системы (1), (2).

2. Относительная управляемость. Применяя формулу Коши к системе (1), для решения $x(kh+h), k = 0, 1, \dots$ получаем представление

$$\begin{aligned} x(kh+h) &= e^{A_{11}(kh+h-kh)} x(kh) + \int_{kh}^{kh+h} e^{A_{11}(kh+h-t)} A_{12} y(t) dt = \\ &= e^{A_{11}h} x(kh) + \int_0^h e^{A_{11}(h-t)} dt A_{12} y(kh). \end{aligned} \quad (4)$$

$$z[k] = \begin{pmatrix} \dot{x}(kh) \\ \dot{y}(kh) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \end{pmatrix} + D u(kh),$$

Учитывая (2) и вводя обозначения

$$S_h = \begin{pmatrix} e^{A_{11}h} & \int_0^h e^{A_{11}(h-t)} dt A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}, \quad \text{для описания } z[k] \text{ получаем дискретную}$$

систему вида

$$z[k+1] = S_h z[k] + D u(kh), \quad k = 0, 1, \dots \quad (5)$$

Отсюда нетрудно видеть, что задача относительной управляемости дискретно-непрерывной системы (1), (2) сводится к задаче полной управляемости (в смысле Калмана) дискретной системы (5). Из (5) с учетом начальных условий (3) получаем

$$\begin{aligned} z[q] &= S_h z[q-1] + D u((q-1)h) = \\ &= (S_h)^q \begin{pmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \end{pmatrix} + (S_h)^{q-1} D u(0) + (S_h)^{q-2} D u(h) + \dots + D u((q-1)h), \end{aligned} \quad q = 1, 2, \dots \quad (6)$$

По аналогии с развитой для линейных динамических систем

техникой [2] получения критериев полной управляемости, в частности, используя представление (6), приходим к следующему условию qh -относительной управляемости дискретно-непрерывной системы (1), (2).

Теорема 1. Условие

$$\text{rank}[D, S_h D, \dots, (S_h)^{q-1} D, (S_h)^q] = \text{rank}[D, S_h D, \dots, (S_h)^{q-1} D] \quad (7)$$

является необходимым и достаточным для qh -относительной управляемости системы (1), (2).

Действительно, анализируя представление (6), нетрудно заключить, что система (1), (2) qh -относительно управляема тогда и только тогда, когда линейная оболочка столбцов матрицы S_h содержится в линейной оболочке столбцов матриц $D, S_h D, \dots, (S_h)^{q-1} D$, что, в свою очередь, равносильно ранговому условию (7). В качестве следствия теоремы 1 имеем

Теорема 2. Условие

$$\text{rank}(H[D, S_h D, \dots, (S_h)^{q-1} D, (S_h)^q]) = \text{rank}(H[D, S_h D, \dots, (S_h)^{q-1} D])$$

является необходимым и достаточным

- а) для qh -относительной управляемости по x системы (1), (2) при $H = \begin{bmatrix} I_n & 0 \end{bmatrix}$,
- б) для qh -относительной управляемости по y системы (1), (2) при $H = \begin{bmatrix} 0 & I_m \end{bmatrix}$,

где символ I_k обозначает единичную $k \times k$ матрицу.

Замечание 1. Нетрудно видеть, что свойство qh -относительной управляемости со временем «насыщается». Оказывается, если система (1), (2) не является qh -относительно управляемой при $q = n + m$, то она не будет qh -относительно управляемой и при $q > n + m$.

Замечание 2. Система (1), (2) считается относительно управляемой, если она qh -относительно управляема хотя бы при одном натуральном числе q . Из теоремы 1 вытекает, что необходимый и достаточный критерий относительной управляемости системы (1), (2) заключается в требовании

$$\text{rank}[D, S_h D, \dots, (S_h)^{m+n-1} D, (S_h)^{m+n}] = \text{rank}[D, S_h D, \dots, (S_h)^{m+n-1} D].$$

Аналогично условие

$$\text{rank}(H[D, S_h D, \dots, (S_h)^{m+n-1} D, (S_h)^{m+n}]) = \text{rank}(H[D, S_h D, \dots, (S_h)^{m+n-1} D])$$

является необходимым и достаточным для относительной управляе-

мости по x системы (1), (2) при $H = \begin{bmatrix} I_n & 0 \end{bmatrix}$ и для относительной управляемости по y при $H = \begin{bmatrix} 0 & I_m \end{bmatrix}$.

3. Относительная достижимость. Применяя стандартную технику [2] получения ранговых критериев разрешимости задачи достижимости в линейных стационарных системах, получаем следующие условия t_1 -относительной достижимости системы (1), (2).

Теорема 3. Условие $\text{rank}[D, S_h D, \dots, (S_h)^{q-1} D] = n + m$ является необходимым и достаточным для qh -относительной управляемости системы (1), (2).

Теорема 4. Условие $\text{rank}(H[D, S_h D, \dots, (S_h)^{q-1} D]) = \text{rank } H$ является необходимым и достаточным а) для qh -относительной достижимости по x системы (1), (2) при $H = \begin{bmatrix} I_n & 0 \end{bmatrix}$, б) для qh -относительной достижимости по y системы (1), (2) при $H = \begin{bmatrix} 0 & I_m \end{bmatrix}$.

Как и в случае управляемости свойство qh -относительной достижимости со временем «насыщается»: если система (1), (2) не является qh -относительно достижимой при $q = n + m$, то она не будет qh -относительно управляемой и при $q > n + m$. Отсюда, вводя понятие относительной достижимости как qh -относительной достижимости хотя бы при одном натуральном числе q , получаем ранговый критерий относительной достижимости: система (1), (2) является относительно достижимой тогда и только тогда, когда выполняется ранговое условие $\text{rank}[D, S_h D, \dots, (S_h)^{n+m-1} D] = n + m$.

По аналогии с замечанием 2 можно сформулировать необходимые и достаточные условия относительной достижимости системы (1), (2) по x и по y .

ЛИТЕРАТУРА

1. Марченко, В.М. Относительная достижимость линейных стационарных систем управляемых дискретным регулятором / В.М. Марченко, О.Н. Пыжкова // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. - 2012 – № 6(153). С. 11-13.
2. Габасов, Р. Качественная теория оптимальных процессов / Р. Габасов, Ф. М. Кириллова. – М.: Наука, 1971. – 508 с.

ЛИНЕЙНЫЕ СВЯЗНОСТИ НА ТРЕХМЕРНЫХ СИММЕТРИЧЕСКИХ ПРОСТРАНСТВАХ

Пусть M – дифференцируемое многообразие, на котором транзитивно действует группа \bar{G} , (M, \bar{G}) – однородное пространство, $G = \bar{G}_x$ – стабилизатор произвольной точки $x \in M$. Проблема классификации однородных пространств (M, \bar{G}) равносильна классификации (с точностью до эквивалентности) пар групп Ли (\bar{G}, G) , где $G \leq \bar{G}$. Пусть $\bar{\mathfrak{g}}$ – алгебра Ли группы Ли \bar{G} , а \mathfrak{g} – подалгебра, соответствующая подгруппе G . Инвариантные римановы метрики g на M находятся во взаимно–однозначном соответствии с инвариантными симметрическими невырожденными билинейными формами B на G -модуле $\bar{\mathfrak{g}}/\mathfrak{g}$, т.е. каждое риманово однородное пространство (\bar{G}, M, g) , $\text{codim}_{\bar{\mathfrak{g}}}\mathfrak{g} \leq 4$ описывается тройкой $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g}, B)$. Линейной связностью на паре $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ будем называть такое отображение $L : \bar{\mathfrak{g}} \rightarrow \mathfrak{gl}(V)$, где $V = \bar{\mathfrak{g}}/\mathfrak{g}$, что его ограничение на \mathfrak{g} есть изотропное представление подалгебры, а все отображение является g -инвариантным. Хорошо известно (см., например, [1]), что инвариантные линейные связности на однородном пространстве (M, G) находятся во взаимно однозначном соответствии с линейными связностями на паре $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$. Тензор кручения имеет вид:

$$T(x_v, y_v) = L(x)y_v - L(y)x_v - [x, y]_v \text{ для всех } x, y \in \bar{\mathfrak{g}},$$

а тензор кривизны – $R(x_v, y_v) = [L(x), L(y)] - L([x, y])$. Алгеброй голономии связности на паре $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ называется подалгебра вида

$$V + [L(\bar{\mathfrak{g}}), V] + [L(\bar{\mathfrak{g}}), [L(\bar{\mathfrak{g}}), V]] + \mathbf{K}, \text{ где}$$

$$V = \{[L(x), L(y)] - L([x, y]) \mid x, y \in \bar{\mathfrak{g}}\}.$$

Симметрическое пространство – это пространство аффинной связности без кручения, тензор кривизны которого сохраняется при параллельном перенесении. Название “симметрическое” связано с одним важным геометрическим свойством таких пространств, которое может быть принято за определение: геодезическая симметрия относительно любой точки есть автоморфизм пространства, т. е. такое преобразование, при котором заданная связность переходит в себя. Риманово симметрическое пространство всегда однородно.

Теорема 1. Локально однородное симметрическое пространство, допускающее риманову метрику, т.ч. $\text{codim}_{\mathfrak{g}}\mathfrak{g} = 3$ и $\mathfrak{g}^1 \{0\}$, эквивалентно одной и только одной из следующих троек:

	Таблица умножения							B	
1.3.1		e_1	u_1	u_2	u_3			$\begin{matrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_2 \end{matrix}$	$\varepsilon_1, \varepsilon_2 = \pm 1$
	e_1	0	$-u_2$	u_1	0				
	u_1	u_2	0	0	0				
	u_2	$-u_1$	0	0	0				
	u_3	0	0	0	0				
1.3.5, 1.3.6		e_1	u_1	u_2	u_3			$\begin{matrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & \pm 1 \end{matrix}$	$a \neq 0$
	e_1	0	$-u_2$	u_1	0				
	u_1	u_2	0	$\pm e_1$	0				
	u_2	$-u_1$	$\mathbf{m}e_1$	0	0				
	u_3	0	0	0	0				
3.5.1		e_1	e_2	e_3	u_1	u_2	u_3	$\begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix}$	\pm
	e_1	0	e_3	$-e_2$	$-u_3$	0	u_1		
	e_2	$-e_3$	0	e_1	$-u_2$	u_1	0		
	e_3	e_2	$-e_1$	0	0	$-u_3$	u_2		
	u_1	u_3	u_2	0	0	0	0		
	u_2	0	$-u_1$	u_3	0	0	0		
	u_3	$-u_1$	0	$-u_2$	0	0	0		
3.5.2		e_1	e_2	e_3	u_1	u_2	u_3	$\begin{matrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a \end{matrix}$	$a \neq 0$
	e_1	0	e_3	$-e_2$	$-u_3$	0	u_1		
	e_2	$-e_3$	0	e_1	$-u_2$	u_1	0		
	e_3	e_2	$-e_1$	0	0	$-u_3$	u_2		
	u_1	u_3	u_2	0	0	e_2	e_1		
	u_2	0	$-u_1$	u_3	$-e_2$	0	e_3		
	u_3	$-u_1$	0	$-u_2$	$-e_1$	$-e_3$	0		
3.5.3		e_1	e_2	e_3	u_1	u_2	u_3	$\begin{matrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a \end{matrix}$	$a \neq 0$
	e_1	0	e_3	$-e_2$	$-u_3$	0	u_1		
	e_2	$-e_3$	0	e_1	$-u_2$	u_1	0		
	e_3	e_2	$-e_1$	0	0	$-u_3$	u_2		
	u_1	u_3	u_2	0	0	$-e_2$	$-e_1$		
	u_2	0	$-u_1$	u_3	e_2	0	$-e_3$		
	u_3	$-u_1$	0	$-u_2$	e_1	e_3	0		

Здесь e_1, e_2, e_3 – базис \mathfrak{g} , u_1, u_2, u_3 – базис, дополнительный к \mathfrak{g} в $\bar{\mathfrak{g}}$.

Кроме римановой метрики псевдориманову метрику сигнатуры (2, 1) допускают следующие однородные пространства из приведенных в теореме: 1.3.1 при $e_1 e_2 < 0$, 1.3.5, 1.3.6.

Теорема 2. Локально однородное симметрическое пространство, допускающее только псевдориманову метрику, т.ч. $\text{codim}_{\mathfrak{g}}\mathfrak{g} = 3$ и $\mathfrak{g}^1 \{0\}$, эквивалентно одной и только одной из следующих троек:

3.4.1.		e_1	e_2	e_3	u_1	u_2	u_3		
	e_1	0	e_2	$-e_3$	u_1	0	$-u_3$		
	e_2	$-e_2$	0	e_1	0	u_1	u_2		
	e_3	e_3	$-e_1$	0	u_2	u_3	0		
	u_1	$-u_1$	0	$-u_2$	0	0	0		
	u_2	0	$-u_1$	$-u_3$	0	0	0		
	u_3	u_3	$-u_2$	0	0	0	0		
								$\begin{matrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{matrix}$	\pm

3.4.2.	e_1	e_2	e_3	u_1	u_2	u_3	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>a</td></tr> <tr><td>0</td><td>-a</td><td>0</td></tr> <tr><td>a</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	0	0	a	0	-a	0	a	0	0	$a \neq 0;$
0	0	a															
0	-a	0															
a	0	0															
e_2	$-e_2$	0	e_1	0	u_1	u_2											
e_3	e_3	$-e_1$	0	u_2	u_3	0											
u_1	$-u_1$	0	$-u_2$	0	e_2	$-e_1$											
u_2	0	$-u_1$	$-u_3$	$-e_2$	0	$-e_3$											
u_3	u_3	$-u_2$	0	e_1	e_3	0											
3.4.3.	e_1	e_2	e_3	u_1	u_2	u_3	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>a</td></tr> <tr><td>0</td><td>-a</td><td>0</td></tr> <tr><td>a</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	0	0	a	0	-a	0	a	0	0	$a \neq 0;$
0	0	a															
0	-a	0															
a	0	0															
e_2	$-e_2$	0	e_1	0	u_1	u_2											
e_3	e_3	$-e_1$	0	u_2	u_3	0											
u_1	$-u_1$	0	$-u_2$	0	$-e_2$	e_1											
u_2	0	$-u_1$	$-u_3$	e_2	0	e_3											
u_3	u_3	$-u_2$	0	$-e_1$	$-e_3$	0											
2.21.1.	e_1	e_2	u_1	u_2	u_3	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>-1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	0	0	1	0	-1	0	1	0	0	\pm	
0	0	1															
0	-1	0															
1	0	0															
e_2	$-e_2$	0	0	u_1	u_2												
u_1	$-u_1$	0	0	0	0												
u_2	0	$-u_1$	0	0	0												
u_3	u_3	$-u_2$	0	0	0												
1.8.1.	e_1	u_1	u_2	u_3	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>-1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	0	0	1	0	-1	0	1	0	0	\pm		
0	0	1															
0	-1	0															
1	0	0															
e_2	0	0	u_1	u_2													
u_1	0	0	0	0													
u_2	$-u_1$	0	0	0													
u_3	$-u_2$	0	0	0													
1.8.4, 1.8.5.	e_1	u_1	u_2	u_3	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>-1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	0	0	1	0	-1	0	1	0	0	\pm		
0	0	1															
0	-1	0															
1	0	0															
e_2	0	0	0	0													
u_1	0	0	0	0													
u_2	$-u_1$	0	0	$\pm e_1$													
u_3	$-u_2$	0	$\mathbf{m}e_1$	0													
1.1.1.	e_1	u_1	u_2	u_3	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>± 1</td></tr> </table>	0	1	0	1	0	0	0	0	± 1			
0	1	0															
1	0	0															
0	0	± 1															
e_2	0	u_1	$-u_2$	0													
u_1	$-u_1$	0	0	0													
u_2	u_2	0	0	0													
u_3	0	0	0	0													
1.1.5.	e_1	u_1	u_2	u_3	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>a</td><td>0</td></tr> <tr><td>a</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>± 1</td></tr> </table>	0	a	0	a	0	0	0	0	± 1	$a \neq 0;$		
0	a	0															
a	0	0															
0	0	± 1															
e_2	0	u_1	$-u_2$	0													
u_1	$-u_1$	0	e_1	0													
u_2	u_2	$-e_1$	0	0													
u_3	0	0	0	0													
1.1.6.	e_1	u_1	u_2	u_3	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>a</td></tr> </table>	0	1	0	1	0	0	0	0	a	$a \neq 0;$		
0	1	0															
1	0	0															
0	0	a															
e_2	0	u_1	$-u_2$	0													
u_1	$-u_1$	0	u_3	0													
u_2	u_2	$-u_3$	0	0													
u_3	0	0	0	0													

Прямыми вычислениями получаем, что, например, в случаях 3.5.2 и 3.5.3 связность имеет вид

$$L(e_4) = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad L(e_5) = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{pmatrix}, \quad L(e_6) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -a & 0 & 0 \\ 0 & -a & 0 \end{pmatrix}.$$

Не нарушая общности можно считать, что $a \geq 0$. Тензор кривизны

$$\begin{aligned}
R(u_1, u_2) &= \begin{pmatrix} a^2 \mathbf{m} & 0 & \ddot{\circ} \\ \zeta & 0 & a^2 \mathbf{m} \\ \zeta & 0 & 0 \end{pmatrix}, & R(u_1, u_3) &= \begin{pmatrix} a^2 \pm 1 & 0 & 0 \\ \zeta & 0 & 0 \\ \zeta & 0 & a^2 \mathbf{m} \end{pmatrix}, \\
R(u_2, u_3) &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \zeta & -a^2 \pm 1 & 0 \\ \zeta & 0 & -a^2 \pm 1 \end{pmatrix}.
\end{aligned}$$

Тензор кручения $T(u_1, u_2) = 2au_1$, $T(u_1, u_3) = 2au_2$, $T(u_2, u_3) = 2au_3$. Алгебра голономии совпадает с трехмерным неприводимым представлением $sl(2, \mathbb{R})$ при $a^2 \neq 1$ и коммутативна в противном случае.

Аналогично рассматриваются остальные случаи.

Полученный результат позволяет в дальнейшем провести классификацию всех линейных связностей на трехмерных пространствах, методика также может быть использована для других размерностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nomizu, K. Invariant affine connections on homogeneous spaces / K. Nomizu. // Amer. Journ. Math – 1954. – Vol. 76., № 1. – P. 33–65.

УДК 62-50

И.К. Асмыкович, доц., канд. физ-мат. наук
(БГТУ, г. Минск)

О РЕГУЛЯРИЗАЦИИ И НОРМАЛИЗАЦИИ ЛИНЕЙНЫХ ДЕСКРИПТОРНЫХ СИСТЕМ

При разработке математических моделей экономических систем и технологических процессов на производстве, а также систем автоматического управления такими процессами необходимо учитывать как дифференциальные, так и алгебраические связи в виде уравнений материального баланса в экономике, либо законов Киргофа в электротехнике, либо фондообразующих и нефондообразующих отраслей в экономической системе государства. Кроме того, часто необходимо принимать во внимание и эффекты последствий. Адекватной математической моделью таких процессов являются дескрипторные динамические системы с отклоняющимся аргументом. Такие системы называют либо вырожденными, либо сингулярными [3], либо системами неразрешенными относительно производной, либо системами с обобщенным пространством состояний, либо алгебро-дифференциальными [2] либо дескрипторными [1,2], причем последнее название превалирует.

Пусть объект управления описывается обыкновенной дескрипторной системой

$$\begin{aligned} \dot{H}x(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ Hx(0) &= Hx_0 \end{aligned} \quad (1)$$

где $x(t)$ - n - вектор, $u(t)$ - r -мерный вектор управления, который предполагается достаточно гладким, H, A, B - постоянные матрицы соответствующих размеров.

К настоящему времени наиболее подробно изучены регулярные системы вида (1), т.е. системы с регулярным пучком матриц $[I \ H - A]$. Как известно [1], это означает, что матрица H квадратная и выполняется условие регулярности

$$\det[I \ H - A]^{-1} \neq 0 \text{ для некоторого } \lambda \quad (2)$$

При выполнении условия (2) система (1) имеет единственное решение при достаточно гладких управлениях $u(t)$.

При изучении задач управления линейными дескрипторными системами по принципу обратной связи практический интерес представляет собой вопрос о существовании линейного регулятора, обеспечивающего регулярность вырожденной системе.

Определение 1. Система (1) с квадратной матрицей H называется регуляризуемой пропорциональной обратной связью, если существует матрица Q , такая что система (1) замкнутая регулятором

$$u(t) = Qx(t) + Gv(t) \quad (3)$$

является регулярной.

Ясно, что если матрица H в дескрипторной системе (1) при производной невырождена, то система регулярна и может быть сведена к обыкновенной системе путем умножения на обратную матрицу.

Определение 2. Система (1) с квадратной матрицей H называется нормализуемой, если существует обратная связь по производной, т.е. матрица F , такая что матрица $[H - BF]$ - невырождена.

Для нормализуемых дескрипторных систем можно использовать все результаты по качественной теории управления обыкновенными линейными системами.

Так как проблема нормализации сводится к решению линейного матричного уравнения

$$H - BF = P, \quad \det P \neq 0 \quad (4)$$

то воспользуемся техникой решения матричных уравнений, разработанной под руководством В.Н. Букова [4], которая называется методом канонизации.

Суть этого метода заключается в разработке специальных конструкций, которые авторы называют правые и левые делители нуля, а

также канонизаторы прямоугольных матриц, позволяющие дать полную параметризацию решений различных типов матричных уравнений. В частности, все множество решений правостороннего матричного уравнения $XA = B$ с прямоугольными матрицами соответствующих размеров при выполнении условия разрешимости $B\bar{A}^R = 0$ определяется формулой с минимальной параметризацией

$$\{X\}_h = B\bar{A} + h\bar{A}^L,$$

где h - матрица соответствующего размера с произвольными элементами [4]. Такие методы решения могут быть достаточно корректно запрограммированы с помощью пакета MATLAB и использованы для синтеза реальных систем управления.

Пример Рассмотрим дискретную дескрипторную систему:

$$\begin{matrix} \mathbb{A} & 0 & 1 \\ \mathbb{C} & 0 & 1 \\ \mathbb{E} & 0 & 0 \end{matrix} \dot{x}(t+1) = \begin{matrix} \mathbb{A} & 1 & 1 \\ \mathbb{C} & 0 & 1 \\ \mathbb{E} & 0 & -1 \end{matrix} \dot{x}(t) + \begin{matrix} \mathbb{A} & 1 \\ \mathbb{C} & 0 \\ \mathbb{E} & 1 \end{matrix} \dot{u}(t). \quad (5)$$

Для нее уравнение (4) имеет вид

$$\begin{matrix} \mathbb{A} & 0 & 1 \\ \mathbb{C} & 0 & 1 \\ \mathbb{E} & 0 & 0 \end{matrix} \dot{x} - \begin{matrix} \mathbb{A} & 1 \\ \mathbb{C} & 0 \\ \mathbb{E} & 1 \end{matrix} \dot{F} = \begin{matrix} \mathbb{A} & 0 & 0 \\ \mathbb{C} & 0 & 1 \\ \mathbb{E} & 0 & 1 \end{matrix} \dot{x}$$

Запишем его в виде левостороннего матричного уравнения

$$\begin{matrix} \mathbb{A} & 0 & 1 \\ \mathbb{C} & 0 & 1 \\ \mathbb{E} & 0 & 0 \end{matrix} \dot{x} - \begin{matrix} \mathbb{A} & 0 & 0 \\ \mathbb{C} & 1 & 0 \\ \mathbb{E} & 0 & 1 \end{matrix} \dot{F} = \begin{matrix} \mathbb{A} & 0 & 1 \\ \mathbb{C} & 0 & 1 \\ \mathbb{E} & 0 & -1 \end{matrix} \dot{x} + \begin{matrix} \mathbb{A} & 1 \\ \mathbb{C} & 0 \\ \mathbb{E} & 1 \end{matrix} \dot{F}$$

Одним из решений этого уравнения будет матрица $F = \begin{matrix} \mathbb{A} & 0 & -1 \\ \mathbb{C} & 0 & 1 \end{matrix}$. Для этого уравнения левый делитель нуля $\mathbb{A}^L = \begin{matrix} \mathbb{E} & 1 & 1 & 0 \end{matrix}$ и условие разрешимости выполняется. Все множество решений матричного уравнения запишется через канонизатор матрицы и правый делитель нуля в виде $\{F\}_h = \bar{A}B + \bar{A}^R h$, а так как левый делитель матрицы при неизвестных для данного уравнения равен нулю, то его решение будет единственным. Нормализованная система имеет вид

$$x(t+1) = \begin{matrix} \mathbb{A} & 1 & 1 \\ \mathbb{C} & 0 & 1 \\ \mathbb{E} & 0 & -1 \end{matrix} \dot{x}(t) + \begin{matrix} \mathbb{A} & 1 \\ \mathbb{C} & 0 \\ \mathbb{E} & 1 \end{matrix} \dot{u}(t).$$

Следует отметить, что методика канонизации матриц может быть применена к решению задач на управление по типу обратной связи для систем с отклоняющимся аргументом как регулярных, так и

дескрипторных. Но здесь возникают большие сложности, связанные с тем, что элементы переходных матриц для таких систем представляют собой не отношение полиномов, а отношения квазиполиномов, что существенно усложняет их анализ и синтез.

Для многовходных и многовыходных дескрипторных систем удобнее при исследовании нулевой динамики использовать вторую эквивалентную форму и ее модификацию из [4]. т. е.

$$S = \begin{pmatrix} \hat{e}A_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \hat{e}0 & 0 & 0 & 0 \\ \hat{e}0 & 0 & 0 & 0 \\ \hat{e}0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \hat{A} = \begin{pmatrix} \hat{e}A_{11} & 0 & A_{13} & A_{14} \\ \hat{e}0 & I_2 & 0 & 0 \\ \hat{e}A_{31} & 0 & 0 & 0 \\ \hat{e}A_{41} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \hat{B} = \begin{pmatrix} \hat{e}B_{11} & B_{12} \\ \hat{e}B_{21} & B_{22} \\ \hat{e}I_3 & 0 \\ \hat{e}0 & 0 \end{pmatrix} \hat{u}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Асмыкович, И.К. Изучение нулевой динамики дескрипторных систем / И.К. Асмыкович. // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов»: материалы Межд. научно-технической конф / 17-18 мая. 2012 г. Минск, БГТУ, 2012 С. 247-251
2. Асмыкович, И.К. Синтез линейных регуляторов в дескрипторных системах с чистым запаздыванием / И.К. Асмыкович // Прикладная информатика и компьютерное моделирование: материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции, 9 – 12 сентября 2014 года: в 3 т. Т. 2 Уфа, УГАЭС, 2014, с.6 – 8.
3. Mehrmann, Volker Descriptor systems: A general mathematical framework for modelling, simulation and control / Mehrmann Volker, Stykel Tatjana. *Automatisierungstechnik*. 2006. 54, N 8, с. 405-415.
4. Буков, В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. – Калуга: Издательство научной литературы Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.
5. Марченко В.М. О структуре дескрипторных систем // Труды БГТУ. Серия VI. Физ.-мат. науки и информатика.- 2004, в.12, с.3-6.

О ЗАДАЧЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ДЕСКРИПТОРНЫХ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РЕГУЛЯТОРОВ ТИПА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Проблема стабилизации является одной из основных в качественной теории управления. При ее решении возникает необходимость построения регуляторов, обеспечивающих одно из важнейших свойств – устойчивость – замкнутой системы. Проблема стабилизации представляет особый интерес для исследования, так как свойство устойчивости реальных систем управления является их ключевым, весьма важным на практике свойством.

Рассмотрим дескрипторные системы с запаздывающим аргументом с точки зрения их стабилизации при воздействии регулятора, построенного по принципу обратной связи. Такие системы достаточно достоверно описывают в физически реальных переменных работу систем автоматического управления и технологические процессы.

Рассмотрим систему вида

$$\begin{aligned} S\dot{x}(t) &= Ax(t) + Ax(t-h) + bu(t), t > 0, \\ u(t) &\in R, x(t) \in R^n, S, A_i \in R^{n \times n}, i = 0, 1, \end{aligned} \quad (1)$$

при воздействии линейной обратной связи

$$\begin{aligned} u(t) &= q_0x(t) + q_1x(t-h), \\ q_0, q_1 &\in R^n. \end{aligned} \quad (2)$$

В работах [1,2] представлены достаточные условия двумерных систем в случае разрешимости относительно производной, полученные с использованием канонических форм для систем с запаздыванием, рассмотрены конструктивные алгоритмы построения регуляторов по параметрам исходной системы, не требующие знания характеристических значений.

В работе [3] исследуются также дескрипторные системы с запаздыванием при воздействии регуляторов различных типов для случая, когда исходная система оказывается неразрешимой относительно производной.

Если $\det[b, Sb] \neq 0$, то найдется такая матрица D , что преобразование $x = Dy$ упрощает исходную систему и приводит ее к следующему виду:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{e} \\ \dot{e} \\ \dot{e} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e \\ y(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11}^1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e \\ y(t-h) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ e \\ e \end{pmatrix} \dot{v}(t). \end{aligned}$$

Далее проводится исследование возможности стабилизации в зависимости от значений элементов полученных матриц. Для обеспечения асимптотической устойчивости и получения достаточных условий стабилизируемости используются условия, при которых отрицательны действительные части корней квазиполинома $1 + a + be^{-1h}$ (при выводе этих условий применен метод D -разбиений).

Утверждение. Для $Sx(t)$ -стабилизируемости системы (1) регулятором вида (2) достаточно, чтобы выполнялось условие $\det[b, Sb]^{-1} > 0$ и при этом a_{11} было отлично от нуля. В случае $\det[b, Sb]^{-1} < 0, a_{11} = 0$ систему можно стабилизировать либо если $a_{11}^1 = 0$ и точка $(-a_{12}, -a_{12}^1) \in W$, либо если $a_{11}^1 > 0$ (граница области W описывается линиями:

$$b = -a \quad \text{и} \quad \begin{cases} a + b \cos(hg) = 0, \\ g - b \sin(hg) = 0, \end{cases} \quad 0 < g < \frac{p}{h}.$$

Разработаны алгоритмы построения линейной обратной связи в виде разностных регуляторов вида (2) для обеспечения $Sx(t)$ - асимптотической устойчивости замкнутой системы. Представлены утверждения, относящиеся к стабилизируемости двумерных дескрипторных систем при любых значениях запаздывания h .

Полученные результаты дают возможность расширить класс систем, качественные свойства которых могут быть улучшены за счет применения линейной обратной связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борковская, И. М. О проблеме стабилизации дескрипторных систем с запаздыванием. // Тезисы докладов Международной конференции «Динамические системы: устойчивость, управление, оптимизация». Минск, 2008. – С.61.
2. Борковская, И. М. Построение стабилизирующих регуляторов типа обратной связи для двумерных динамических систем с запаздыванием. // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ.-2009. – Вып. XVII. С.8-10.
3. Борковская, И. М. Достаточные условия стабилизируемости дескрипторных систем с запаздыванием в двумерном случае. // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ.-2010. – Вып. XVIII. с.27-30.

Н.М. Дмитрук, канд. физ.-мат. наук;
А.И. Калинин, проф., д-р. физ.-мат. наук
(БГУ, г. Минск)

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ СО СЛАБЫМИ ВЗАИМОСВЯЗЯМИ

1. На промежутке времени $T = [t_0, t_f]$ рассмотрим взаимосвязную динамическую систему, в которой поведение i -ой подсистемы, $i \in I = \{1, 2, \dots, q\}$, описывается дифференциальным уравнением

$$\dot{x}_i = A_i(t)x_i + \mu_0 \sum_{j \in I} A_{ij}(t)x_j + b_i(t)u_i, \quad x_i(t_0) = x_{i0}. \quad (1)$$

Здесь $x_i = x_i(t) \in \mathbb{R}^{n_i}$ — состояние i -ой подсистемы в момент t ; $u_i = u_i(t) \in \mathbb{R}$ — ограниченное кусочно-непрерывное управляющее воздействие, $|u_i(t)| \leq L_i$; матричные функции $A_i(t), A_{ii}(t) \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$, $t \in T$, характеризуют собственную динамику, $b_i(t) \in \mathbb{R}^{n_i}$, $t \in T$, — входное устройство i -ой подсистемы; $A_{ij}(t) \in \mathbb{R}^{n_i \times n_j}$, $t \in T$, описывают влияние на ее поведение остальных подсистем, $j \in I \setminus i$. Считается, что все перечисленные функции принадлежат классу C^K , $K \geq 0$.

Малый положительный параметр μ_0 в (1) выражает слабую динамическую взаимосвязь между подсистемами.

Целями управления группой систем (1), $i \in I$, являются:

1) перевод в момент времени t_f на общее терминальное множество

$$x(t_f) \in S = \{x = (x_k, k \in I) : \sum_{k \in I} H_k x_k = g_0\}, \quad (2)$$

$H_k \in \mathbb{R}^{m \times n_k}$, $\text{rank } H_k = m \leq n_k$, $k \in I$, $g_0 \in \mathbb{R}^m$;

2) минимизация общего критерия качества: $\sum_{k \in I} c'_k x_k(t_f)$.

В настоящей работе рассматривается случай, когда централизованное управление системой (1), как описано в [1], невозможно ввиду невозможности использования центрального регулятора для вычислений в реальном времени и наличия запаздывания в канале обмена информацией между подсистемами. Для достижения поставленных целей будем использовать децентрализованное управление [2].

2. При децентрализованном управлении каждая i -ая подсистема имеет локальный регулятор, который в режиме реального времени вырабатывает локальное управляющее воздействие $u_i^*(t)$, $t \in T$, только для своей подсистемы. Для целей управления доступны 1) измерения текущего состояния $x_i^*(\tau)$ подсистемы i , поступающие в дискретные моменты времени $\tau \in T_h = \{t_0 + kh, k = \overline{0, N-1}\}$, $h = (t_f - t_0)/N \in I$, $N \in \mathbb{N}$; 2) состояния $x_k^*(\tau - h)$ и значения управления $u_k^*(t|\tau - h)$, $t \in [\tau - h, \tau]$, подсистем $k \in I \setminus i$, полученные в предыдущий момент времени $\tau - h$. Индексом '*' обозначены состояния и управляющие воздействия, реализующиеся в конкретном процессе управления и отличающиеся от пере-

менных модели (1) в силу присутствующих в реальном процессе неопределенностей.

Процедура инициализации алгоритма децентрализованного управления проводится, как правило, с помощью центрального регулятора, которой до начала процесса строит централизованную программу $u^0(t) = (u_k^0(t), k \in I)$, $t \in T$. На промежутке $[t_0, t_0 + h[$ на вход i -ой подсистемы подается управляющее воздействие $u_i^*(t) = u_i^d(t|t_0) = u_i^0(t)$. После момента $\tau = t_0 + h$ центральный регулятор не используется, управление передается локальным регуляторам.

В текущий момент времени $\tau \in T_h \setminus t_0$ регулятор i -ой подсистемы формирует локальную задачу оптимального управления (см. ниже) и находит ее решение $u_i^d(t|\tau)$, $t \in T(\tau) = [\tau, t_f]$. На вход i -ой подсистемы подается управляющее воздействие

$$u_i^*(t) = u_i^d(t|\tau), t \in [\tau, \tau + h[, \tau \in T_h,$$

которое называется *реализацией оптимальной децентрализованной обратной связи* в конкретном процессе.

Локальную задачу оптимального управления для i -го регулятора сформируем, следуя работе [2]:

$$P_i(\tau, \mu_0): \quad J_i^d(\tau) = \min_{u_i} \sum_{k \in I} c'_k x_k(t_f),$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= A_i(t)x_i + \mu_0 \sum_{j \in I} A_{ij}(t)x_j + b_i(t)u_i, \quad x_i(\tau) = x_i^*(\tau), \\ \dot{x}_k &= A_k(t)x_k + \mu_0 \sum_{j \in I} A_{kj}(t)x_j, \quad x_k(\tau) = \mathbf{0}, \quad k \in I \setminus i, \\ \sum_{k \in I} H_k x_k(t_f) &= g_i^d(\tau, \mu_0), \quad |u_i(t)| \leq L_i, \quad t \in T(\tau), \end{aligned} \quad (3)$$

где $g_i^d(\tau, \mu) = \Phi_i(\tau, \mu)x_i^d(\tau|\tau - h) + \int_{\tau}^{t_f} \Phi_i(t, \mu)b_i(t)u_i^d(t|\tau - h)dt$,

$$\Phi_i(t, \mu) = -\Phi_i(t, \mu)A_i(t) - \mu \sum_{j \in I} \Phi_j(t, \mu)A_{ji}(t), \quad \Phi_i(t_f, \mu) = H_i;$$

$x^d(\tau|\tau - h) = (x_k^d(\tau|\tau - h), k \in I)$, — состояние, в которое перейдет система (1), $i \in I$, в момент τ из $x(\tau - h) = x^*(\tau - h)$ под действием управления $u^*(t) = (u_k^*(t), k \in I)$, $t \in [\tau - h, \tau[$.

Задача (3) — линейная задача оптимального управления. Она может быть решена стандартными методами, однако при большом количестве подсистем, составляющих большую динамическую систему, такой подход может оказаться неэффективным и трудоемким. В настоящей работе для решения задачи (3) при малых значениях параметра μ_0 предлагается использовать асимптотические методы оптимизации возмущенных динамических систем [3]. В результате будет построена асимптотически субоптимальная программа s -го порядка [3] задачи $P_i(\tau, \mu)$, $\mu \rightarrow 0$. Положив в асимптотическом решении $\mu = \mu_0$, получим приближенное решение локальной задачи (3).

3. Асимптотически субоптимальную программу s -го порядка построим в два этапа. На первом этапе решим базовую задачу — $P_i(\tau, 0)$. На втором скорректируем решение базовой задачи, построив разложения по степеням μ определяющих элементов решения $P_i(\tau, \mu)$.

При $\mu = 0$ в (3) получим $x_k(t) \equiv 0$, $t \in T(\tau)$, $k \in I \setminus i$, поэтому базовая задача имеет вид

$$P_i(\tau, 0): \quad c'_i x_i(t_f) \rightarrow \min, \quad (4)$$

$$\dot{x}_i = A_i(t)x_i + b_i(t)u_i, \quad x_i(\tau) = x_i^*(\tau),$$

$$H_k x_k(t_f) = g_i^d(\tau, 0), \quad |u_i(t)| \leq L_i, \quad t \in T(\tau).$$

В (4) размерность оптимизируемой динамической системы значительно меньше, чем в (3). Будем считать, что базовая задача (4) имеет решение $u_i^0(t|\tau)$, $t \in T(\tau)$, которое является нормальным. Пусть $x_i^0(t|\tau)$, $t \in T(\tau)$, — оптимальная траектория (4); $\psi_i^0(t|\tau)$, $t \in T(\tau)$, — сопряженная траектория, решение сопряженного уравнения

$$\dot{\psi}_i = -A_i(t)' \psi_i, \quad \psi_i(t_f) = -c_i - H_i' v_i^0(\tau),$$

где $v_i^0(\tau)$ — оптимальный вектор множителей Лагранжа в задаче (4).

Оптимальная программа $u_i^0(t|\tau)$, $t \in T(\tau)$, характеризуется ее определяющими элементами [3]: 1) точками переключения $T_i^0(\tau) = (t_i^p(\tau), p = \overline{1, p^*})$, которые являются нулями коуправления $\Delta^0(t|\tau) = \psi_i^0(t|\tau)' b_i(t)$, $t \in T(\tau)$, и 2) вектором множителей Лагранжа $v_i^0(\tau)$:

$$u_i^0(t|\tau) = (-1)^p \alpha_i(\tau), \quad t \in [t_i^p(\tau), t_i^{p+1}(\tau)], \quad p = \overline{0, p^*} \quad (5)$$

где $\alpha_i(\tau) = L_i \text{sign} \Delta^0(\tau|\tau)$, $t_i^0(\tau) = \tau$, $t_i^{p+1}(\tau) = t_f$.

Пусть теперь $u_i^0(t, \mu|\tau)$, $t \in T(\tau)$, — оптимальная программа задачи $P_i(\tau, \mu)$. При определенных предположениях (см. [3]) и достаточно малых μ эта оптимальная программа сохраняет структуру решения (5) базовой задачи. Обозначим: $T_i(\mu|\tau) = (t_i^p(\mu|\tau), p = \overline{1, p^*})$ — точки переключения оптимальной программы $u_i^0(t, \mu|\tau)$, $t \in T(\tau)$; $v_i(\mu|\tau)$ — соответствующий вектор множителей Лагранжа.

Вектор определяющих элементов $z_i(\mu|\tau) = (T_i(\mu|\tau), v_i(\mu|\tau))$ удовлетворяет системе определяющих уравнений

$$R_i(z_i, \mu|\tau) = \left(\begin{array}{c} \sum_{k \in I} H_k x_k(t_f, T_i, \mu|\tau) - g_i^d(\tau, \mu) \\ \psi_i'(t_i^p, T_i, v_i, \mu|\tau) b_i(t_i^p), \quad p = \overline{1, p^*} \end{array} \right) = 0, \quad (6)$$

где $z_i = (T_i, v_i)$, $x_k(t, T_i, \mu|\tau)$, $k \in I$, $\psi_i(t, T_i, v_i, \mu|\tau)$, $t \in T(\tau)$, — прямая и сопряженная траектории в $P_i(\tau, \mu)$, соответствующие программе

$$u_i(t, T_i|\tau) = (-1)^p \alpha_i(\tau), \quad t \in [t_i^p, t_i^{p+1}], \quad p = \overline{0, p^*}. \quad (7)$$

Для построения асимптотически субоптимальной программы s -го порядка в задаче $P_i(\tau, \mu)$ вычислим коэффициенты $z_i^l(\tau) = (T_i^l(\tau), v_i^l(\tau))$, $l = \overline{1, s}$, разложения определяющих элементов по степеням μ : $z_i(\mu|\tau) = \sum_{l=0}^s \mu^l z_i^l(\tau) + o(\mu^s)$, где $z_i^0(\tau) = (T_i^0(\tau), v_i^0(\tau))$ — определяющие элементы решения базовой задачи (4).

Коэффициенты $z_i^l(\tau)$, $l = \overline{1, s}$, находятся последовательно из невырожденных систем линейных алгебраических уравнений

$$I_0(\tau) z_i^1(\tau) = -R_i^1(z_i^0(\tau)|\tau),$$

$$I_0(\tau) z_i^2(\tau) = -\frac{\partial R_i^1(z_i^0(\tau)|\tau)}{\partial z_i} z_i^1(\tau) - z_i^1(\tau)' \frac{\partial^2 R_i^0(z_i^0(\tau)|\tau)}{\partial z_i^2} z_i^1(\tau) - R_i^2(z_i^0(\tau)|\tau),$$

где $I_0(\tau)$ — матрица Якоби; $R_i^l(z_i|\tau)$, $l = \overline{0, s}$, — коэффициенты разложения уравнений (6) по степеням μ ;

$$R_i^l(z_i^0(\tau)|\tau) = \begin{pmatrix} \Phi_i^l(\tau)\Delta x_i(\tau) + \int_{\tau}^{t_f} \Phi_i^l(t)b_i(t)\Delta u_i(t|\tau)dt \\ -[\phi_i^l(t_i^p)'] + v_i^l\phi_i^l(t_i^p)]b_i(t_i^p), p = \overline{1, p^*} \end{pmatrix},$$

$$\Delta x_i(\tau) = x_i^*(\tau) - x_i^d(\tau|\tau - h), \Delta u_i(t|\tau) = u_i^0(t|\tau) - u_i^d(t|\tau - h).$$

Функции $\Phi_i^l(t)$, $\phi_i^l(t)$, $t \in T$, $l = \overline{0, s}$, могут быть найдены до начала процесса управления из систем дифференциальных уравнений

$$\dot{\Phi}_i^0 = -\Phi_i^0 A_i(t), \Phi_i^0(t_f) = H_i; \quad \dot{\phi}_i^0 = -A_i'(t)\phi_i^0, \phi_i^0(t_f) = c_i;$$

$$\dot{\Phi}_i^l = -\Phi_i^l A_i(t) - \sum_{j \in I} \Phi_j^{l-1}(t) A_{ji}(t), \Phi_i^l(t_f) = \mathbf{0};$$

$$\dot{\phi}_i^l = -A_i'(t)\phi_i^l - \sum_{j \in I} A_{ji}'(t)\phi_j^{l-1}(t), \phi_i^l(t_f) = \mathbf{0}, l = \overline{1, s}.$$

Функция $u_i^s(t, \mu|\tau) = u_i(t, T_i^s(\mu|\tau)|\tau)$, $t \in T(\tau)$, вычисленная по (7), с точками переключения $T_i^s(\mu|\tau) = \sum_{l=0}^s \mu^l T_i^l(\tau)$, — асимптотически субоптимальная программа порядка s в задаче $P_i(\tau, \mu)$.

В качестве приближенного решения задачи (3) возьмем $u_i^d(t|\tau) = u_i^s(t, \mu_0|\tau)$, $t \in T(\tau)$.

Утверждение. При каждом $\tau \in T_h \setminus t_0$ функция $u^d(t|\tau) = (u_k^s(t, \mu_0|\tau), k \in I)$, $t \in T(\tau)$, порождает траекторию системы (1), $i \in I$, удовлетворяющую (2) с точностью $o(\mu_0^s)$.

Работа выполнена при поддержке Белорусского Республиканского Фонда фундаментальных исследований (грант Ф14МС-005).

ЛИТЕРАТУРА

1 Габасов, Р., Кириллова Ф.М. Принципы оптимального управления // Докл. НАН Беларуси. 2004. Т. 48, № 1. С. 15–18.

2 Габасов, Р., Дмитрук, Н.М., Кириллова, Ф.М. Оптимальное децентрализованное управление группой динамических объектов // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2008. Т. 48, № 4. С. 593–609.

3 Дмитрук, Н.М. Оптимальное управление взаимосвязанными объектами // «Динамика систем и процессы управления: Труды Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Красовского». Изд-во: Ин-т матем. и механики УрО РАН им. Н.Н. Красовского, Екатеринбург. 2015. С.147-154.

Калинин А.И. Асимптотические методы оптимизации возмущенных динамических систем. Мн: УП "Экоперспектива", 2000.

АСИМПТОТИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБ УПРАВЛЕНИИ ЛИНЕЙНОЙ СИНГУЛЯРНО ВОЗМУЩЕННОЙ СИСТЕМОЙ С МИНИМАЛЬНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЗАТРАТАМИ

Численное решение задач оптимального управления предполагает неоднократное интегрирование прямой и сопряженной систем. В сингулярно возмущенных задачах эти системы являются жесткими и, как следствие, при вычислениях возникают серьезные трудности, выражающиеся в недопустимо большом времени счета и неизбежном накоплении вычислительных ошибок. Поэтому возрастает роль асимптотических методов, тем более, что при их применении происходит декомпозиция исходной задачи оптимального управления на задачи меньшей размерности.

Настоящий доклад посвящен построению асимптотических приближений в виде программы и обратной связи к решению задачи оптимизации переходного процесса в линейной сингулярно возмущенной системе. Эта задача состоит в нахождении допустимого управления с минимальными энергетическими затратами. Суть предлагаемых алгоритмов состоит в асимптотическом разложении по целым степеням малого параметра начальных значений сопряженных переменных (множителей Лагранжа) – конечномерных элементов, по которым легко восстанавливаются решение задачи. Следует отметить, что сингулярно возмущенным линейно-квадратичным задачам оптимального управления посвящено значительное число, однако в них не накладывались ограничения на правый конец траекторий.

В классе r -мерных управляющих воздействий $u(t)$, $t \in T = [t_*, t^*]$, с кусочно-непрерывными компонентами рассматривается следующая задача оптимального управления:

$$\dot{y} = A_1(t)y + A_2(t)z + B_1(t)u, \quad y(t_*) = y_*, \quad (1)$$

$$\dot{z} = A_3(t)y + A_4(t)z + B_2(t)u, \quad z(t_*) = z_*,$$

$$y(t^*) = 0, \quad z(t^*) = 0, \quad (2)$$

$$J(u) = \frac{1}{2} \int_{t_*}^{t^*} u^T P(t) u dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

где μ - малый положительный параметр, t_* , t^* - заданные моменты времени ($t_* < t^*$), y - n -вектор медленных переменных, z - m -вектор

быстрых переменных, $P(t)$ - положительно-определенная симметрическая матрица для всех $t \in T$.

Определение 1. Управление $u^{(N)}(t, \mu)$, $t \in T$, с кусочно-непрерывными компонентами назовем (программным) асимптотически субоптимальным управлением N -го порядка ($N=0, 1, 2, \mathbf{K}$), если оно переводит динамическую систему в состояние $O(\mu^{N+1})$ и отклоняется по критерию качества (3) от оптимального управления на величину того же порядка малости.

Определение 2. Вектор-функцию $u^{(N)}(y, z, t, \mu)$ назовем асимптотически субоптимальной обратной связью N -го порядка, если для любого начального состояния (y_*, z_*, t_*) , $t_* < t^*$, имеет место $u^{(N)}(y_*, z_*, t_*, \mu) = u^{(N)}(t_*, \mu)$, где $u^{(N)}(t, \mu)$, $t \in T$, - асимптотически субоптимальное управление N -го порядка в задаче (1) - (3).

Предположение 1. Матрица $A_4(t)$, $t \in T$, устойчивая, т.е. действительные части всех ее собственных значений отрицательны.

Предположение 2. Элементы всех матриц, формирующих задачу, бесконечно дифференцируемы.

Вычисления при построении асимптотически субоптимальных управлений начинаются с решения двух задач оптимального управления, называемых соответственно первой и второй базовыми. Первая базовая задача имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{y} &= A_0(t)y + B_0(t)u, \quad y(t_*) = y_*, \quad y(t^*) = 0, \\ J_1(u) &= \frac{1}{2} \int_{t_*}^{t^*} \dot{y}^T P(t) u dt \quad \text{min}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $A_0(t) = A_1(t) - A_2(t)A_4^{-1}(t)A_3(t)$, $B_0(t) = B_1(t) - A_2(t)A_4^{-1}(t)B_2(t)$. (5)

Предположение 3. Динамическая система в задаче (4) является вполне управляемой.

Вторая базовая задача является задачей с бесконечной длительностью процесса

$$\begin{aligned} \frac{dz}{ds} &= A_4(t^*)z + B_2(t^*)u, \quad z(0) = A_4^{-1}(t^*)B_2(t^*)u^0(t^*), \\ z(-\infty) &= 0, \quad J_2(u) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^0 \dot{z}^T P(t^*) u ds \quad \text{min}. \end{aligned} \quad (6)$$

Предположение 4. Выполнено условие управляемости

$$\text{rank} \left(B_2(t^*), A_4(t^*)B_2(t^*), \mathbf{K}, A_4^{m-1}(t^*)B_2(t^*) \right) = m.$$

Теорема При выполнении предположений 1–4 решению задачи (1) – (3) с достаточно малым μ соответствует в силу принципа максимума единственный вектор сопряженных переменных $(y_1^0(t, \mu), y_2^0(t, \mu))$, $t \in T$. Величины $l(\mu) = y_1^0(t^*, \mu)$, $n(\mu) = y_2^0(t^*, \mu)$, являющиеся определяющими элементами задачи (1) – (3), допускают асимптотические разложения

$$l(\mu) \sim l_0 + \overset{\circ}{a} \sum_{k=1}^{\infty} \mu^k l_k, \quad n(\mu) \sim n_0 + \overset{\circ}{a} \sum_{k=1}^{\infty} \mu^k n_k,$$

в которых $n_0 = s_0 - (A_2(t^*)A_4^{-1}(t^*))^T l_0$, а l_0, s_0 – значения сопряженных переменных на правом конце траекторий соответственно в первой и второй базовых задачах.

Доказательство теоремы является конструктивным и предопределяет дальнейшие вычисления при построении асимптотически субоптимальных управлений.

Асимптотически субоптимальное управление N -го порядка ($N \geq 1$) имеет вид

$$u^{(N)}(t, \mu) = P^{-1}(t) \left(B_1^T(t) y_1(t, l^{(N)}(\mu), n^{(N)}(\mu), \mu) + \right. \\ \left. + B_2^T(t) y_2(t, l^{(N)}(\mu), n^{(N)}(\mu), \mu) \right), \quad (7)$$

где $y_1(t, l^{(N)}(\mu), n^{(N)}(\mu), \mu)$, $y_2(t, l^{(N)}(\mu), n^{(N)}(\mu), \mu)$ – решения сопряженной системы

$$\dot{y}_1 = -A_1^T(t) y_1 - A_3^T(t) y_2, \quad \dot{y}_2 = -A_2^T(t) y_1 - A_4^T(t) y_2 \quad (8)$$

с начальными условиями

$$y_1(t^*) = \overset{\circ}{a} \sum_{k=0}^N \mu^k l_k, \quad y_2(t^*) = \overset{\circ}{a} \sum_{k=0}^N \mu^k n_k.$$

сопряженная система (7) является сингулярно возмущенной и, следовательно, жесткой. Интегрирования жесткой системы можно избежать, заменив в (7) вектор-функции $y_i(t, l, n, \mu)$, $i = 1, 2$, их асимптотическими приближениями

$$y_i^{(N)}(t, l, n, \mu) = \overset{\circ}{a} \sum_{k=0}^N \mu^k (y_{ik}(t, l, n) + \Pi_k y_i(s, l, n)), \\ s = (t - t^*) / \mu, \quad t \in T, \quad i = 1, 2.$$

Вектор-функция

$$\bar{u}^{(N)}(t, \mathbf{m}) = P^{-1}(t) \left(B_1^T(t) y_1^{(N)}(t, l^{(N)}(\mathbf{m}), n^{(N)}(\mathbf{m}), \mathbf{m}) + \right. \\ \left. + B_2^T(t) y_2^{(N)}(t, l^{(N)}(\mathbf{m}), n^{(N)}(\mathbf{m}), \mathbf{m}) \right), t \in T,$$

наряду с (7) будет асимптотически субоптимальным управлением N -го порядка в задаче (1) – (3).

В частности асимптотически субоптимальное управление нулевого порядка имеет вид

$$\bar{u}^{(0)}(t, \mathbf{m}) = u^0(t) + u^* \left((t - t^*) / \mu \right), t \in T, \quad (9)$$

где $u^0(t)$, $t \in T$, $u^*(s)$, $s \in [0, \infty)$, – решения соответственно первой и второй базовых задач. Заметим, что управление (9) не зависит от начального состояния z^* вектора быстрых переменных и при малых μ будет существенно отличаться от решения $u^0(t)$, $t \in T$, первой базовой задачи лишь в пограничном слое, т.е. в некоторой левосторонней окрестности точки t^* .

Вектор-функция

$$u^{(0)}(y, z, t, \mathbf{m}) = -P^{-1}(t) \left(B_0^T(t) F_0^T(t) + \right. \\ \left. + B_2^T(t) G^T \left((t - t^*) / \mu \right) C_0 \right) C_1^{-1}(t) F_0(t) y$$

представляет собой асимптотически субоптимальную обратную связь нулевого порядка в исходной задаче. Здесь $F_0(t)$, $t \in T$, – $(n \times n)$ -матричная функция, являющаяся решением начальной задачи

$$\dot{F}_0 = -F_0 A_0(t), F_0(t^*) = E_n,$$

$G(s)$, $s \in [0, \infty)$, – $(m \times m)$ -матричная функция, удовлетворяющая дифференциальному уравнению

$$\frac{dG}{ds} = -GA_4(t^*), G(0) = E_m,$$

$$C_1 = \int_{t^*}^{t^*} F_0(t) P^{-1}(t) F_0^T(t) dt, C_0 = C_3^{-1} A_4^{-1}(t^*) B_2(t^*) P^{-1}(t^*) B_0^T(t^*),$$

$$C_3 = \int_{-\infty}^0 \left(\Pi \Phi(s) P^{-1}(t^*) \Pi \Phi^T(s) \right) ds, \Pi \Phi(s) = G(s) B_2(t^*).$$

Отметим, что построенная обратная связь не зависит от текущей позиции вектора быстрых переменных z .

МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОДНОЙ ДВУМЕРНОЙ СИСТЕМОЙ ЗАПАЗДЫВАЮЩЕГО ТИПА

Рассмотрим двумерную линейную стационарную систему с запаздывающим аргументом с одним входом и двумя соизмеримыми запаздываниями вида

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t-h) \\ x_2(t-h) \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} c_{12} & c_{22} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t-2h) \\ x_2(t-2h) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ e_1 \end{pmatrix} u(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $h > 0$ – постоянное запаздывание. Предполагается, что выполнено условие $c_{12} \neq 0$. В этом случае равенство нулю элемента c_{11} не ограничивает общность системы (1).

Характеристический квазиполином системы (1) имеет вид

$$\sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^{4-2i} a_{ij} \lambda^i e^{-j\lambda h},$$

где $a_{ij} \in \mathbb{R}$ – числа, зависящие от коэффициентов системы (1), $a_{20} = 1$. Задача модального управления состоит в том, чтобы для любых наперед заданных чисел b_{ij} , где $i = 0, 1, 2, j = 0, \dots, 4-2i$, $b_{20} = 1$, найти такой линейный регулятор, что система (1), замкнутая этим регулятором, имеет характеристический квазиполином вида

$$\sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^{4-2i} b_{ij} \lambda^i e^{-j\lambda h}.$$

Регулятор будем искать в форме

$$u(t) = q_0 x(t) + \sum_{i=0}^L \sum_{j=1}^N q_{ij} x^{(i)}(t-jh) + \int_{-h}^0 q(s) x(t+s) ds, \quad (2)$$

где $q_{ij} \in \mathbb{R}$, штрих $(\cdot)^{\mathcal{C}}$ означает транспонирование, $L, N \in \mathbb{N}$,

$$x(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}^{\mathcal{C}}, x^{(i)}(\cdot) = \frac{d^i x(\cdot)}{dt^i}, x^{(0)}(\cdot) = x(\cdot).$$

Имеет место следующая

Теорема. Для того, чтобы система (1) в случае $c_{12} \neq 0, b_{11} \neq 0$ была модально управляема регулятором вида (2), необходимо и достаточно, чтобы было выполнено условие

$$d(x_i) \neq 0, i = 1, 2,$$

где $d(x_i) = a_{11} + b_{11}e^{-x_i h} - x_i, i = 1, 2$. При этом регулятор, решающий задачу модального управления имеет вид:

$$u(x_1, x_2) = \begin{bmatrix} -a_{21} & -a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -b_{21} & -b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t-h) \\ \dot{x}_2(t-h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c_{21} & -c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t-2h) \\ \dot{x}_2(t-2h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_1(x) & q_2(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{c_{12}}{b_{11}}m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix}$$

где $q_1(x), q_2(x)$ – компоненты регулятора, решающего задачу модального управления для следующей системы нейтрального типа:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & \frac{b_{11}b_{12} - a_{11}c_{12}}{b_{11}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t-h) \\ y_2(t-h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{c_{12}}{b_{11}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t-h) \\ \dot{x}_2(t-h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_1(t).$$

Эти компоненты были получены в работе [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Якименко, А. А. Управление динамическими системами с запаздывающим аргументом нейтрального типа воздействием линейной обратной связи: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.01.02 / А. А. Якименко. – Минск, 2008. – 113 с.

УДК 532.517; 621.928

А. М. Волк, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

К РАСЧЕТУ ПЛЕНОЧНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСПЫЛИТЕЛЯ

Пленочные распылители находят широкое применение в технических устройствах, применяемых для тепломассопереноса, сушки, орошения, нанесения красок [1].

При расчете режимов работы данных устройств важное значение имеет режим движения пленки жидкости.

Рассмотрим стационарное осесимметричное ламинарное движение пленки вязкой жидкости по внутренней стенке вертикального ко-

нуса, вращающегося с постоянной угловой скоростью ω . Ось z цилиндрической системы координат направим вверх по оси конуса (рисунок). При малых углах β наклона образующей конуса к его оси элементарные участки поверхности рассматриваем как цилиндры.

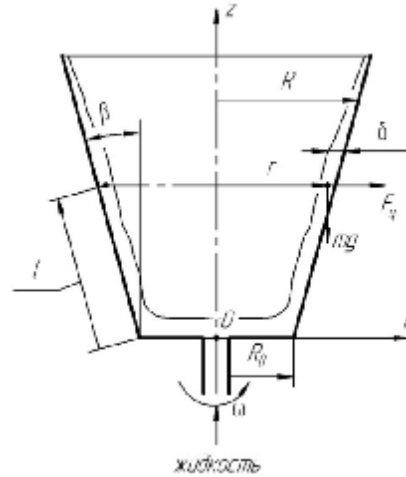


Рисунок 1 – Схема течения вязкой жидкости

Рассмотрим автомодельное решение $U = U(r)$ уравнений Навье-Стокса. В этом случае уравнения для касательной и продольной составляющих скорости принимают вид [2]:

$$m \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_j) \right) = 0, \quad (1)$$

$$m \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_l}{dr} \right) - r (a_l - g_l) = 0. \quad (2)$$

Из внешних действующих сил рассматриваем проекции на образующую конуса центробежной силы и силы тяжести, которые обуславливаются центробежным ускорением и ускорением свободного падения:

$$a_l = a_r \sin \beta; \quad g_l = g \cos \beta$$

Считаем, что выполняется условие прилипания на стенке цилиндра и отсутствуют касательные напряжения на границе раздела фаз:

$$U_j \Big|_{r=R} = \omega R; \quad U_z \Big|_{r=R} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{dU_j}{dr} \Big|_{r=R-d} = 0; \quad \frac{dU_l}{dr} \Big|_{r=R-d} = 0. \quad (4)$$

Находим общие решения уравнений (1) и (2)

$$U_j = c_1 r + \frac{c_2}{r}, \quad (5)$$

$$U_i = c_3 \ln r + \frac{a_i - g_i}{4n} r^2 + c_4. \quad (6)$$

Определяем произвольные постоянные из граничных условий (3), (4) и получим распределения касательной и осевой составляющих скорости:

$$U_j(r) = \frac{wR^2}{R^2 + (R-d)^2} \frac{a}{e} r + \frac{(R-d)^2}{r} \frac{\ddot{u}}{\varnothing} \quad (7)$$

$$U_i(r) = \frac{a_i - g_i}{4n} \frac{e}{e} r^2 - R^2 - 2(R-d)^2 \ln \frac{r}{R} \frac{\ddot{u}}{R} \quad (8)$$

Для дальнейшего анализа перейдем к безразмерным переменным $\frac{r}{R} = \rho$, $\frac{d}{R} = \delta$, найдем средние значения составляющих скорости, разложим полученные зависимости (5), (6) в ряд по степеням δ и получим:

$$\begin{aligned} \bar{U}_j = wR \frac{e}{e} + \frac{a}{e} \frac{\delta}{e} - \frac{\delta^2}{2} \frac{\ddot{u}}{\varnothing} + \frac{a}{e} \frac{\delta^2}{e} - \frac{\delta^2}{2} \frac{\ddot{u}}{\varnothing} + L \frac{\ddot{u}}{R} \\ \cdot \frac{a}{e} \frac{\delta^3}{e} + \frac{\delta^3}{6} + \frac{\delta^3}{4!} + L + \frac{(k-2)! \delta^3}{(k+1)!} L \frac{\ddot{u}}{\varnothing} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\bar{U}_i = \frac{(a_i - g_i) d^2}{6n} \frac{e}{e} - \frac{3\delta^3}{4} + \frac{18 \times 2! \delta^3}{5!} + L + \frac{18k! \delta^3}{(k+3)!} L \frac{\ddot{u}}{\varnothing} \quad (10)$$

Относительная толщина пленки δ величина достаточно малая по сравнению с 1, поэтому для дальнейшего анализа можем ограничиться первыми слагаемыми разложения (9) и (10). В данном случае получаем:

$$\bar{U}_j = wR, \quad \bar{U}_i = \frac{(a_i - g_i) d^2}{6n}. \quad (11)$$

Зависимость (11) показывает, что средняя скорость касательной составляющей скорости пленки равна соответствующей скорости конической поверхности. В данном случае центростремительное ускорение в пленке можно принять равным

$$a_r = \frac{\bar{U}_j^2}{R} = w^2 R.$$

Отсюда получаем среднюю скорость пленки по направляющей цилиндрической поверхности

$$\bar{U}_i = \frac{(w^2 R \sin b - g \cos b) d^2}{6n}.$$

При заданном расходе Q жидкости рассчитываем ее удельный расход на единицу периметра конуса

$$q = \frac{Q}{2\pi R}.$$

Тогда из соотношения

$$q = \bar{U}_l d = \frac{(w^2 R \sin b - g \cos b) d^3}{6\eta}$$

получаем расчетную величину для толщины пленки жидкости

$$d = \sqrt[3]{\frac{6q\eta}{w^2 R \sin b - g \cos b}}.$$

Восходящее течение пленки по конической поверхности будет наблюдаться при выполнении условия

$$w^2 R \sin b - g \cos b > 0.$$

Откуда получаем соотношение

$$\frac{w^2 R}{g} > \operatorname{ctg} b.$$

Полученные зависимости соответствуют физическим законам вращательного движения, позволяют оценить геометрические и гидродинамические характеристики пленочного течения, как по внутренней поверхности конуса, так и на выходе из распылителя в зависимости от исходных данных, получить режимы пленочного движения.

Обозначения: r, j, z – цилиндрические координаты; w – угловая скорость вращения конуса; U_z и U_j – осевая и касательная составляющие скорости жидкости; \mathcal{R} – безразмерная радиальная координата; d, \mathcal{d} – толщина и безразмерная толщина пленки жидкости; R – радиус конуса; R_0 – радиус основания конуса; l – длина образующей конуса; Γ – плотность жидкости; m – масса жидкости; b – угол наклона образующей конуса к его оси; \mathfrak{m} – коэффициент динамической вязкости жидкости; η – коэффициент кинематической вязкости жидкости; Q – объемный расход жидкости; q – объемный расход жидкости, отнесенный к единице длины периметра конуса; g – ускорение свободного падения; c_1, c_2, c_3, c_4 – константы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 784 с.
2. Уоллис Г. Б. Одномерные двухфазные течения. – М.: Мир, 1972. – 440 с.

**О НЕКОТОРЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ ФУНКЦИИ,
СВЯЗАННОЙ С ФУНКЦИЕЙ БЕССЕЛЯ ТРЕТЬЕГО РОДА
МНОГО ПАРАМЕТРА**

Функция

$$K_n(z) = \frac{P}{2 \sin(\pi p)} \left(I_{-n}(z) - I_n(z) \right) \quad (1)$$

называется модифицированной функцией Бесселя третьего рода или функцией Макдональда, где

$$I_n(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{\Gamma(k+n+1)k!} \frac{x^{2k+n}}{2^k} \quad (2)$$

модифицированная функция Бесселя первого рода [1]. Известно, что функция $K_{it}(x)$ имеет представление

$$K_{it}(x) = \int_0^{\infty} e^{-x \operatorname{ch} u} \cos(tu) du. \quad (3)$$

В работе изучаются свойства функции, определённой следующим несобственным интегралом при $x > 0$

$$K(t, x) = \int_0^{\infty} e^{-x \operatorname{ch} u} \sin(tu) du. \quad (4)$$

Учитывая, что $K(-t, x) = -K(t, x)$, будем полагать $t > 0$.

Функции (3), (4) возникают в связи с исследованием некоторых классов индексных интегралов [2, 3] и преобразований по индексу [3,4]. Так, например, функция (3) является ядром преобразования Конторовича – Лебедева, простейшего в классе преобразований по индексу. Кроме того, установлено [3], что все известные в литературе преобразования по индексу композиционно связаны с преобразованием Конторовича – Лебедева в силу универсальной структуры их ядер.

1. Интегральное представление через контурные интегралы Меллина – Барнса.

Теорема. Справедливо следующее представление

$$K(t, x) = \frac{e^{-x} \operatorname{sh}(pt)}{2p^{3/2}i} \int_{g-i\infty}^{g+i\infty} \Gamma\left(s+it, s-it, s, 1-s\right) (2x)^{-s} ds, \quad (5)$$

где $0 < g < 1/2$.

Доказательство. Осуществляя в (4) замену $t = \operatorname{sh}^2(u/2)$, имеем

$$K(t, x) = e^{-x} \int_0^{\infty} e^{-2x \operatorname{sh}^2 \frac{u}{2}} \sin t u du =$$

$$= \frac{e^{-x}}{2i} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2xt}}{\sqrt{t}} \left(\frac{(\sqrt{t+1} + \sqrt{t})^{2it}}{\sqrt{t+1}} - \frac{(\sqrt{t+1} - \sqrt{t})^{2it}}{\sqrt{t+1}} \right) dt.$$

Выражение в скобках в последнем интеграле представим как обратное преобразование Меллина произведения гамма – функций Эйлера, согласно формуле (8.4.2.13) из [2]. Получим

$$K(t, x) = \frac{e^{-x}}{2i} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2xt}}{\sqrt{t}} \frac{1}{2\rho^{\frac{3}{2}i}} dt,$$

$$= \int_L \Gamma(s, s + \frac{1}{2}) \Gamma(\frac{1}{2} - it - s) \Gamma(\frac{1}{2} + it - s) t^{-s} ds dt, \quad 0 < \operatorname{Re} s < \frac{1}{2}.$$

Контур L выбран так, чтобы он отделял левую серию полюсов подынтегрального выражения от правых. Используя формулу дополнения для гамма – функции Эйлера

$$\Gamma(\frac{1}{2}) + z \Gamma(\frac{1}{2} - z) = \frac{\rho}{\cos(\rho z)},$$

вычислим выражение в скобках

$$\frac{\Gamma(\frac{1}{2} - it - s)}{\Gamma(\frac{1}{2} - it + s)} - \frac{\Gamma(\frac{1}{2} + it - s)}{\Gamma(\frac{1}{2} + it + s)} = \frac{\rho}{\cos \rho(s + it)} - \frac{\rho}{\cos \rho(s - it)} =$$

$$= \frac{2\rho \sin \rho it \sin \rho s}{\cos \rho(s + it) \cos \rho(s - it)} = 2i \operatorname{sh} \rho t \frac{\Gamma(\frac{1}{2} - it - s) \Gamma(\frac{1}{2} + it - s)}{\Gamma(s) \Gamma(1 - s)}.$$

Далее, поменяв порядок интегрирования в последнем интеграле и вычислив внутренний интеграл, получим (5).

2. Связь с функцией Макдональда посредством преобразований типа Гильберта [5].

Теорема 2. Справедливы представления:

$$K(t, x) = \frac{e^{-x} \operatorname{th} \rho t}{\rho} \int_0^{\infty} \frac{e^{-y} K_{it}(y)}{y - x} dy, \quad (6)$$

$$K(t, x) = \frac{e^{-x} \operatorname{sh} \rho t}{\rho} \int_0^{\infty} \frac{e^{-y} K_{it}(y)}{y + x} dy. \quad (7)$$

Доказательство. С учетом формул (8.4.23.5) и (8.4.2.6) [2] приведем (5) к следующему виду:

$$K(t, x) = \frac{e^{-x} \operatorname{sh} pt}{2p^{1/2} i} \oint_L \frac{\Gamma(s) \Gamma(1-s)}{\Gamma(1/2+s) \Gamma(1/2-s)} \frac{2\sqrt{p}}{\operatorname{ch} pt} \int_0^\infty e^{-y} K_{it}(y) (2y)^{s-1} dy (2x)^{-s} ds =$$

$$e^{-x} \operatorname{th} pt \int_0^\infty e^{-y} K_{it}(y) \frac{dy}{y} \frac{1}{2pi} \oint_L \frac{\Gamma(s) \Gamma(1-s)}{\Gamma(1/2+s) \Gamma(1/2-s)} \frac{2\sqrt{p}}{\operatorname{ch} pt} \frac{dx}{x} ds dy =$$

$$\frac{e^{-x} \operatorname{th} pt}{p} \int_0^\infty e^{-y} K_{it}(y) \frac{dy}{y(1-x/y)}.$$

Контур $L = (g - i\epsilon, g + i\epsilon)$, $0 < g = \operatorname{Re} s < 1/2$, выбран так, чтобы он отделял левую серию полюсов подынтегрального выражения от правых. Откуда и следует (6). Формула (7) доказывается аналогично, применяя (8.4.23.3) и (8.4.2.5) [2].

3. Представление в виде линейных комбинаций функций гипергеометрического типа.

Применяя формулу (8.4.51.10) [2] (теорему Слейтер) к (5) и свойства гамма – функции, получим представление функции (4) через функции гипергеометрического типа

$$K(t, x) = \frac{e^{-x}}{t} {}_2F_2\left(\frac{1}{2}, 1; 1 - it, 1 + it; 2x\right) - \frac{p}{2 \operatorname{sh} pt} \left[I_{it}(x) + I_{-it}(x) \right],$$

где ${}_2F_2$ – гипергеометрическая функция, определённая рядом

$${}_2F_2\left(\frac{1}{2}, 1; 1 - it, 1 + it; 2x\right) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(1/2)_k}{(1 - it)_k (1 + it)_k} (2x)^k,$$

и $I_{it}(x)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода (2).

Полученные представления оказываются весьма эффективными при изучении свойств функции (4) и преобразований по индексу с этой функцией в ядре [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бейтмен, Г. Высшие трансцендентные функции: в 3 т. / Г. Бейтмен, А. Эрдейи. – М.: Наука, 1965–1967. – Т. 2: Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены. – 1966. – 295 с.
2. Прудников, А. П. Интегралы и ряды: в 3 т. / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. – М.: Наука, 1981–1986. – Т. 3: Дополнительные главы. – 1986. – 800 с.
3. Yakubovich, S. B. Index transforms / S. B. Yakubovich. – Singapore: World Scientific Publishing Company, 1996. – 252 p.
4. Yakubovich, S. B. On the non-convolution transformation with the Macdonald type kernel function / S. B. Yakubovich, L. D. Gusarevich (Yarotzkaya) // Fractional Calculus and Applied Analysis. – 1998. – Vol. 1, № 3. – P. 297–309.
5. Титчмарш, Е. Введение в теорию интегралов Фурье / Е. Титчмарш. – М.; Л.: Гостехиздат, 1948. – 334 с.

В.В. Игнатенко, доц., канд. физ.-мат. наук
(БГТУ, г. Минск),

В.В. Крахотко, доц., канд. физ.-мат. наук,

Г.П. Размыслович, доц., канд. физ.-мат. наук,
(БГУ, г. Минск)

К УПРАВЛЯЕМОСТИ ДИСКРЕТНЫХ ДЕСКРИПТОРНЫХ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Рассмотрим дискретную систему с запаздыванием по состоянию

$$A_0 x(t+1) = Ax(t-h) + Bu(t), t = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

с начальными условиями

$$x(\lambda) = \{x(t) = q_t, t = -h, -h+1, \dots, 0\}, \quad (2)$$

где $x - n$ – вектор, $u - r$ – вектор (управление), A_0, A, B – постоянные матрицы соответствующих размеров, $h (h > 1)$ – натуральное число (запаздывание), $q_t = \overline{-h, 0}$ – заданный n – вектор.

При $\det A_0 \neq 0$ система (1), (2) исследовалась в работе [1]. Поэтому будем считать, что $\det A_0 = 0$ и пучок матриц $\lambda A_0 - A$ является регулярным т.е. найдется $\lambda \in \mathbb{C}$ что, $\det (\lambda A_0 - A) \neq 0$. В силу этого, без ограничения общности, можно считать, что для матриц системы (1) выполняются условия $A_0 A = A A_0, \ker A_0 \perp \ker A = \{0\}$.

Определение 1. Систему (1) назовем условно управляемой, если для любых начального условия $x_0 \in \mathbb{R}^n$ и $c \in \mathbb{R}^n$ существуют момент времени $t_1 > (k_0 - 1)h$ и

Управление $u(t), t = (k_0 - 1)h + 1, (k_0 - 1)h + 2, \dots < t_1 + (k_0 - 1)h$ такие, что решение системы удовлетворяет условию $x(t_1) = c$.

Определение 2. Систему (1) назовем управляемой из нуля, если для любых $x_0, c \in \mathbb{R}^n$ существуют момент времени $t_1 < +\infty$ и управление $u(t), t = 0, 1, \dots, t_1 + (k_0 - 1)h$ такие, что решение системы удовлетворяет условиям $x(t) = 0$ для $t = -h$ и $x(t_1) = c$.

Здесь W множество допустимых начальных состояний системы (1), X_s^1, X_j^2 – решения соответствующих определяющих уравнений.

Теорема 1. Для условной управляемости системы (1) необходимо и достаточно, чтобы

$$\text{rank} \{X_s^1, s = 1, 2, \dots, d_{t_1} - d_{k_0 h + 1}; X_j^2, j = 0, 1, \dots, k_0 - 1\} = n.$$

Теорема 2. Система (1) управляема из нуля тогда и только тогда, когда выполняются условия

$$\text{rank} \{X_j^2, j = 0, 1, \dots, k_0 - 1\} = \text{rank} \{X_j^2, j = 0, 1, \dots, k_0 - 1; X_h^0\},$$

$$\text{rank} \{X_s^1, s = 1, 2, \dots, d_{t_1} - d_{k_0 h + 1}; X_j^2, j = 0, 1, \dots, k_0 - 1\} = n.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Габасов Р.Ф., Кириллова Ф.М., Крахотко В.В., Минюк С.А. // Диф. уравнения. 1972, Т.8, №5,6,7. С.767,1081,1283.

СЕКЦИЯ № 4
УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫМИ РЕСУРСАМИ

Председатель – д-р техн. наук, профессор
Урбанович Павел Павлович
Секретарь – канд. техн. наук, доцент
Бракович Андрей Игоревич

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ БЕЗОПАСНЫХ SaaS-СИСТЕМ

Контроль и управление облачными системами являются проблемой безопасности. Гарантий, что все ресурсы облака посчитаны и в нем нет неконтролируемых виртуальных машин, не запущено сторонних процессов и не нарушена конфигурация элементов облака, нет. Наиболее уязвимыми в облачной инфраструктуре являются SaaS-системы. В этом случае приложение запускается на платформе облачных вычислений и доступно через веб-браузер. Пользователь услуг не имеет возможности управлять сетью, серверами, операционными системами, хранилищем данных и некоторыми возможностями предоставляемой системы. Выбор средств и механизмов защиты полностью лежит на облачном провайдере.

Первоочередной проблемой, которая должна решаться при проектировании систем такого типа — безопасное хранение данных пользователей. Другими словами, несколько заказчиков, которые записывают и считывают информацию из одной базы данных, должны ничего не знать друг о друге.

Существует два метода для решения описанной проблемы. Первое решение, состоит в том, чтобы разделить данные разных заказчиков и хранить их в разных базах данных — мультиарендность. Мультиарендность сопоставляется с архитектурой из множественных экземпляров, в которой приложения работают одновременно с несколькими конфигурациями и наборами данных нескольких организаций, а каждая организация-клиент работает со своим экземпляром виртуального приложения, видя только свою конфигурацию и свой набор данных [1].

Второй вариант — хранить данные всех клиентов в одной базе данных в общих таблицах. Для реализации такого варианта необходимым условием будет введение дополнительного поля TenantID для разделения информации между заказчиками. К преимуществу этого подхода стоит отнести небольшую стоимость на разработку схемы базы данных и ее поддержку, а также простой способ добавления новых клиентов [2]. К недостаткам схеме можно отнести отсутствие гибкости, проблемы с резервным копированием и восстановлением данных.

При выборе решения для планирования архитектуры SaaS-систем необходимо отдавать предпочтение первому варианту: он обладает большей надежностью и гибкостью за счет простой расширяемости, масштабируемости и индивидуальности [3]. Несмотря на

высокую цену, такое решение является приемлемым для клиентов, главной целью которых является безопасность (например, банки).

С другой стороны, реализация мультиарендной архитектуры не позволяет обезопасить пользователя от таких типов угроз, как подмена идентификаторов, утечка информации или несанкционированное получение прав.

Для комплексного решения описанных проблем разработана новая концепция создания безопасных SaaS-систем, основанная на применении мультиарендной архитектуры с поддержкой версионности баз данных, механизмом безопасной передачи информации между приложением-арендодателем и приложений-арендатором, а также управление доступом на основе токенов, ролей и привилегий (рисунок 1).



Рисунок 1 – схема концепции создания безопасных SaaS-приложений

В представленной концепции мультиарендность позволяет для каждого клиента создавать отдельные виртуальные копии программного обеспечения, что дает возможность изолированно обслуживать пользователей из разных организаций (независимых подписчиков SaaS) в рамках одного сервиса (одной инсталляции или развертывания) [1].

Данные всех клиентов сохраняются в реляционной БД с поддержкой технологий внутреннего шифрования. Функция прозрачного шифрования выполняет в реальном времени шифрование и дешифрование файлов данных и журналов в операциях ввода-вывода. При шифровании используется специальный симметричный ключ, защищенный сертификатом, который хранится в загрузочной записи базы. Примером СУБД, которая реализует описанный механизм защиты информации является MS SQL Server [4].

Услуги облачных вычислений предполагают самообслуживание, что может создать путаницу в управлении обновлениями [2]. Для предотвращения этого процесса используются механизмы для работы с базами данных различных версий в зависимости от версии используемого виртуального приложения. В случае выпуска пакета обновлений, меняющего структурную схему базы данных (добавление, изменение, удаление таблиц, колонок или иные операции), администратор сам решает, стоит ли делать обновление текущего состояния базы данных до новой версии.

При передаче информации между составными частями SaaS-систем всегда есть вероятность появления ситуации, когда атакующий способен читать и видоизменять сообщения, которыми обмениваются участники системы, причем ни один из последних не может догадаться о его присутствии в канале. Для защиты от данного типа атаки разработан алгоритм обмена информацией, основанный на криптографическом протоколе Диффи-Хеллмана и алгоритме шифрования RSA (рисунок 2).



Рисунок 2 – Схема передачи информации в SaaS-системах

В случае успешной верификации токена доступа пользователю передается строка подключения к базе данных в зашифрованном виде. Для получения доступа к модулям программного обеспечения необходимо использовать механизм разграничения прав на основе привилегий и ролей. Он имеет свои особенности в виде динамической связи ролей и наборов привилегий и возможности привязки пользователя сразу к нескольким ролям. Такой подход позволяет гибко настраивать права доступа для выбранного пользователя, создавать множество ролей с разными наборами привилегий.

Если в рамках функционирования системы необходимо сохранять какую-либо информацию не в базе данных, а в облачном хранилище, предоставляемым провайдером, то эти данные шифруются с помощью поточного шифра (например, RC4 или SEAL). Таким образом, в случае хищения файлов, злоумышленники не смогут их прочитать.

Разработанная концепция создания безопасных SaaS-приложений универсальна и может быть использована при реализации облачных систем различной тематической направленности. Ее реализация возможна на многих языках веб-программирования, таких как с#, Java EE, Python или PHP. Особенности разработанной концепции являются использование мультиарендной архитектуры, позволяющая виртуальным копиям приложений работать независимо друг от друга, механизмов управления экземплярами приложений, версиями баз данных, алгоритмом безопасной передачи информации по незащищенным каналам связи, системой разграничения прав доступа, основанной на динамической связи ролей и привилегий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гладкий, М.В. Безопасность приложений на платформах облачных вычислений / М.В. Гладкий // Информационные технологии: тезисы 79-й науч.-техн. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 2-6 февраля 2015 г. – Минск: БГТУ, 2015. – 73с.

2. Шаньгин В. Ф. Защита информации в сети – анализ технологий и синтез решений / В.Ф. Шаньгин, С.Д. Рябко, А.В. Галицкий. – Москва: ДМК Пресс, 2004. – С. 614–616.

3. Риз, Д. Облачные вычисления. / Д. Риз. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. – С. 280–288.

Александров, А. Как предотвратить вторжение: второй уровень защиты. / А. Александров. – Москва: ВУТЕ, 2003. – 36с.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КЛАССА МКМД**

Традиционно к вычислительным системам класса Multiple Instruction Multiple Date (MIMD) или «множественный поток команд – множественный поток данных» (МКМД) относят мультипроцессорные и мультимикрокомпьютерные системы, например, архитектуры UMA, NUMA, COMA, NORMA, MPP, NOV и др. [1]. Кроме таких «суперсистем», к классу МКМД относятся специализированные вычислительные системы, обрабатывающие информацию по параллельным ветвям (множественный поток данных), реализующим вычислительный процесс по конвейерному принципу (множественный поток команд). К таким системам, отличающимся, как и их структурные компоненты, нетрадиционной архитектурой, относятся системы моделирования, управления технологическими процессами и системами, системы обработки информации и т.п. Многообразие возможных вариантов реализации таких систем (даже в случае простых математических моделей – до полутора десятка аргументов – это десятки и сотни тысяч) обуславливает необходимость автоматизации процесса их проектирования ввиду значительных временных затрат на синтез и анализ вариантов и невозможности учета всех возможных альтернатив и, как следствие, высокой вероятности игнорирования перспективных решений [2].

Анализ состояния в области автоматизации проектирования сложных технических систем показывает, что известные САПР, применение которых возможно при решении задач автоматизации проектирования средств вычислительной техники, предназначены, в первую очередь, для решения инженерно-конструкторских и технологических задач, таких как проектирование принципиальных схем по готовым функциональным схемам (для сложных задач используются САПР OrCAD (PspiceA/D) и SPECCTRA, P-CAD 2000-200X (ACELEDA) и AltiumDesigner (Protel), eProductDesigner, PowerPCB, CAM 350, Viewlogik (Analog), BETAsoft, MATLAB+Simulink и т. д.), проектирование печатных плат (программа PeakFPGA компании Altium, модуль PLD, входящий в состав пакета Protel компании Altium, программа FPGAStudio компании CadenceDesignSystems, программы Fusion/SpeedWave, Fusion/VSCi, Fusion/ViewSim, ViewPLD

компания Innoveda, пакет программ SystemView компании Elanix), анализ электромагнитной совместимости (SpeedXP), проектирования ПЛИС (интегрированный пакет MicrowaveOffice 200X компании AWR, система полного электромагнитного моделирования EMPIRE компании IMST, система полного электромагнитного моделирования QuickWave-3D компании QWED, система полного электромагнитного моделирования CSTMicrowaveStudio компании CST), электронных схем и чертежей (Модуль Elektra-CAD компании DesktopEDA для пакета Protel, пакет WSCAD компании WSCADElectronic, пакет PCschematicELautomation компании DpSCAD-centerApS, пакет AutoCADElectrical компании Autodesk), конструкции устройства (системы AutoCAD, ProEngineer и SolidWorks, программа CADSTAR фирмы Zuken), а также для моделирования электронных схем на поведенческом уровне (пакет SystemView компании Elanix; пакет MicrowaveOffice компании AWR). В то же время отсутствуют системы для автоматизации наиболее интеллектуальных этапов проектирования – структурного и функционального синтеза. Последнее обстоятельство обуславливает актуальность проблемы разработки программных средств автоматизации функционального проектирования вычислительных систем с нетрадиционной архитектурой, к которым, как было отмечено, относятся системы класса МКМД.

Программное обеспечение таких систем автоматизированного проектирования должно основываться на теоретических методах проектирования, при этом, как отмечается в литературных источниках и интернет-изданиях, общая теоретическая база проектирования систем (класса МКМД) отсутствует. Попыткой устранения этого существенного пробела в теории вычислительных систем явилось создание теории синтеза вычислительных систем реального времени [3]. Объектом исследования данной теории являются вычислительные системы реального времени (ВСРВ), отличающиеся наличием множества путей обработки данных, каждый из которых одновременно независимо от других выполняет последовательность действий по реализации программы, которую предполагается заложить в структуру данной ВС. Требования реализации каждым из выделенных путей своих функций в реальном масштабе времени может быть удовлетворено использованием основных архитектурных принципов достижения высокой производительности – конвейеризации и параллелизма. Согласно классификации Флинна [4], параллельные системы относятся к архитектурам класса ОКМД (одиночный поток команд – множественный поток данных); конвейерные системы согласно современным концепциям относят к архитектурам класса МКОД (множественный поток команд –

одиначный поток данных). Сочетание этих двух принципов архитектурной организации в системах, для синтеза которых предлагается данная теория, позволяет отнести эти технические средства к системам класса МКМД (множественный поток команд – множественный поток данных). Таким образом, положения данной теории могут быть использованы в качестве теоретической базы для создания программного обеспечения ВС класса МКМД.

Данные положения рассмотрены в монографии [3] и ряде других публикаций автора. Основу теории составляет условие реализуемости пути графа алгоритма (ГА) в реальном времени и выделение уровней временной иерархии вершинам ГА. Методология проектирования ВС согласно названной теории предполагает последовательное выполнение процедур синтеза, выполняемых для каждого из априорных вариантов проектируемой системы, найденных на раннем этапе синтеза, с последующим выбором оптимального по заданным критериям.

Высокая степень алгоритмизации процедур синтеза обуславливает простоту их алгоритмизации с целью создания программных средств, которые составят основу программного обеспечения уникальной, не имеющей аналогов в мировой практике, автоматизированной системы функционального проектирования специализированных ВС класса МКМД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Танненбаум, Э. Архитектура компьютера / Э. Танненбаум. – СПб: Питер, 2010. –844 с.
 2. Кобайло, А. С. Методика формирования множества априорных решений вычислительных систем реального времени / А.С.Кобайло // Труды БГТУ. – 2013 – №6: Физ.-мат. науки и информатика. – С. 149–151.
 3. Кобайло, А. С. Теория синтеза вычислительных систем реального времени / А.С. Кобайло/ – Минск: БГТУ. –2010. – 256 с.
- Flynn M. J/ «Some Computer Organizations and Their Effectiveness», IEEE Trans/ on Computers, vol. C-21. Pp. 948–960, Sept. 1972.

**БЕЗОПАСНОСТЬ ДОСТУПА
К АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ СИСТЕМАМ ФИЗИЧЕСКОЙ
ЗАЩИТЫ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Реализуя требования по защите информации автоматизированной системы физической защиты (СФЗ) Белорусской АЭС следует строго учитывать требования по классификации автоматизированных систем.

Профили защиты [1, ст.6.2] разрабатываются и для трех классов объектов информатизации: А1, А2 и А3. При этом, минимальные требования по обеспечению безопасности информации предъявляются к классу А3, максимальные – к А1. К нему относятся объекты информатизации, на которых обрабатывается информация в пределах области действия комплекса систем безопасности объекта (КСБО), содержащая сведения, отнесенные к государственным секретам, технические средства которых размещены в пределах одной контролируемой зоны.

В общем случае для типовой компьютерной системы защиты от несанкционированных действий (НСД) должна обеспечивать идентификацию, аутентификацию пользователей при начале работы, контроль управления доступом к ресурсам и процессам, контроль целостности объектов компьютерной системы. Производится постоянное отслеживание процессов и событий компьютерной системы, а также организуется менеджмент безопасностью компьютерной системы.

В рамках системы защиты чувствительных ресурсов АС и информации от НСД реализуется комплекс программно-технических средств и организационных решений по защите СФЗ от несанкционированного действия. В комплекс интегрированы четыре подсистемы: управления доступом; регистрации и учета; криптографическая; обеспечения целостности.

Подсистема управления доступом проводит проверку подлинности и контроль доступа в систему часовых-операторов и администраторов по их идентификаторам и алфавитно-цифровым паролям условно-постоянного действия определенной символьной длины. Дополнительно проверка подлинности и контроль доступа в систему операторов и администраторов проводится по биометрическим характеристикам или специальным устройствам (жетонам, картам, электронным ключам). Администратор не должен иметь доступ к паролям операторов. В системе должны использоваться программные средства

для смены паролей самими операторами с соответствующей проверкой их уникальности и длины;

аутентификация внешних устройств системы по специальным тестам и протоколам аутентификации при каждом доступе к устройству;

контроль доступа операторов к командам управления внешними устройствами по принципу «в три руки» по паролям и таблицам санкционирования. Одним из операторов должен быть администратор [3, с.428].

Подсистема регистрации и учета осуществляет регистрацию загрузки/останова системы, рабочих станций, терминалов. В параметрах регистрации указываются время и дата загрузки/останова системы, идентификатор оператора и результат попытки загрузки/останова: успешный или неуспешный – несанкционированный, причина неуспешной попытки (неправильный идентификатор, пароль и т.п.).

В параметрах входа субъектов доступа в систему регистрации указываются время и дата входа субъекта, его идентификатор и результат попытки входа. При этом регистрация входа субъектов доступа в систему также производится с учётом снятых биометрических характеристик или специальных устройств. К командам управления внешними устройствами системы регистрация доступа осуществляется «в три руки».

Всех носители информации учитываются в журнале с регистрацией их приема и выдачи.

Криптографическая подсистема обеспечивает шифрование служебной информации СЗИ НСД (идентификаторов, паролей, таблиц санкционирования) и конфиденциальных (секретных) данных системы при их записи на накопители с использованием алгоритма ГОСТ 28147-89 [4].

Подсистема обеспечения целостности осуществляет контроль целостности СЗИ НСД при загрузке системы с помощью проверки наличия имен программ (файлов) и данных СЗИ НСД. В системе должен присутствовать администратор, ответственный за ведение СЗИ НСД, загрузку и останов системы, её восстановление и тестирование с использованием средств восстановления СЗИ НСД. Средства и порядок тестирования СЗИ НСД регламентируются заместителем начальника АЭС по режиму и физической защите.

Наряду с организационными мероприятиями осуществляется физическая охрана СВТ и носителей информации, предусматривающая контроль доступа в помещения АС СФЗ посторонних лиц, нали-

чие физических барьеров для потенциальных нарушителей.

Контроль целостности СЗИ НСД, программ и чувствительных данных системы при загрузке системы и по командам по эталонным контрольным суммам проводится с использованием имитовставки алгоритма ГОСТ 28147-89 [4]. Наиболее критичные ресурсы системы многократно резервируются, а данные архивируются.

Таким образом:

Защита системы физической является важнейшей частью общей задачи безопасности АЭС;

обеспечение безопасности информации должно осуществляться в строгом соответствии с правилами управления информационной безопасностью и требованиями режима секретности;

исполнение процедур контроля управления доступом к автоматизированным системам СФЗ, является наиболее важным компонентом политики информационной безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТБ 34.101.30-2007. Информационные технологии. Методы и средства безопасности. Объекты информатизации. Классификация. Национальный Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Нац. фонд технических нормативных актов Респ. Беларусь. – Минск, 2015. – Режим доступа: <http://www.tnra.by/KartochkaDoc.php?UrlRN=198020&UrlIDGLOBAL=295376>. – Дата доступа: 25.05.2015.

2. Голиков, В.Ф. Безопасность информации и надежность компьютерных систем: пособ. для студентов специальностей 1-40-1 01 01 и 1-53 01 02 в 2 ч / В.Ф.Голиков. – Минск, БНТУ, 2010. ч.1. – 86с.

3. Погожин, Н.С. Физическая защита ядерных объектов. Учебник для высших учебных заведений / П.В.Бондарев, А.В.Измайлов, А.И.Толстой; под ред. Н.С.Погожина. – М.: МИФИ, 2004. – 459 с.

4. ГОСТ 28147-89. Системы обработки информации. Защита криптографическая. Алгоритм криптографического преобразования. Национальный Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Нац. фонд технических нормативных актов Респ. Беларусь. – Минск, 2015. – Режим доступа: <http://www.tnra.by/KartochkaDoc.php?UrlRN=12812&UrlIDGLOBAL=12812>. – Дата доступа: 25.05.2015. ~

П.П. Урбанович, проф., д-р техн. наук
(БГТУ, г. Минск);

И.Н. Васильева, нач. управл. информац. ОТ
(Нац. институт образования Республики Беларусь, г. Минск);

А.Л. Давидович, нач. отдела дошкольного образования
(Минобразования Республики Беларусь, г. Минск);

Н.А. Жияк, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВОСПИТАНИЯ ЗВУКОВОЙ КУЛЬТУРЫ РЕЧИ У ДЕТЕЙ ДОШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА В СИТУАЦИИ БЛИЗКОРОДСТВЕННОГО БИЛИНГВИЗМА

Перспективным направлением развития образования и воспитания является внедрение средств информационных компьютерных технологий (ИКТ). Широкое применение таких технологий, разработка теоретических моделей и программного обеспечения компьютерных средств обучения приводит к совершенствованию образовательного процесса. Большую роль в этом играют различные автоматизированные обучающие средства. Специфика таких средств может эффективно проявиться в создании или новых форм и видов учебного процесса, или новых видов управляющих воздействий. Авторами накоплен богатый опыт использования в разработке и использовании обучающих и тестирующих программных средств в различных предметных областях. Однако разработка таких систем требует учета новых факторов.

Основным стандартом, существующим в области разработки компьютерных обучающих программ, является стандарт SCORM. Стандарт определяет структуру учебных материалов и интерфейс среды выполнения, за счет чего учебные объекты могут быть использованы в различных системах электронного дистанционного образования, образуя, таким образом, единое информационное образовательное пространство. С точки зрения разработчиков SCORM эффективное использование технологий в образовательной среде может значительно улучшить эффективность обучения и сократить затраты на него. Кроме того, такой вид обучения лучше отвечает индивидуальным требованиям, интересам и целям обучаемого [1].

В последние годы ведется открытая дискуссия о содержании, форме, методах специального обучения, в том числе – обучения культуре речи детей. Такая задача развивающего обучения трансформируется в методы, разработки новых инструментальных средств обучения, которые позволяли бы достичь успехов в речевом развитии ре-

бенка. При этом необходимо учитывать, что Конституцией Республики Беларусь закреплены два государственных языка: белорусский и русский. В силу этого для большинства дошкольников первым языком, на котором они учатся говорить и думать, общаться с окружающими, является русский. В то же время дети довольно рано приобщаются к белорусскому языку, слыша его по радио, телевидению, от некоторых взрослых, а сейчас и в детском саду, на отдельных занятиях или в течение дня – в зависимости от речевого режима учреждения. Речевое развитие дошкольника характеризуется рецептивным и в определенной степени репродуктивным двуязычием, т.е. восприятием и пониманием белорусской речи и воспроизведением некоторых ее элементов. Белорусский язык для белорусских детей осознается в обществе как родной язык, на основе которого осуществляется их национально-культурная социализация

Разобшенное обучение разным языкам развивает смешанный билингвизм, тормозящий не только речепорождение на родном языке, но и интеллектуальное развитие в целом. Для того, чтобы формировалась хорошая языковая координация (свободное общение на нескольких языках) или субординация (свободное общение на одном и переводное общение на другом), необходима интеграция языковых дисциплин.

С целью формирования у детей начальных языковых представлений необходимо, при организации обучения, направлять внимание ребенка на особенности произношения, грамматических форм, наличие сходных слов в белорусском и русском языках и т.д. Воспитание интереса к языку, его звуковой стороне, формирует определенную систему действий с языковым материалом (анализ, синтез, сравнение, обобщение), создает благоприятные условия для осознанного овладения речью на нескольких языках.

Именно ИКТ стали эффективным средством воспитательной и коррекционно-развивающей работы с детьми в ситуации близкородственного билингвизма. В основу использования ИКТ в этой области положены базовые психолого-педагогические и методологические положения, разработанные отечественными и зарубежными исследователями.

По мнению многих исследователей, ведущими в структуре речевого дефекта у детей в ситуации близкородственного билингвизма являются неполноценность языкового развития детей, недостаточная сформированность метаязыковых навыков, связанных с осознанием единиц речи, нарушенные процессы анализа и синтеза информации. Однако, как показывают исследования дефектологов, при дизонтоге-

незе в той или иной мере страдает не только речевая, но и связанные с ней высшие психические функции (зрительно-пространственные представления, слухо-моторные и опико-моторные координации и т.д.). Каждому языку свойственна та или иная система звуков. Поэтому звуковая сторона каждого языка имеет свои особенности и отличительные качества. Богатые возможности мультимедийных технологий, сочетающих несколько информационных сред: текст, звук, графику, фото, видео, взаимодействие которых под управлением интерактивного программного обеспечения влияет на развитие всех указанных психофизических функций. С целью овладения ребенком дошкольного возраста белорусским языком необходимо создание условий, которыми, по мнению авторов А.М. Богуш, Н.С. Старжинской и др., являются:

- осознание детьми языковых явлений;
- формирование чувства второго близкородственного языка;
- наличие образца правильной литературной речи;
- постоянный контроль за речью детей на втором языке;
- формирование дифференцированных установок на пользование первым или вторым языком;
- совместную работу учреждения дошкольного образования и семьи по обучению детей дошкольного возраста второму языку;
- руководство процессом овладения вторым языком [2, 3].

Таким образом, компьютерные средства представляют для специалиста в данной предметной области не часть содержания коррекционного обучения, а дополнительный набор возможностей коррекции речевых отклонений в развитии ребенка в ситуации близкородственного билингвизма.

В ходе исследований авторами разработаны методические рекомендации по разработке и использованию информационных компьютерных технологий в коррекционно-развивающем обучении детей в ситуации близкородственного билингвизма, также выявлены особенности развития речевых и неречевых функций у детей.

Ведется разработка программных средств, осуществляющих коррекцию речи и развитие деятельности дошкольников в трех разных формах:

- тренажер;
- репетитор, выполняющий определенные функции за преподавателя, причем такие, которые машина может выполнить лучше, чем человек;
- устройство, моделирующее определенную среду и действия

специалистов в ней.

Все три формы играют важную роль в обучении. Тренировочные системы наиболее целесообразно применять для закрепления ранее приобретенных навыков. Репетиторские системы лучше всего использовать при условии, что цели и задачи обучения четко определены. Имитационное учебное моделирование наиболее пригодно тогда, когда учебный материал не носит системного характера и его границы четко не определены. Очевидно, что в первых двух формах компьютер выступает лишь как средство количественного усиления функций преподавателя, повышения скорости обмена информацией между педагогом и учащимся, оперативности принятия решений и т. п. И именно эти возможности пытаются, прежде всего, использовать в процессе информатизации обучения [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Безденежных, О.Н. Использование информационно-коммуникационных технологии при работе с дошкольниками/ О.Н. Безденежных// Сборник тезисов конкурса научно-практической конференции «Современные образовательные технологии в условиях ФГОС: опыт и перспективы 27 мая 2013 года. – Красноуфимск: ИМЦ. – 2013. – С. 20–24.
2. Выготский, Л. С. Воображение и его развитие в детском возрасте / Л. С. Выготский // Собр. соч.: В 6 т. Т. 2. М., 1982.
3. Выготский, Л.С. К вопросу о многоязычии в детском возрасте [Текст] / Л.С. Выготский // Умственное развитие детей в процессе обучения. – М. – Л.: \ Госуд. учебно-педагог. изд-во, 1935. – С. 53-72.
4. Урбанович, П.П. Инструментальные средства разработки автоматизированных обучающих систем и их место в управлении учебным процессом/ П.П.Урбанович, Е.В. Романцевич // Мн: БГТУ. – Материалы МНТК «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов». – 2006. – С. 189–191.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ОШИБКИ В ПРОЕКТАХ ВНЕДРЕНИЯ/МОДИФИКАЦИИ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Производители корпоративных информационных систем (в частности, ERP-систем) предлагают решения, позволяющие осуществить гибкую настройку их функциональных возможностей [1]. Однако практика реализации внедрения таких систем показала, что число проектов, удовлетворяющих поставленным целям и ожиданиям, весьма невелик. Очень часто они заканчивались неудачей (срывом), неопределенным результатом или существенной затяжкой сроков реализации проекта внедрения.

При анализе проектов внедрения современных корпоративных информационных систем оказалось, что основные проблемы их неуспешности (частичной или полной) и внедренческие ошибки схожи, несмотря на специфику предметной области [2-5]. Данные проблемы и ошибки классифицированы и разделены нами на этапы: подготовки к проекту и, собственно, внедрению.

Этап подготовки к проекту

1. Принципы управления предприятием не формализованы (частично или полностью), а внутренние бизнес-процессы не очевидны и однозначны. Несомненно, можно автоматизировать все, по принципу «как есть», однако эффективнее провести обследование предприятия во всех аспектах его деятельности. Оно позволит выявить места возникновения необоснованных затрат, противоречий в организационной структуре и процессах, устранение которых позволит уменьшить производственные издержки, а также сократить время исполнения этапов основных бизнес-процессов.

2. Некомпетентность и сопротивление сотрудников предприятия-заказчика, ответственные за ход и результат проекта или же принимающие участие в проекте внедрения. Препятствием для грамотной адаптации программного продукта в деятельность предприятия-заказчика и его последующее использование могут послужить его сотрудники, вовлеченные в проект внедрения и не обладающие достаточным и необходимым набором знаний своей предметной области, а также принципов ведения хозяйственной деятельности на своем конкретном предприятии. Кроме того, при внедрении может возникнуть сопротивление сотрудников обусловленное человеческими факторами: страхом перед нововведениями, консерватизмом, опасение потерять работу или свою незаменимость, боязнь увеличения ответствен-

ности за свои действия, нежелание выполнять дополнительную работу, связанную с участием в проекте.

3. Проектирование требований к системе «снизу-вверх». Для исключения рисков создания системы, которая будет генерировать информацию, недостаточную для принятия управленческих решений высшим руководством, корпоративную информационную систему необходимо проектировать «сверху-вниз», а не наоборот. У каждого уровня управления свои потребности в информационном обеспечении. Распределение информационных потоков будет верным, если начать построение системы с уточнения потребностей в сведениях верхних уровней управления, постепенно спускаясь «вниз». При таком подходе в первую очередь формируются и определяются показатели, необходимые высшему руководству, а также частота их расчета. Затем устанавливаются данные, требующиеся следующему в иерархии управленческому звену, и т.д.

4. Неполные, неточные, противоречивые или изменяющиеся требования к системе. Требования предприятия-заказчика являются базой для формирования технического задания. Однако до внедрения или предпроектного обследования заказчик предъявляет требования исходя из концепции текущих внутренних бизнеспроцессов, а непосредственно в процессе внедрения они склонны к изменению своих требований или же привнесению новых в общий набор требований к системе, работы по внедрению которой уже ведутся.

5. Отсутствие учета стратегии развития предприятия. Проектируемая система рассчитана на автоматизацию управления предприятия в ее настоящем «виде», то есть без учета ее перспективного развития. Систему необходимо проектировать так, чтобы она работала в течение 2-3 лет без проведения модернизации (как минимум на 3 года). Возможными направлениями развития предприятия или изменений в его деятельности могут быть: изменение масштаба производства и/или торговой деятельности; изменение технологии производства; изменение организационной структуры; изменение внутренних бизнес-процессов.

6. Отсутствие квалифицированной группы внедрения и сопровождения системы. На предприятии необходимо сформировать небольшую (3-6 человек) рабочую группу, которая проходит максимально полное обучение работе с системой, затем на эту группу ложится значительная часть работы по внедрению системы и дальнейшему ее сопровождению. Применение подобной технологии вызвано двумя факторами: во-первых, тем, что предприятие обычно заинтересовано в том, чтобы у него под рукой были специалисты, которые могут оперативно решать большинство рабочих вопросов при настройке

и эксплуатации системы, а во-вторых, обучение своих сотрудников и их использование всегда существенно дешевле аутсорсинга (передача организацией на длительный срок, на основании договора, определённых бизнес-процессов или производственных функций на обслуживание другой компании, специализирующейся в соответствующей области). Таким образом, формирование квалифицированной рабочей группы является залогом успешной реализации проекта внедрения.

7. Отсутствие контрольных точек выполнения проекта по внедрению системы. Проект не разбит на управляемые блоки, не выделены контрольные точки. Рекомендации: выделить направления, которые необходимо контролировать; назначить ответственных за каждое из них (например, за технические средства и инфраструктуру, подготовку конечных пользователей, проведение организационных изменений, доработку программного обеспечения, оптимизацию бизнес-процессов и т. д.); выделить функциональные блоки будущей системы, установить очередность внедрения программных модулей и обязательно зафиксировать контрольные точки проекта.

8. Некорректная оценка руководством предприятия потенциального экономического эффекта от результата будущего внедрения корпоративной информационной системы. Внедрение подразумевает немалые затраты на общую автоматизацию (компьютеры, серверы, сетевое оборудование, лицензии, консультационные услуги и т.д.). Успешным проект можно назвать в том случае, если итоговые показатели совпадают с запланированными как минимум на 70-80%. Побочные факторы (просроченные даты и потраченные внебюджетные деньги) имеют место очень часто.

Этап внедрения

1. Внедрение сконцентрировано только на сотрудниках организации исполнителя. В полноценной команде проекта внедрения должны обязательно присутствовать специалисты с различными функциональными обязанностями, в том числе и сотрудники предприятия-заказчика. Мнение, что после реализации консультантами проекта будет достигнут ожидаемый результат в корне ошибочно. Дело в том, что сотрудники предприятия не всегда могут четко сформулировать и донести до специалистов по внедрению свое видение результатов проекта. Успешного внедрения не произойдет только за счет работы сотрудников организации исполнителя.

2. Отсутствие регулярных отчетов проектной команды (руководителя проекта) перед представителем руководства заказчика по промежуточным этапам по мере выполнения проекта. Данная проблема может серьезно подорвать или затянуть график выполнения работ по внедрению. Необходимо выделять проектные контрольные точки, свя-

занные с реальными материальными результатами и продумать действия по исправлению ситуации в случае срыва сроков.

3. Отсутствие (или слабое наличие) обучения персонала заказчика. В состав проектной группы необходимо ввести инструктора-преподавателя, который проводит обучение пользователей будущей корпоративной информационной системой, особенно в вопросах, связанных с новой функциональностью. Он должен целенаправленно формировать у своих слушателей положительное восприятие внедряемой системы, или, говоря иначе, «управляет ожиданиями».

4. Команда проекта не наделена достаточными полномочиями для активного внедрения. Руководству предприятия-заказчика необходимо установить высокий приоритет для проекта внедрения системы среди всех остальных организационных и коммерческих служб внутри предприятия, наделить высокими полномочиями руководителя проекта, выделить необходимые ресурсы (сотрудники заказчика и их время в данном случае) для ведения работ по внедрению.

Рассмотренные основные проблемы и ошибки внедрения и рекомендации по их устранению дают направление для правильной реализации проекта. Только в этом случае проект внедрения не будет завален под текущей деятельностью предприятия и будет иметь вероятность на успешное завершение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация управления предприятием / В.В. Баронов и др. - М. : ИНФРА-М, 2000.

2. Липунцов, Ю. П. Управление процессами: методы управления предприятием с использованием информационных технологий / Ю. П. Липунцов - М.: ДМК-Пресс: Компания АйТи, 2003.

3. Филиппова О., Митрофанова Я. Проблемы внедрения ERP-систем на предприятиях // НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА РУСЕНСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ - 2012, том 51, серия 6.1. С. 43-47.

4. Скрипкин, К.Г. Экономическая эффективность информационных систем / К.Г. Скрипкин - М.: ДМК-Пресс: Компания АйТи, 2002.

5. Карпов, Д.В. Проблемы внедрения ERP-систем // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2010, № 4 (1), с. 233-239.

ПРОГРАММНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО КОРРЕЛЯЦИОННО-АКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК

Обнаружение утечек в коммунальных и магистральных трубопроводах различного назначения является задачей, актуальность которой в настоящее время не вызывает сомнений [1]. В связи с этим, разработаны и находят применение значительное число методов обнаружения утечек в трубопроводах. В соответствии с принципом применения, существующие методы обнаружения утечек могут быть разделены на две группы: определяющие местоположение течи путём анализа динамики технологических параметров процесса перекачки, и использующие средства неразрушающего контроля [2].

Одним из наиболее распространенных и эффективных [2] является корреляционно-акустический метод обнаружения утечек. В основу метода положено определение разницы во времени регистрации сигнала утечки датчиками, расположенными на концах линейного участка трубопровода по обе стороны от неё. Для решения последней задачи широкое применение находит математический аппарат корреляционного анализа. Упрощённо процедура определения искомого времени запаздывания (τ_{AB}) может быть описана следующими выражениями:

$$r_{AB}(j) = \frac{1}{N_0} \cdot F_D^{-1} [F_D^*(s_A(i)) \cdot F_D(s_B(i))], \quad (1)$$

$$\tau_{AB} = \Delta \cdot j_0, \quad (2)$$

где $F_D(\cdot)$ – оконное дискретное преобразование Фурье (ДПФ); $F_D^*(\cdot)$ – комплексно-сопряжённое представление результатов оконного дискретного преобразования Фурье; N_0 – ширина окна преобразования; Δ – шаг дискретизации; j_0 – аргумент соответствующий наибольшему значению корреляционной функции $r_{AB}(j) < r_{AB}(j_0) \forall j$.

Не смотря на простоту реализации применение традиционной функции корреляции (в соответствии с (1)) связано с существенными ограничениями. В частности, присутствие разнородных шумов, вносимых средой и техническими средствами, делает возможными выбросы в корреляционной функции. Последнее делает невозможным определение запаздывания непосредственно по (2) и требует деталь-

ного анализа коррелограммы и дополнительных манипуляций для определения действительного местоположения пика [3].

В качестве одного из возможных решений было предложено вычисление частотно-временной корреляционной функции, которая обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционной: лучшей помехоустойчивостью [1], большей визуальной наглядностью графического представления [3].

Получение частотно-временной корреляционной функции, сводится к вычислению корреляционных функций для M различных частотных интервалов сигналов, что может быть упрощенно представлено в виде последовательности действий [4]:

I: $P_{AB}(k) = X_B^*(k) \cdot X_A(k)$;

II: $B_k^m = P_{AB}(k) \cdot w_k^m$, где w_k^m – оконная функция, определенная следующим образом

$$w_k^m = \begin{cases} 1, & \frac{m}{M} < \frac{k}{K} \leq \frac{m+1}{M} \\ 0, & \frac{m}{M} \geq \frac{k}{K} > \frac{m+1}{M} \end{cases},$$

где $k = 0, 1, 2, \dots, K$, $m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$, K – количество отсчетов в дискретном спектре сигнала, определяющееся шириной окна ДПФ (при использовании стандартных алгоритмов БПФ $K = 2^{n-1} + 1$);

III: $Z^m(j) = \frac{1}{N_0} \cdot F^{-1}[B^m]$;

IV: $r^{tf}(m, j) = Z^m(j)$.

Стоит отметить, что помимо вышеобозначенных преимуществ, частотно-временной корреляционный анализ обладает рядом недостатков. Основным из которых являются необходимость выполнения значительного количества дополнительных преобразований Фурье [3]. Кроме того, так как график частотно-временной корреляционной функции представляет собой поверхность простирающуюся над плоскостью, образованной осями времени и частоты, возникает необходимость в разработке и реализации качественного и быстродействующего модуля визуализации [2].

С учётом указанных особенностей математический аппарат частотно-временного корреляционного анализа был реализован программно. Для увеличения быстродействия был применён алгоритм Кули-Тьюки вычисления преобразований Фурье, обладающий высокой степенью параллелизма и позволяющий наиболее эффективно использовать такие возможности аппаратной составляющей как многоядерность и вычисления общего назначения на GPU [5].

На основе предложенного метода был разработан и создан прототип частотно-временного корреляционно-акустического комплекса обнаружения утечек структура которого показана на рисунке 1.

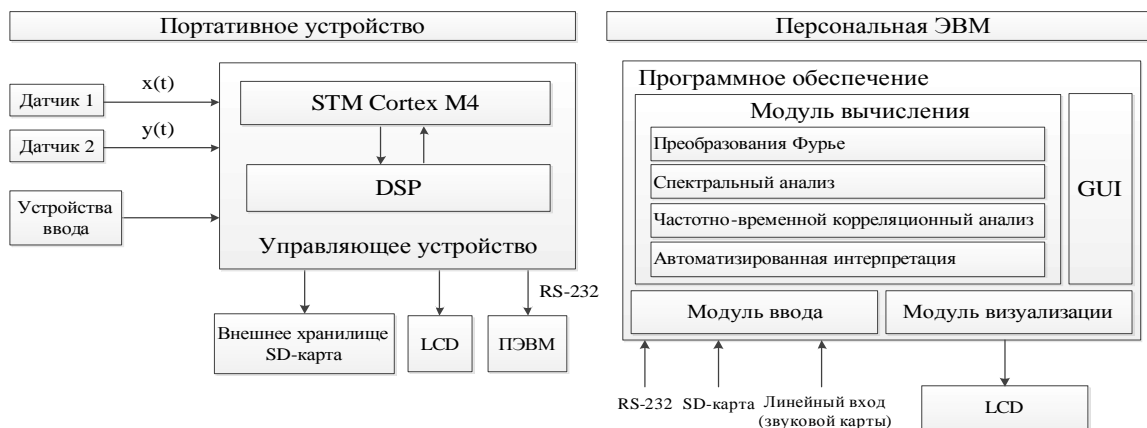


Рисунок 1 – Упрощенные функциональные схемы составляющих течепоискового комплекса

В соответствии со схемой на рисунке 1, для снятия сигналов используется портативное устройство на базе микроконтроллера STM32 Cortex M4, укомплектованное пьезоэлектрическими акселерометрами ДН-3 (см. рисунок 2). Обработка записей осуществляется персональной ЭВМ с предустановленным специализированным программным обеспечением, функционал которого не ограничивается вычислением частотно-временных корреляционных функций.



Рисунок 2 – Портативное устройство регистрации сигналов

Применение разработанного программно-аппаратного комплекса позволяет повысить точность и эффективность локации течей, за счёт принципиально лучшей помехоустойчивости предложенного метода [2] и сравнительным удобством работы с 3D изображением корреляционных функций [3] (см. рисунок 3).

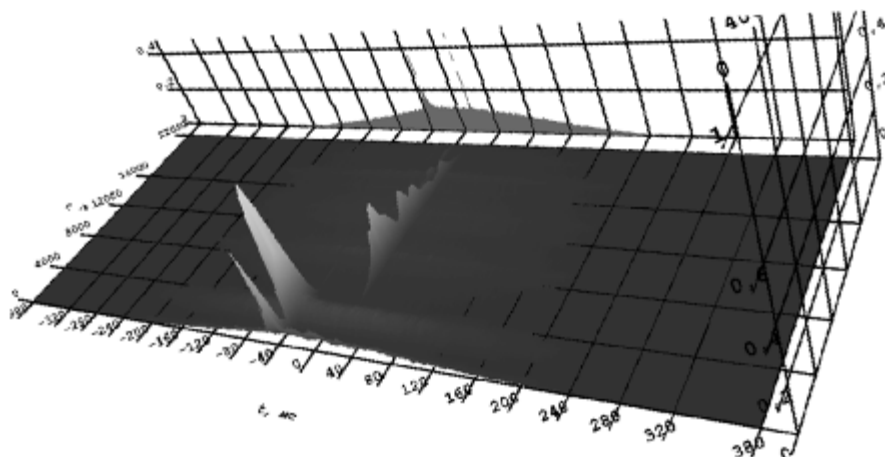


Рисунок 3 – Поверхность частотно-временной корреляционной функции сигнала утечки

Отдельно стоит отметить то, что в силу специфичности структуры выхода частотно-временного коррелятора представляется возможной автоматизированная интерпретация результата анализа. Соответствующая программная подсистема в настоящее время находится в разработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cataldo A., Cannazza G., De Benedetto E., Gianquinto N. A New Method for Detecting Leaks in Underground Water Pipelines // IEEE Sensors Journal. – 2012. – Vol. 12. – No. 6. – P. 1660-1667.
2. Faerman V. A. , Cheremnov A. G. , Avramchuk V. S. , Luneva E. E. Prospects of frequency-time correlation analysis for detecting pipeline leaks by acoustic emission method // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014 – Vol. 21. – Issue 1. – Art. num. 12041.
3. Avramchuk V.S., Goncharov V.I. Time-frequency Correlation Method for Improving the Accuracy in detecting Leaks in Pipelines // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 650. – P. 443–446.
4. Аврамчук В.С., Чан В.Т. Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 112–120.
5. Лунёва Е.Е., Черемнов А.Г., Аврамчук В.С. Оптимизация расчёта частотно-временной корреляционной функции на центральном процессоре // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – № 2. – С. 58–62.

СЕКЦИЯ № 5
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ

Председатель – профессор, д-р физ.-мат. наук
Наркевич Иван Иванович

Секретарь – доцент, канд. физ.-мат. наук, зав. кафедрой
теоретической механики Грода Ярослав Геннадьевич

УДК 535.37+541.65+543.4

Н. Н. Крук, зав. кафедрой физики, д-р физ.-мат. наук;
Д. В. Кленицкий, доц., канд. физ.-мат. наук (БГТУ, г. Минск)
**РЕЛАКСАЦИЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ КРАСИТЕЛЯ
ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ
СВЕТОВЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

При возбуждении растворов красителей световыми импульсами с длительностью, превышающей время жизни триплетного состояния красителя, интенсивность его флуоресценции испытывает релаксацию и при достаточно больших временах стремится к некоторой постоянной величине [1]. Процесс релаксации обусловлен установлением равновесия между населенностями электронных состояний, вовлеченных в процессы дезактивации энергии электронного возбуждения, при стационарном фотовозбуждении, и получил название фединг (англ. fading – затухание, замирание) флуоресценции. Впоследствии фединг флуоресценции исследовался несколькими группами авторов [2], при этом основное внимание уделялось его временным характеристикам. По нашему мнению, кинетика фединга флуоресценции позволяет определить не только время жизни триплетного состояния, но и величину квантового выхода интеркомбинационной конверсии.

Процессы поглощения, флуоресценции и фосфоресценции в органических молекулах описываются схемой электронных уровней, показанных на рис. 1. В молекулах имеется система синглетных уровней энергии (S_0 , S_1 и т. д.). Переходы с основного уровня S_0 на возбужденные синглетные уровни разрешены и определяют систему электронных полос поглощения молекул. Кроме этого у большинства молекул имеется система триплетных уровней энергии (T_1 и т. д.). Возможные переходы между уровнями показаны вертикальными стрелками: сплошными стрелками – излучательные переходы, штриховыми – безызлучательные переходы. Каждый из этих процессов характеризуется константой скорости, типичные величины которых показаны на рис. 2. Константа скорости фотовозбуждения молекул k_{12} зависит от плотности потока возбуждающих фотонов. Константа скорости интеркомбинационной конверсии k_{23}^d у большинства люминесцирующих органических молекул сравнима по величине с константами k_{21} и k_{21}^d , так что обычно заметная доля поглотивших квант света молекул оказываются в триплетном состоянии. Прямой излучательный переход из триплетного состояния в основное синглетное состояние (фосфоресценция) запрещен правилом запрета переходов между уровнями различной мультиплетности. Как следствие, константа скорости k_{31} этого процесса оказывается много меньше константы скорости k_{21} для флуоресценции. Фосфоресценция

конкурирует с безызлучательной дезактивацией триплетного состояния в основное.

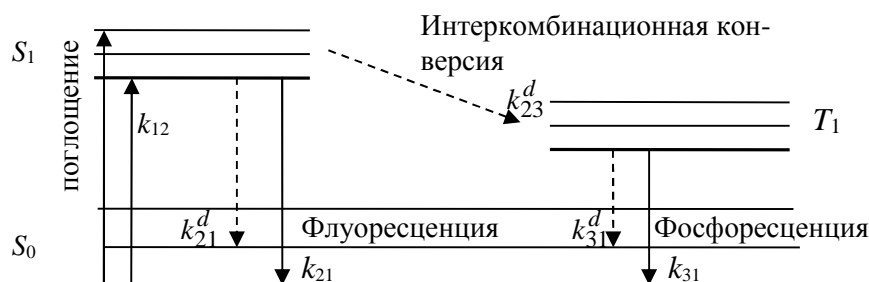


Рисунок 1 – Схема электронно-колебательных уровней энергии сложных органических молекул и переходов между ними

Пренебрегая процессами переноса энергии между молекулами, населенности уровней энергии в случае, когда импульс возбуждающего излучения во много раз превосходит длительность изучаемых процессов, определяются системой кинетических балансных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{d}N_1 / dt = -k_{12}N_1 + (k_{21} + k_{21}^d)N_2 + (k_{31} + k_{31}^d)N_3 \\ \dot{d}N_2 / dt = k_{12}N_1 - (k_{21} + k_{21}^d + k_{23}^d)N_2 \\ \dot{d}N_3 / dt = k_{23}^dN_2 - (k_{31} + k_{31}^d)N_3 \end{cases}, \quad (1)$$

где N_1, N_2, N_3 - населенности молекул в момент времени t на уровнях энергии S_0, S_1, T_1 соответственно. Положительные слагаемые в этих уравнениях определяют скорость поступления молекул на данный уровень энергии, а отрицательные слагаемые – скорость ухода молекул с уровня. Начальные условия для населенностей имеют вид $N_1(0) = N_0, N_2(0) = N_3(0) = 0$, где N_0 – общее число молекул. Кроме того, в любой момент времени населенности должны удовлетворять уравнению, отражающему закон сохранения частиц: $N_1 + N_2 + N_3 = N_0$.

Моделируя фотовозбуждение прямоугольными импульсами, т. е. полагая $k_{12} \gg \text{const}$, из системы линейных дифференциальных уравнений (1) с учетом закона сохранения частиц следует, что населенность N_2 первого возбужденного уровня S_1 удовлетворяет неоднородному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$d^2y/dt^2 + ay/dt + by = c, \quad (2)$$

где: $y = N_2/N_0$ удовлетворяет начальным условиям $y(0) = 0, y'(0) = k_{12}$, а коэффициенты определяются соотношениями:

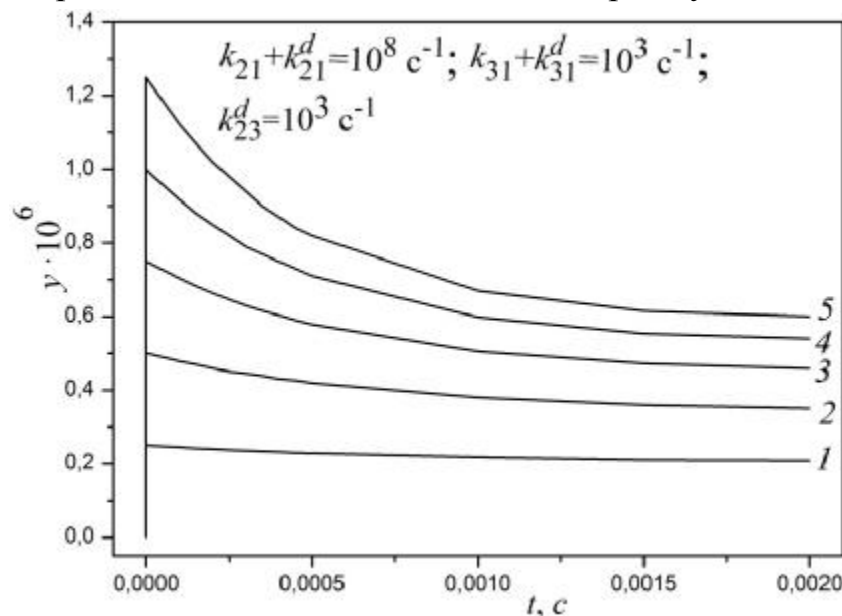
$$a = k_{12} + k_{21} + k_{21}^d + k_{31} + k_{31}^d + k_{23}^d, \quad (3)$$

$$b = k_{12}(k_{31} + k_{31}^d + k_{23}^d) + (k_{31} + k_{31}^d)(k_{21} + k_{21}^d + k_{23}^d), \quad c = k_{12}(k_{31} + k_{31}^d). \quad (4)$$

Решение уравнения (2) имеет вид

$$y = C_1 e^{-a_1 t} + C_2 e^{-a_2 t} + y_0, \quad (5)$$

где постоянные интегрирования C_1 и C_2 определяются начальными условиями для уравнения; a_1 , a_2 и y_0 – зависят от коэффициентов (3), (4). На рис. 2 показана зависимость населенности S_1 состояния от времени, для различных значений константы скорости k_{12} фотовозбуждения (параметры указаны на рисунке). Сразу же после включения фотовозбуждения наблюдается резкое нарастание, а затем относительно быстрый спад населенности к стационарному значению.



1 – $k_{12} = 250 \text{ c}^{-1}$, 2 – $k_{12} = 500 \text{ c}^{-1}$, 3 – $k_{12} = 750 \text{ c}^{-1}$, 4 – $k_{12} = 1000 \text{ c}^{-1}$, 5 – $k_{12} = 1250 \text{ c}^{-1}$

Рисунок 2 – Зависимость населенности S_1 состояния от времени

Согласно (5), стационарные значения населенности при достаточно большом промежутке времени t после начала фотовозбуждения, определяются по формуле:

$$y \gg y_0 = \frac{c}{b} = \frac{k_{12}(k_{31} + k_{31}^d)}{k_{12}(k_{31} + k_{31}^d + k_{23}^d) + (k_{31} + k_{31}^d)(k_{21} + k_{21}^d + k_{23}^d)}. \quad (6)$$

На рис. 3 показана зависимость стационарных значений населенностей от константы скорости k_{12} фотовозбуждения. При больших значениях плотности потока фотонов возбуждающего излучения (больших значениях коэффициента k_{12}) наблюдается насыщение – населенность перестает зависеть от k_{12} .

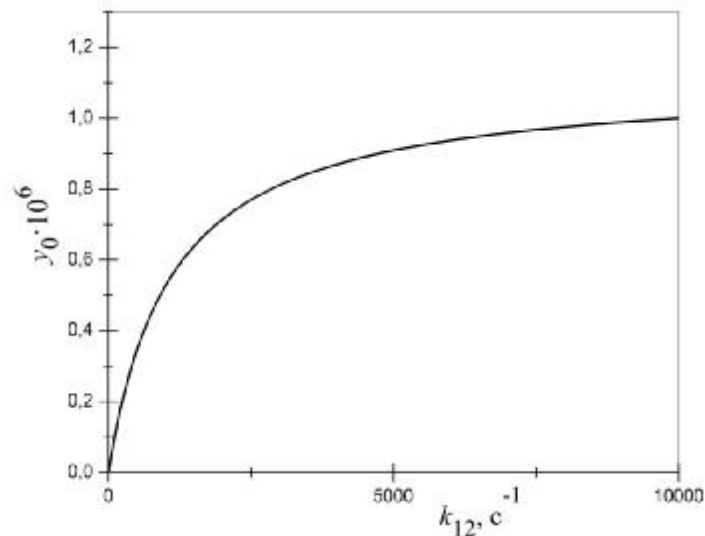


Рисунок 3 – Зависимость стационарного значения населенности первого возбужденного уровня от константы скорости фотовозбуждения

При насыщении стационарные значения населенности определяются параметром интеркомбинационной конверсии k_{23}^d и параметром $k_{31} + k_{31}^d$, определяющим суммарную константу скорости дезактивации триплетного состояния:

$$y_0^H = \frac{k_{31} + k_{31}^d}{k_{31} + k_{31}^d + k_{23}^d}. \quad (9)$$

Следовательно, интенсивность флуоресценции, которая пропорциональна населенности первого возбужденного состояния, при насыщении также будет определяться этими параметрами. Поэтому, по нашему мнению, фединг флуоресценции можно использовать для определения этих параметров, которые определяют время жизни триплетного состояния и квантовый выход интеркомбинационной конверсии.

ЛИТЕРАТУРА

1 Avarmaa, R. Fluorescence detection study of molecular triplet states in chlorophyll and related compounds / R. Avarmaa // *Molecular Physics: An International Journal at the Interface Between Chemistry and Physics*, Volume 37, Issue 2, 1979, P. 441-454.

2 Avarmaa, R. Fluorescence-detected triplet kinetics study of the specifically solvated chlorophyll a and protochlorophyll in frozen solutions / R. Avarmaa [et al.] // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy Section* Vol. 43, No. 4, 1987, P. 507-514.

Г. С. Бокун, доц., канд. физ.-мат. наук;
В. С. Вихренко, проф., докт. физ.-мат. наук;
И. И. Наркевич, проф., д-р физ.-мат. наук (БГТУ, Минск)

**ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИАЦИОННЫХ МЕТОДОВ
ДЛЯ ОПИСАНИЯ СТРУКТУРНЫХ
И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
НАНОЧАСТИЦ**

Для изучения атомных систем небольшого размера (кластеров) используются разные подходы, в частности, широко применяется концепция, основанная на анализе поверхности потенциальной энергии (ППЭ) [1], которая дополняется методами молекулярной динамики (МД) и термодинамики. С помощью ППЭ фактически изучаются возможные трансформации и конфигурационные переходы в кластерах при нулевых температурах, что с неизбежностью требует привлечения других методов исследования при ненулевых температурах.

В настоящей работе развивается статистический подход, который позволяет получить явное выражение для функционала свободной энергии наночастиц и на его основе изучать их свойства при ненулевых температурах. Для описания наноструктурированных систем, которые являются существенно неоднородными объектами, можно в рамках двухуровневого молекулярно-статистического подхода [2] реализовать учет неоднородности структуры, связанной с неоднородным распределением средних чисел заполнения n_i микроячеек объемами ω_i ($i = 1, 2, \dots, M$) метода условных распределений Л. А. Ротта [3], форма и размеры которых претерпевают изменения по мере приближения к поверхности наночастиц (имеет место релаксация решетки в кристаллических наночастицах). Двухуровневое описание в данном случае состоит в применении модифицированного метода условных коррелятивных функций F_{11} -приближения, определенных на множестве наиболее вероятных, но не на всех возможных состояниях конденсированной системы из N молекул в объеме V . В этом приближении конфигурационный интеграл системы имеет следующий вид:

$$Q_N = \frac{1}{N!} \int_{\text{в.в.п.}} \prod_{i=1}^N \int_{\omega_i} \exp \left[-\beta \sum_{i < j}^N F(|q_i - q_j|) \right] \prod_{i=1}^N dq_i \quad (1)$$

Здесь $F(|q_i - q_j|)$ – межмолекулярный потенциал, $\beta = (k_B T)^{-1}$ – обратная температура, $V = \sum_{i=1}^M \omega_i$ – объем всей термодинамической систе-

мы, который разделен на M ячеек объемами ω_i ($i = 1, 2, \dots, M$; M – общее число ячеек).

В используемом здесь F_{11} -приближении каждая из ячеек системы может быть пустой либо занятой только одной частицей. Суммирование в (1) выполняется по всем возможным перестановкам (в.в.п.) N частиц по M ячейкам, при условии, что средние числа заполнения n_i всех ячеек заданы и фактически определяют дискретное поле неоднородного распределения частиц по ячейкам. При этом должно выполняться следующее условие нормировки:

$$\mathring{a} \sum_{i=1}^M n_i = N. \quad (2)$$

Для вычисления конфигурационного интеграла (1) ранее использовалась бесконечная цепочка интегродифференциальных уравнений для условных коррелятивных функций, которая, как правило, обрывалась на первом ее уравнении, и решалась замкнутая система интегральных уравнений для одночастичных потенциалов средних сил $\phi_{ij}(\mathbf{q}_i)$ [2, 3]. В данной работе реализуем другую возможность, которая предполагает разложение конфигурационного интеграла (1) по модифицированным майеровским функциям. Для этого в качестве базисной системы используется не идеальный газ, а конденсированная среда, каждая молекула которой находится в поле, описываемым искомыми одночастичными потенциалами средних сил взаимодействия этой молекулы с молекулами, которые статистически распределены в соседних ячейках.

Для учета наличия в кристаллических системах подсистемы тепловых вакансий, т. е. пустых ячеек, будем рассматривать их как ячейки, занятые фиктивными квазичастицами сорта b , которые не взаимодействуют с реальными молекулами системы (частицами сорта a). В связи с этим будем использовать потенциалы $\phi_{ij}(\mathbf{q}_i^m)$, которые описывают взаимодействие частиц сорта m в ячейке ω_i ($m = a, b$) с частицами, распределенными в ячейке с номером j . Гамильтониан такой базисной системы

$$H_N^0 = \mathring{a} \sum_{i=1}^M \mathring{a} \sum_{m=a,b} \mathring{a} \sum_{j=1}^M \phi_{ij}(\mathbf{q}_i^m) \quad (3)$$

позволяет записать окончательное выражение для ее конфигурационного интеграла в следующем виде

$$Q_N^0 = \prod_{m=a,b} \prod_{i=1}^M \tilde{O}(\mathbf{Q}_i^m)^{n_i^m} / (n_i^m)^{n_i^m}, \quad (4)$$

$$\text{где } \mathbf{Q}_i^m = K_i^m \mathring{Q}_i^m \exp \left\{ -b \mathring{a} \sum_{m=a,b} \mathring{a} \sum_{j=1}^M \phi_{ij}(\mathbf{q}_i^m) \right\} d\mathbf{q}_i^m. \quad (5)$$

Множитель K_i^m в формуле (6) учитывает тот факт, что интегрирование по положениям фиктивной частицы в ячейке ω_i , не взаимодействующей с реальными молекулами в других ячейках, дает объем ячейки ω_i , и этот вклад следует исключить, разделив результат интегрирования на ω_i .

Тогда

$$K_i^m = 1/[1 + (w_i - 1)d_{mb}], \quad d_{mb} - \text{символ Кронекера.} \quad (6)$$

Используя гамильтониан (3) базисной системы, перепишем соотношение (1) в форме тождества:

$$Q_N = Q_N^0 \langle \exp\{-b(H - H_0)\} \rangle_0. \quad (7)$$

Здесь угловыми скобками $\langle \dots \rangle$ обозначено усреднение по распределению частиц базисной системы.

Разложив в уравнении (7) экспоненту по майероподобным функциям

$$f_{ij}^{mm} = \exp\left\{-b \sum_{\mathbf{e}} \left(|q_i^m - q_j^n| \right) - j_{ij}(q_i^m) - j_{ji}(q_j^n) \right\}, \quad (8)$$

приходим к представлению конфигурационного интеграла в виде:

$$Q_N = Q_N^0 \left[1 + \sum_{i^1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{n=a,b} \sum_{w_j} \frac{n_i^m n_j^n}{w_i w_j} \int f_{ij}^{mm} dq_i^m dq_j^n + \dots \right]. \quad (9)$$

Искомые потенциалы средних сил ϕ_{ij} , входящие в разложение (9), можем рассматривать как независимые друг от друга функции. При этом конфигурационный интеграл, представленный формулой (9), не должен зависеть от вида базисных функций ϕ_{ij} . Следовательно, ограничившись, например, выписанными в формуле (9) двумя членами разложения, можно получить уравнение для определения искомых потенциалов ϕ_{ij} , используя условие экстремальности для Q_N :

$$dQ_N/dj_{ij}(q_i^m) = 0. \quad (10)$$

В результате варьирования получается замкнутая система интегральных уравнений:

$$\exp\left\{-b j_{ij}(q_i^m)\right\} = \sum_{n=a,b} \frac{n_j^n}{Q_j^n w_j} \int \exp\left\{-b \sum_{\mathbf{e}} \left(|q_i^m - q_j^n| \right) - \sum_{k^1 i,j}^M j_{jk}(q_j^n) \right\} dq_j^n. \quad (11)$$

Выполнение условия (10) в форме системы уравнений (11) приводит к тождеству

$$\dot{a} \sum_{n=a,b} n_j^n \dot{f}_{ij}^{mm} dq_j^n = 0, \quad (12)$$

которое после подстановки в (9) подтверждает равенство интегралов Q_N и Q_N^0 .

Решение системы уравнений (11) для неоднородной конденсированной среды позволяет найти потенциалы ϕ_{ij}^{μ} , которые, являясь функциями координат частиц в ячейках, одновременно являются функционалами дискретных полей чисел заполнения n_i^{μ} и, соответственно, набора параметров ячеек, измененных за счет релаксации решетки вблизи поверхности наночастиц. Равновесные поля всех этих величин можно находить с помощью принципа экстремальности для соответствующих термодинамических функционалов. В простейшем случае, когда имеется поле средних чисел заполнения ячеек и учитывается изменение только их объемов ω_i (без учета изменения их формы), получим систему двух вариационных уравнений:

$$q \frac{\delta \ln Q_N}{\delta n_i} + \mu = 0, \quad q \frac{\delta \ln Q_N}{\delta \omega_i} - p = 0. \quad (13)$$

Здесь μ и p – множители Лагранжа, учитывающие сохранение общего числа N молекул однокомпонентной системы и ее объема V :

$$\dot{a} \sum_{i=1}^M n_i^m = N_m \quad m = a, b; \quad \dot{a} \sum_{i=1}^M \omega_i = V. \quad (14)$$

При численном решении системы уравнений (13) ранее использовался локальный алгоритм ее решения для частного случая, когда объемы всех ячеек можно считать одинаковыми. В общем случае задача сильно усложняется.

Помимо локального алгоритма решения вариационной задачи можно использовать интегральный алгоритм численного решения, который автоматически учитывает сохранение числа частиц N и общего объема V .

Для демонстрации этого подхода рассмотрим систему с одномерной неоднородностью в направлении оси x (L – число ячеек в направлении оси x). Перепишем вариационные уравнения (13), используя определения для локальных значений химического потенциала μ_i и давления p_i . В результате приходим к системе двух уравнений равновесия для определения параметров теории n_i и ω_i :

$$p_i - p = 0, \quad \mu_i - \mu = 0, \quad i = 1, \mathbf{K}, L. \quad (15)$$

Для решения этой системы введем гипотетические «потоки» для чисел заполнения n_i ячеек объемами w_i

$$I_{n_i} = D_n(m_i - m_{i+1}), \quad (16)$$

разность которых определяет изменение чисел заполнения в ячейках:

$$dn_i = K_n(I_{n_{i-1}} - I_{n_i}), \quad (17)$$

где D_n – коэффициент диффузии, K_n – коэффициент, значение которого определяет быстроту и сходимость интегрального алгоритма.

Аналогично запишем выражение для «деформационного потока»

$$I_{w_i} = D_w(p_i - p_{i+1}), \quad (18)$$

и, соответственно, изменение объемов ячеек

$$dw_i = K_w(I_{w_i} - I_{w_{i-1}}). \quad (19)$$

Распределения параметров n_i и ω_i , соответствующие равносному состоянию наночастицы заданного объема и содержащей заданное число частиц, находятся по следующему алгоритму. По некоторым исходным значениям $n_i=N/M=n_0$ и $\omega_i=\omega_j=V/M$ определяются потоки I_{n_i} и I_{ω_i} . Потоки через внешнюю поверхность наночастицы должны при этом оставаться равными нулю (равновесными). Далее по соотношениям (17) и (19) вычисляются изменения δn_i и $\delta \omega_i$, по которым находятся новые значения величин n_i и ω_i . Эти значения используются для нового цикла вычислений, и процедура повторяется, пока не установится равновесное состояние внутри наночастицы, характеризующееся тем, что внешние и внутренние потоки становятся равными нулю.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Берри, Р. С. Моделирование конфигурационных переходов в атомных системах / Р. С. Берри, В. М. Смирнов // УФН. - Том. 183, №10. - 2013. – С. 1029-1057.
- 2 Наркевич, И. И. Молекулярно-статистическая теория неоднородных конденсированных сред: дис. ... д-ра физ-мат. наук / И. И. Наркевич. – СПб., 1993. – 223 л.
- 3 Ротт, Л. А. Статистическая теория молекулярных систем. Метод коррелятивных функций условных распределений / Л. А. Ротт. – М., 1979. -280 с.

И. И. Наркевич, проф., д-р физ.-мат. наук;
 Г. С. Бокун, доц., канд. физ.-мат. наук (БГТУ, г. Минск);
 Н. Т. Квасов, проф., д-р физ.-мат. наук (БГУ, г. Минск);
 К. Ю. Козич, студ.; Д. В. Прокопович, студ. (БГТУ, г. Минск)
inarkevich@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХУРОВНЕВОГО МОЛЕКУЛЯРНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ РАСЧЕТА ЭНЕРГИИ И ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦАХ НА ПРИМЕРЕ ИКОСАЭДРА

Для исследования структуры и термодинамических характеристик наночастиц будем использовать общие статистические формулы, полученные в рамках двухуровневого молекулярно-статистического

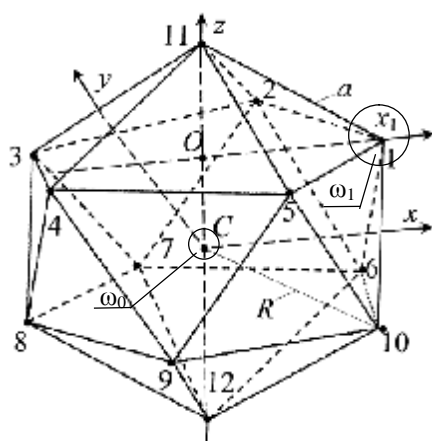


Рисунок 1 – Икосаэдр

подхода [1], который является модификацией метода условных распределений Ротта [2] и используется при описании свойств неоднородных молекулярных систем с помощью потенциалов средних сил. Одночастичные потенциалы, являющиеся функционалами от иско-

мых полей плотности, определяют вид младших условных функций распределения. Они удовлетворяют достаточно сложной системе интегральных уравнений, решение которой требует выполнения

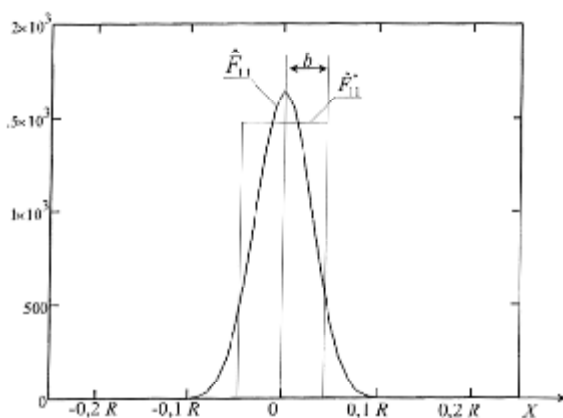


Рисунок 2 – Зависимость функции распределения \hat{F}_{11} от расстояния x при $R=1,12$; R - радиус икосаэдра (рис. 1)

большого объема численных расчетов. Отсутствие аналитического выражения для этих потенциалов создает непреодолимые трудности для последующего их использования при решении соответствующих вариационных задач [3] по определению, например, радиальных профилей плотности для сферических наночастиц. Дальнейшие возможные аналитические преобразования и последующие численные расчеты будем проводить для кристаллических наночастиц в виде икосаэдров (рис. 1) [4]. В этом случае функции распределения молекул

вблизи узлов решетки имеют сильно выраженные максимумы, что позволяет получить приближенные аналитические зависимости для среднего одночастичного потенциала, который будем использовать в качестве удобной аппроксимации для потенциалов средних сил j_{ij} ($i, j = 1, 2 \dots M$ – номера узлов решетки, M – общее число узлов). Для этого нормированные функции \hat{F}_{11} – приближения метода условных распределений, которые имеют резкие пики в окрестности узлов (рис. 2), заменим на функции \hat{F}_{11}^* с равномерным распределением молекул внутри сфер с радиусами b_i . Параметры b_i подбираем так, чтобы среднеквадратичные отклонения s_i от узлов решетки были равны для функций \hat{F}_{11} и \hat{F}_{11}^* :

$$s_i = \sqrt{\int_{w_i} r^2 \hat{F}_{11}(x, y, z) dw_i} = \sqrt{\frac{3}{5}} b_i, \quad (1)$$

$$\text{где } \hat{F}_{11}(\mathbf{r}_i) = A_i \exp\left[-\frac{b_i}{\rho} \sum_{j=1}^M j_{ij}(\mathbf{r}_i)\right]. \quad (2)$$

Здесь $b = \sigma^{-1}$ – обратная температура; \mathbf{r}_i – радиус-вектор молекулы в ячейке w_i по отношению к системе координат, начало которой совмещено с узлом ячейки w_j , а суммирование проводится по всем узлам решетки. Для короткодействующих потенциалов можно ограничиться суммированием по узлам, принадлежащим нескольким ближайшим координационным сферам по отношению к центру ячейки w_i .

Введенная функция \hat{F}_{11}^* позволяет аналитически выполнить усреднение потенциала Леннарда – Джонса, который запишем в безразмерных переменных ($r^* = r/\sigma$ и $\Phi^*(r) = \Phi(r)/\epsilon$, далее звездочки

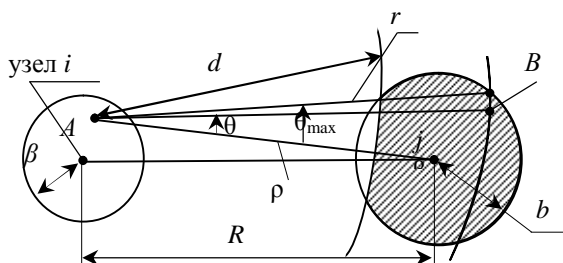


Рисунок 3 – Схема расположения молекул A и B при выполнении усреднения по положениям молекулы B в сфере радиуса b

опускаем; σ и ϵ – параметры потенциала Леннарда – Джонса):

$$\Phi(r) = 4(r^{-12} - r^{-6}). \quad (3)$$

Средний потенциал $j(r)$ находим путем усреднения (3) с учетом корреляции в расположении двух молекул

внутри своих сфер радиусами b и β (рис. 3). Усреднение проводится только по заштрихованной области в ячейке с номером j , т. к. за счет корреляции в распределении этих молекул, они не могут находиться на расстояниях меньше, чем d (d - параметр обрезания, который в дальнейших численных расчетах принимался равным 0,9).

В результате средний потенциал $j(r, b, d)$ вычисляется по формуле

$$j(r, b, d) = n_{ij} \frac{\int_{V_b} \Phi(r) E(r-d) dV_b}{\int_{V_b} E(r-d) dV_b} = n_{ij} \frac{I(r, b, d)|_{r_1}^{r_2}}{V(r, b, d)|_{r_1}^{r_2}}. \quad (4)$$

Здесь n_{ij} - двухячеечные числа заполнения ячеек с номерами i, j ; $E(r-d)$ - единичная ступенчатая функция Хевисайда:

$$E(r-d) = \begin{cases} 0 & \text{при } r \leq d, \\ 1 & \text{при } r > d. \end{cases} \quad (5)$$

После вычисления в сферической системе определенных интегралов по j (от нуля до ρ) и углу φ (от нуля до φ_{\max} , рис. 2), а также неопределенного интеграла по r , получим следующие выражения для $I(r, b, d)$ в числителе и $V(r, b, d)$ в знаменателе формулы (4):

$$I(r, b, d) = 8\rho \int_0^{\rho} \frac{1}{r^2} \frac{\Phi(r^2 - b^2)}{20r} - \frac{r}{9} + \frac{r^2}{16r} \int_0^{\rho} \frac{1}{r^4} \frac{\Phi(r^2 - b^2)}{8r} - \frac{r}{3} + \frac{r^2}{4r} \frac{dr}{r^2}, \quad (6)$$

$$V(r, b, d) = -2\rho \int_0^{\rho} \frac{r^2(r^2 - b^2)}{4r} - \frac{r^3}{3} + \frac{r^4}{8r} dr. \quad (7)$$

После подстановки пределов по координате r , которые зависят от соотношения между расстоянием r и параметрами b и d , получим аналитические выражения для потенциала $j^*(r, b, d) = j(r, b, d)/n_{ij}$:

$$j^*(r, b, d) = \begin{cases} \frac{I(r+b, b, d) - I(r-b, b, d)}{\frac{4}{3}\rho b^3} & \text{при } r \geq b+d; \\ \frac{I(r+b, b, d) - I(d, b, d)}{V(r+b, b, d) - V(d, b, d)} & \text{при } d-b < r < b+d; \\ \Phi(r+b) & \text{при } r \leq d-b. \end{cases} \quad (8)$$

При изучении распределения 13 молекул икосаэдра полагаем $n_{ij}; n_i n_j = 1$ и рассчитываем среднеквадратичное отклонение S_0 для молекулы в его центральной ячейке w_0 и аналогичное отклонение S_1 для молекул, распределенных в двенадцати ячейках w_i ($i = 1, 2, \dots, 12$), центры которых находятся на расстоянии R от центра икосаэдра. Для этого нужно решить систему двух уравнений:

$$\begin{cases} A_0 \int_{w_0} r^2 \exp\left[-\frac{1}{q} \sum_{i=1}^{12} a_{oi}^* (r_i, b_1, d)\right] \frac{\ddot{y}}{\rho} dw_0 = \sqrt{\frac{3}{5}} b_0; \\ A_1 r^2 \int_{w_1} r^2 \exp\left[-\frac{1}{q} \sum_{i=10}^{12} a_{e_i}^* (r_i, b_0, d) + \sum_{i=2}^{12} a_{i_i}^* (r_i, b_1, d)\right] \frac{\ddot{y}}{\rho} dw_1 = \sqrt{\frac{3}{5}} b_1. \end{cases} \quad (9)$$

Наличие аналитических выражений для среднего потенциала позволяет рассчитать с учетом корреляции среднюю энергию двух молекул, распределенных внутри сфер с радиусами b и b (рис. 2):

$$E(R, b, b) = \frac{\int_{R-b}^{R+b} \left[\frac{r^3}{2R} - \frac{(R^2 - b^2)r}{2R} \right] \frac{\ddot{y}}{\rho} \sum_{i=1}^{12} a_{oi}^* (r, b, d) dr}{\int_{R-b}^{R+b} \left[\frac{r^3}{2R} - \frac{(R^2 - b^2)r}{2R} \right] \frac{\ddot{y}}{\rho} V(r, b, d) dr}. \quad (10)$$

С помощью (10) получено выражение для средней энергии икосаэдра с параметрами R, a, b_0, b_1 (a – длина ребра икосаэдра), которая согласно (9) зависит от температуры q :

$$E^*(R, b_0, b_1, q) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{12} a_{oi}^* 2E(R, b_0, b_1) + \sum_{i=2}^{12} a_{i_i}^* E(R_i, b_1, b_1) + E(R_0, b_1, b_0). \quad (11)$$

Результаты численного решения системы (9) и последующего вычисления средней энергии икосаэдра приведены в таблице 1.

В качестве примера на рисунки 4, 5 изображены профили нормированной унарной функции $\hat{F}_{11}(x, y, z)$, определяющей распределение молекулы вблизи узла в центральной ячейке w_0 (рисунок 4) и аналогичной функции для молекулы, распределенной вблизи вершины икосаэдра с координатами x_1, y_1, z_1 (рисунок 5), которая является одной из 12 симметрично расположенных его вершин.

Из рисунка 4 видно, что функция распределения \hat{F}_{11} в централь-

ной ячейке симметрична по отношению к осям x, y, z (рис. 1), причем ее профиль при $x = y = z$ значительно уже, чем для $\hat{F}_{11}(x)$, $\hat{F}_{11}(y)$ и $\hat{F}_{11}(z)$.

Таблица 1 - Среднеквадратичные отклонения s_0, s_1 и энергия E икосаэдра для разных значений его радиуса R и температуры q

q	0			0,3			0,5
	s_0	s_1	E^*	s_0	s_1	E^*	
1,00	0	0	-2,279	Решения не найдены			Решения не найдены
1,05	0	0	-7,689				
1,1	0	0	-9,059	0,042 $b_0 = 0,054$	0,131 $b_1 = 0,169$	-6,143	
1,12	0	0	-9,057	0,047 $b_0 = 0,06$	0,120 $b_1 = 0,155$	-7,282	
1,15	0	0	-8,744	0,056 $b_0 = 0,076$	0,124 $b_1 = 0,160$	-7,518	
1,20	0	0	-7,804	0,076 $b_0 = 0,098$	0,149 $b_1 = 0,193$	-6,952	
1,25	0	0	-6,711	0,096 $b_0 = 0,124$	0,184 $b_1 = 0,237$	-6,095	
1,30	0	0	-5,663	0,115 $b_0 = 0,148$	0,224 $b_1 = 0,289$	-5,238	
1,40	0	0	-3,942	Решение не найдено			

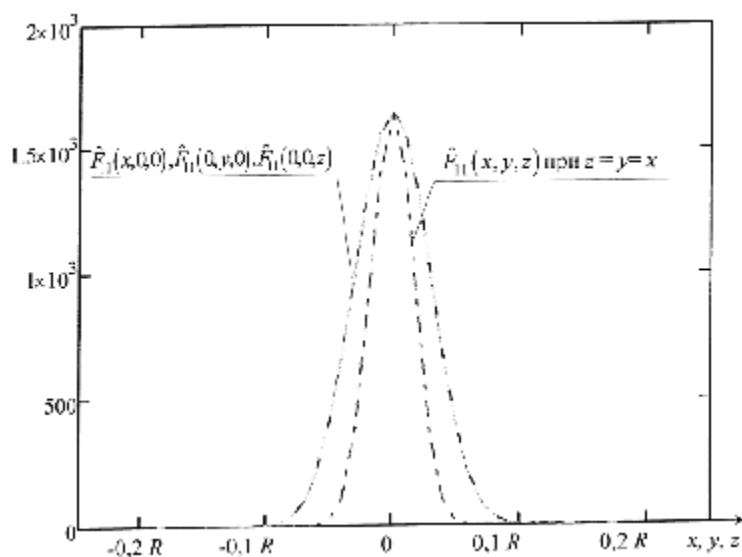


Рисунок 4 – Профили сечений для функции $\hat{F}_{11}(x, y, z)$ в центральной ячейке w_0 при $q=0,3$ и $R = 1,15$

Все аналогичные профили для функции $\hat{F}_{11}(x, y, z)$ в ячейке w_1 , приведенные на рисунке 5, отличаются друг от друга, что указывает на сильно выраженную анизотропию в распределении молекул вблизи 12 периферийных узлов икосаэдра, причем колебания в различных направлениях имеют разные среднеквадратичные отклонения (амплитуды) и разную степень ангармонизма.

Отсутствие решений при температуре $\theta = 0,5$ можно интерпретировать как фазовый переход (при $\theta > 0,3$) кристаллической наночастицы в некоторое другое состояние. В работе [3] для кластера из 13 атомов определена температура плавления, которая оказалась равной 0,58.

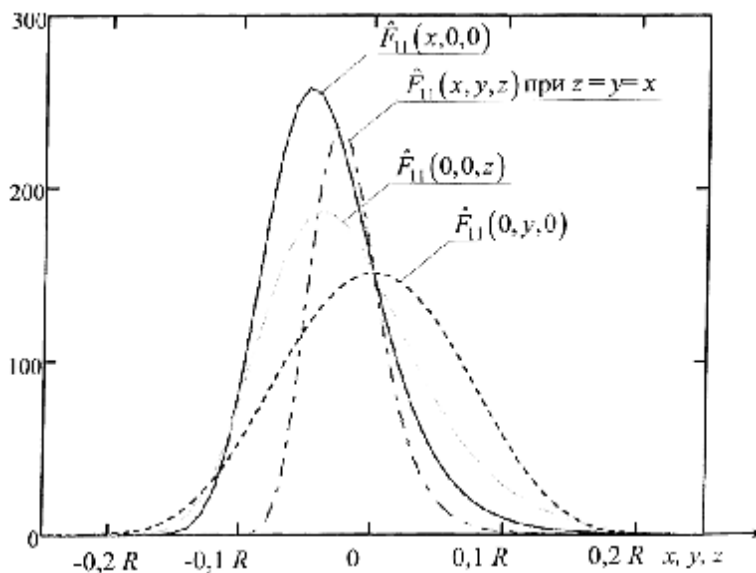


Рисунок 5 – Профили сечений для функции $\hat{F}_{11}(x, y, z)$ в ячейке w_1 при $q=0,3$ и $R = 1,15$

В заключение отметим, что апробированная здесь методика статистического описания структуры наночастицы в форме икосаэдра будет использована в дальнейшем при описании углеродных наночастиц разных размеров и при разных температурах.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Наркевич, И. И. Молекулярно-статистическая теория неоднородных конденсированных сред: дис. ... д-ра физ-мат. наук / И. И. Наркевич. – СПб., 1993. – 223 л.
- 2 Ротт, Л. А. Статистическая теория молекулярных систем. Метод коррелятивных функций условных распределений / Л. А. Ротт. – М., 1979. – 280 с.
- 3 Бокун, Г. С. Применение вариационных методов для описания структурных и термодинамических характеристик наночастиц / Г. С. Бокун, В. С. Вихренко, И. И. Наркевич // Мат. МНК «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов». – Минск, 2015.
- 4 Берри, Р. С. Моделирование конфигурационных переходов в атомных системах / Р. С. Берри, В. М. Смирнов // УФН. - Том. 183, №10. - 2013. – С. 1029-1057.

**ДВУХУРОВНЕВОЕ СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ
РЕЛАКСАЦИИ РЕШЕТКИ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ
КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ НАНОЧАСТИЦЫ**

Для описания структуры наночастиц, находящихся в состоянии равновесия с окружающей их молекулярной средой, воспользуемся общим выражением для конфигурационного интеграла, которое получено вариационным методом [1] в рамках двухуровневого молекулярно-статистического описания неоднородных систем [2]. С его помощью сконструируем приближенное выражение для свободной энергии как функционала от дискретного поля плотности чисел заполнения n_i ячеек метода условных распределений [3] объемами w_i ($i = 1, 2, \dots, M$; M – общее число ячеек, на которые разбивается весь объем V системы из N частиц – атомов или молекул). Для этого вначале запишем соответствующее выражение для плотности свободной энергии однородной молекулярной системы ($n_i = n$, $w_i = w$):

$$f(w, n) = -\frac{q}{V} \ln Q_N \approx \frac{q}{w} (n \ln n + (1-n) \ln(1-n) - n \ln w) - 6n^2 \frac{a}{\epsilon w^3} - \frac{1}{2w^5} \frac{\ddot{\phi}}{\phi} \quad (1)$$

Здесь $q = kT$, первое слагаемое в круглых скобках определяет энтропию, а второе – потенциальную часть внутренней энергии системы с парным взаимодействием, которое описывается с помощью потенциала Леннард - Джонса. Причем считается, что совокупность центров ячеек образует гранецентрированную кубическую решетку, так что каждая ячейка имеет 12 соседей (*приближение ближайших соседей*).

Для определения равновесных значений n и w при заданном значении плотности числа частиц $\gamma = N/V$, выполним варьирование по n с учетом уравнения связи $w = n/\gamma$. В результате получим неявную зависимость n от γ :

$$\gamma = \sqrt{\frac{n^2 a}{3 \epsilon} + \frac{\sqrt{n^2 - q(\ln(1-n) - n)} \ddot{\phi}}{n} \frac{\ddot{\phi}}{\phi}} \quad (2)$$

Из полученной зависимости (2), представленной графически при $q=1,2$ на рис. 1, видно, что значения чисел заполнения n увеличиваются по мере возрастания плотности γ среды. При этом объем ячеек $w = n/\gamma$ увеличивается от значения соответствующего самому плотному состоянию ($w = 1$ при $\gamma = 1/u = 1$, u – молекулярный объем) к предельному значению $w = 1,15$ при $\gamma \rightarrow 0$ (рис. 2).

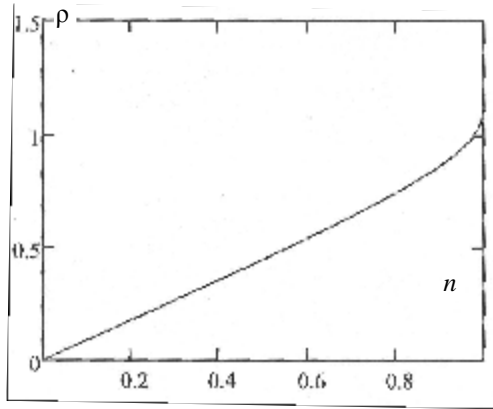


Рисунок 1 – Зависимость плотности ρ от числа заполнения n , при $\theta = 1,2$

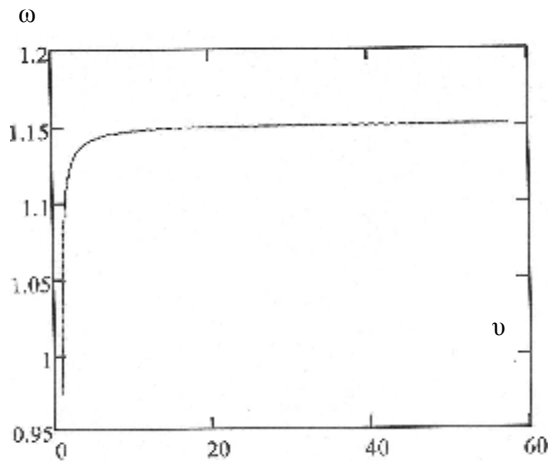


Рисунок 2 – Зависимость объема w отулярного объема v , при $\theta = 1,2$

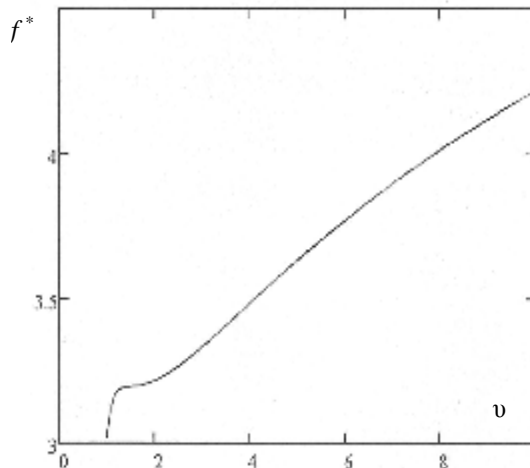


Рисунок 3 – Зависимость свободной энергии $f^*(u)$ от молекулярного объема u

Из графика зависимости свободной энергии $f^*(u)$, приходящейся на одну молекулу

$$f^*(u) = f(w, n) \text{ и } u = f(r)/r, \quad (3)$$

которая представлена на рис. 3, находим параметры двух сосуществующих однородных фаз:

$$r_1 = 0,796, n_1 = 0,847;$$

$$r_2 = 0,147, n_2 = 0,168.$$

Для установления вида профиля плотности в переходной области между плотной и разреженной фазами, который моделирует структуру наночастицы вблизи ее поверхности, перейдем к функционалу свободной энергии, который сконструируем с помощью выражения (1). Для этого примем во внимание изменение чисел заполнения n_k и объемов w_k ($k = 1, 2, \dots, L$) в переходной области с одномерной неоднородностью в направлении оси x . Причем примем, что при $k = 1$ плотность среды $r_1 = 0,796$ ($n_1 = 0,847, w_1 = 1,06$), а при $k = L$ плотность $r_L = 0,147$ ($n_L = 0,168, w_L = 1,147$).

В результате можно записать следующее приближенное выражение для функционала $F\{r_k, n_k\}$ свободной энергии:

$$F\{r_k, n_k\}; \dot{a} \sum_{k=1}^L f_1(w_k, n_k) + 2\dot{a} \sum_{k=1}^{L-1} f_2(w_k, n_k), \quad (4)$$

где

$$f_1(w_k, n_k); q(n_k \ln n_k + (1 - n_k) \ln(1 - n_k) - n_k \ln w_k) - 4n_k^2 \frac{\alpha}{\epsilon} \frac{1}{w^2} - \frac{1}{2w_k^4} \frac{\ddot{\alpha}}{\epsilon} \quad (5)$$

$$f_2(w_k, n_k, w_{k+1}, n_{k+1}); - n_k n_{k+1} \frac{\alpha}{\epsilon} \frac{4}{(w_k + w_{k+1})^2} - \frac{8}{(w_k + w_{k+1})^4} \frac{\ddot{\alpha}}{\epsilon} \quad (6)$$

Значения функции $f_1(w_k, n_k)$, зависящие от плотности $\Gamma_k = n_k/w_k$ в одной ячейке, определяют свободную энергию в *квазилокальном приближении*, а значения функции f_2 , зависящие от параметров среды в двух соседних ячейках, учитывают вклады, которые соответствуют известному *градиентному приближению* в теории неоднородных систем.

Профили n_k и w_k в переходной области получим из условия экстремальности (4) при выполнении условий сохранения числа частиц N системы и ее объема V :

$$\sum_{k=1}^L n_k = N, \quad \sum_{k=1}^L w_k = V. \quad (7)$$

Для получения соответствующего экстремуму функционала (4) равновесного профиля, воспользуемся ранее предложенной методикой численной реализации интегрального алгоритма [1], который осуществляется с помощью выражений, определяющих неравновесные локальные значения химического потенциала μ_k и давления p_k :

$$\mu_k = \frac{\partial f}{\partial n_k} + \frac{\partial f}{\partial n_k} + \frac{\partial f_{2,k-1}}{\partial n_k}, \quad (8)$$

$$p_k = - \frac{\alpha}{\epsilon} \frac{\partial f}{\partial w_k} + \frac{\partial f}{\partial w_k} + \frac{\partial f_{2,k-1}}{\partial w_k} \frac{\ddot{\alpha}}{\epsilon}. \quad (9)$$

Далее для получения равновесных профилей поступаем следующим образом:

1. Задаем исходные неравновесные профили n_k и w_k ($k = 1, 2, \dots, L$), с учетом (7) и по формулам (8, 9) рассчитываем все μ_k и p_k . Используемый здесь алгоритм поиска экстремума осуществляет постепенный переход системы из неравновесного состояния в равновесное. Для этого вводим неравновесный поток I_n числа частиц из ячейки w_k в соседнюю ячейку w_{k+1} через их общую границу:

$$I_n(k) = D_n (\mu_k - \mu_{k+1}). \quad (10)$$

2. Аналогично вводим деформационный «поток»

$$I_w(k) = D_w(p_k - p_{k+1}), \quad (11)$$

которое позволяет осуществлять изменение неравновесных объемов w_k в направлении их равновесных значений.

3. С помощью (10) и (11) находим изменения чисел n_k и объемов w_k для всех k ($k = 1, 2, \dots, L$):

$$Dn_k = I_n(k-1) - I_n(k), \quad (12)$$

$$Dw_k = I_w(k) - I_w(k-1). \quad (13)$$

4. Рассчитываем новые значения чисел n_k^* и w_k^* :

$$n_k^* = n_k + Dn_k, \quad w_k^* = w_k + Dw_k. \quad (14)$$

После выполнения первой итерации процесс аналогичных вычислений повторяется до тех пор, пока не будут найдены равновесные профили.

Следует заметить, что изложенный выше численный алгоритм реализуется при найденных выше значениях параметров однородных сосуществующих фаз на границах искомых зависимостей, т. е. при $k=1$ и $k=L$.

ЛИТЕРАТУРА

1 Бокун, Г. С. Применение вариационных методов для описания структурных и термодинамических характеристик наночастиц / Г. С. Бокун, В. С. Вихренко, И. И. Наркевич // Мат. МНК «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов». – Минск, 2015.

2 Наркевич, И. И. Молекулярно-статистическая теория неоднородных конденсированных сред: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / И. И. Наркевич. – СПб., 1993. – 223 л.

3 Ротт, Л. А. Статистическая теория молекулярных систем. Метод коррелятивных функций условных распределений / Л. А. Ротт. – М., 1979. – 280 с.

**СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ РЕШЕТОЧНОГО ФЛЮИДА
С ПРИТЯЖЕНИЕМ БЛИЖАЙШИХ СОСЕДЕЙ
НА ПЛОСКОЙ КВАДРАТНОЙ РЕШЕТКЕ
С ЗАБЛОКИРОВАННЫМИ УЗЛАМИ**

Рассматриваемая в работе модель представляет собой решеточный флюид на плоской квадратной решетке, некоторая часть узлов которой является заблокированной, т. е. недоступной для примесных частиц флюида. Примесные частицы, занимающие ближайшие соседние узлы, взаимодействуют друг с другом с энергией J .

В работе [1] для данной системы было предложено квазихимическое приближение (КХП). В рамках развитого подхода каждый узел решетки, включая и заблокированные, мог находиться в одном из 3-х состояний, определяемых числами заполнения n_i . При этом $n_i = 1$ соответствовало вакантному узлу, $n_i = -1$ заблокированному узлу, а $n_i = 0$ узлу занятому частицей. Это позволяет записать внутреннюю энергию системы в виде

$$U_N = \sum_{i=1}^N \sum_{j(i)}^z J(1 - n_i^2)(1 - n_j^2), \quad (20)$$

где N – число решеточных узлов; а суммирование по $j(i)$ обозначает суммирование по всем z ближайшим соседям узла i .

Рассмотрение наряду с исходной решеточной системой подобной ей базисной системы, которая определяется одночастичными средними потенциалами, дало возможность записать свободную энергию F , в расчете на один решеточный узел, как сумму свободной энергии базисной системы $F^{(0)}$ и так называемой диаграммной части свободной энергии $F^{(d)}$. При этом второе слагаемое допускает разложение в ряд по перенормированным с помощью одночастичных потенциалов функциям Майера [2].

Квазихимическое приближение в описанном подходе соответствует учету в диаграммном разложении лишь двухузловых графов и приводит к следующим выражениям для свободной энергии [3]

$$\frac{F}{k_B T} = q \ln q + (1 - q - c) \ln(1 - q - c) + c \ln c - \frac{z}{2} \ln Y + \frac{z}{2} (1 - 2c) \ln h, \quad (21)$$

$$\text{где } Y = 0,5 \left(1 + \sqrt{1 + 4c(1 - c)(W - 1)} \right), \quad h = \frac{Y - c}{1 - c}, \quad W = \exp(-bJ), \quad (22)$$

c и θ – концентрации частиц и заблокированных узлов соответственно; $\beta = (k_B T)^{-1}$; k_B – постоянная Больцмана; T – температура.

К характерным свойствам КХП относится тот факт, что в данном приближении диаграммная часть свободной энергии оказывается равной нулю, так же как и вклад всех незамкнутых графов. Соответственно простейший способ уточнения данного приближения состоит в учете первого отличного от нуля слагаемого в разложении диаграммной части свободной энергии, отвечающего простейшему кольцевому графу. В случае плоской квадратной решетки такой граф содержит 4 вершины и 4 связи между ними.

Выражение для свободной энергии принимает вид

$$bF = bF^{KХП} - qd^m, \quad (23)$$

где $F^{KХП}$ – свободная энергия системы в КХП, определяемая соотношением (21); q и m – вес и число вершин в простейшем кольцевом графе (в рассматриваемом в докладе случае плоской квадратной решетки $q = 1$ и $m = 4$);

$$d = \frac{c(1-c)(W-1)}{\gamma^2}. \quad (24)$$

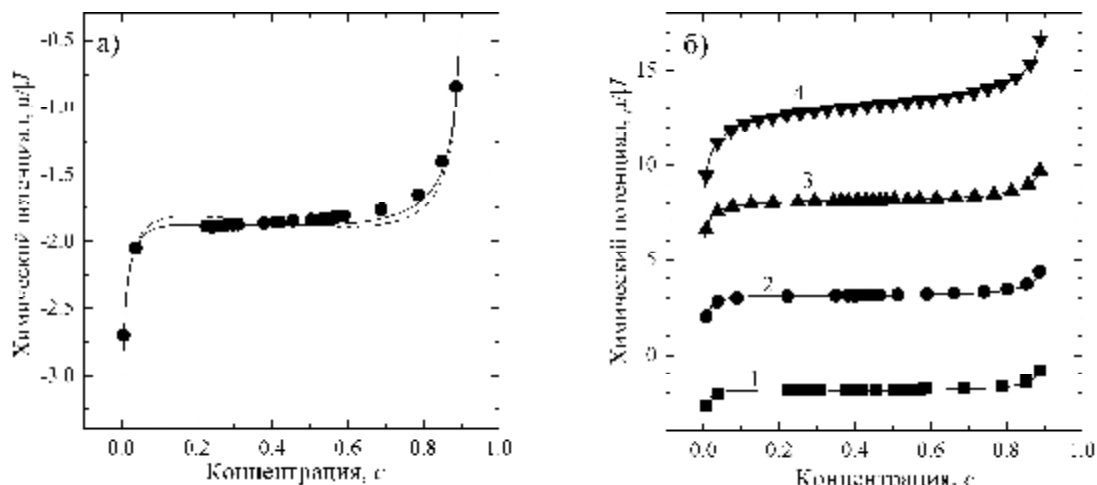
Знание свободной энергии позволяет в дальнейшем определить ее равновесные характеристики: химический потенциал μ , термодинамический фактор χ_T и вероятность $F(1; 1)$ двум ближайшим узлам быть занятыми частицами:

$$b\mu = \frac{\partial (bF)}{\partial c} \frac{\partial}{\partial T}, \quad c_T = \frac{\partial (b\mu)}{\partial \ln c}, \quad F(1; 1) = \frac{2}{z} \frac{\partial (bF)}{\partial J} \frac{\partial}{\partial T}. \quad (25)$$

Компьютерное моделирование равновесных характеристик рассматриваемой решеточной системы по методу Монте Карло (ММК) может быть выполнено в рамках стандартного алгоритма Метрополиса, применение которого к модели решеточного флюида детально описано в работе [4].

Учет частичной блокировки узлов в данном алгоритме сводится к тому, что если в процессе его работы случайным образом выбирается заблокированный узел, то данная попытка выбора не учитывается и выбирается новый узел решетки.

В качестве примера на рисунке 1 представлены зависимости химического потенциала решеточного флюида от концентрации примесных частиц, полученные при различных значениях параметра взаимодействия βJ в квазихимическом приближении и в КХП с учетом первой кольцевой диаграммы.



а) $\beta J = -1,86$; б) $\beta J = -1,86$ (кривая 1), $-1,68$ (2), $-1,47$ (3) и $-0,88$ (4).

Каждая из зависимостей смещена относительно предыдущей на 5 единиц вдоль вертикальной оси для наглядности. Точками представлены результаты моделирования по методу Монте Карло, линиями – теоретические зависимости: пунктирные линии соответствуют квазихимическому приближению, сплошные – КХП с учетом первой кольцевой диаграммы

Рисунок 1 – Зависимость от концентрации химического потенциала решеточного флюида с притяжением ближайших соседей на плоской квадратной решетке при $\theta = 0,10$.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что учет первой кольцевой диаграммы положительным образом сказывается на точности аналитических вычислений, приближая их к результатам компьютерного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1 Аргиракис, П. Термодинамические и структурные свойства решеточного флюида на плоской квадратной решетке с заблокированными узлами: квазихимическое приближение / П. Аргиракис, П. Гиазитидис, Я. Г. Грода // Труды БГТУ. – 2015. – № 6 (179): Физ.-мат. науки и информатика. – С. 48-52.

2 The self-consistent diagram approximation for lattice systems: diffusion properties of interacting lattice gases / G.S. Bokun [et al.] // Physica A. – 2000. – Vol. 296, № 1/2. – P. 83–105.

3 Vikhrenko, V. S. The diagram approximation for lattice systems / V. S. Vikhrenko, Ya. G. Groda, G. S. Bokun // Phys. Let. A. – 2001. – Vol. 286, №2/3. – P. 127–133.

4 Uebing, C. Monte Carlo study of surface diffusion coefficients in the presence of adsorbate-adsorbate interactions / C. Uebing, R.A Gomer // J. Chem. Phys. - 1991. - Vol. 95, №10. - P. 7626 - 7652.

УДК 537.633.2

В. Р. Мадьяров, доц., канд. физ.-мат. наук (БГТУ, г. Минск)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ В СВЧ – ИЗМЕРЕНИЯХ НА ОСНОВЕ
КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА**

Методы СВЧ – диагностики полупроводников позволяют определить проводимость и подвижность носителей заряда [1, 2], а также такие фундаментальные параметры электронного переноса, как эффективная масса [3] и время релаксации t , которое можно определить из частотной зависимости фазового сдвига в области частот ω , где значение параметра $\omega t \sim 1$ [4].

Применение упрощенной модели переноса заряда показали возможность оценки времени релаксации из измерений диэлектрической проницаемости [4]. Результативность применения СВЧ-метода измерений параметров электронного переноса в полупроводниках можно повысить, используя более фундаментальный подход к обработке данных измерений. В настоящей работе для интерпретации данных холловских измерений и измерений времени релаксации с помощью СВЧ-интерферометрии применяется модель переноса носителей заряда на основе кинетического уравнения Больцмана. Применение данной модели в измерениях времени релаксации оказывается предпочтительным, если требуется сравнительно невысокая точность, так как отпадает необходимость создания достаточно сильного продольного магнитного поля в области образца.

Электромагнитная волна с напряженностью электрического поля E_x , выходящая из секции волновода, возбуждает в образце, помещенном в магнитное поле с индукцией \dot{B} , холловское поле с напряженностью E_y , которое регистрируется датчиком. Электрические поля E_x и E_y возбуждают токи в образце, которые можно выразить через параметры электронного переноса.

Для описания переноса носителей заряда под действием электрического поля волны используется уравнение Больцмана для функции распределения носителей заряда f в пространстве волновых векторов \dot{k} , которое в приближении сферических энергетических долин имеет вид:

$$e(\dot{E} + \dot{u} \times \dot{B}) \times \frac{\dot{r}}{\hbar} \tilde{N}_k f(k, r) = - \frac{f - f_0}{t} \quad (1)$$

где e – элементарный заряд, \dot{E} – напряженность электрического поля

волны с частотой ω , $\dot{E} = \dot{E}_0 e^{i\omega t}$, \dot{u} – скорость дрейфа носителей, \dot{B} – магнитная индукция, f_0 – равновесная часть функции распределения, t – время релаксации.

Для решения уравнения (1) использовалась подстановка [5]:

$$f = f_0 - \dot{u} \times \dot{y} \frac{\nabla f_0}{\nabla W}. \quad (2)$$

Второе слагаемое в (2) представляет собой неравновесную часть функции распределения, содержащую производную f_0 по энергии W . Подставив (2) в (1) и, получим выражение для проекций вектора \dot{y} через проекции E_x и E_y :

$$y_x = \frac{t \nabla [E_x + (\omega_c t \nabla E_y)]}{1 + (\omega_c t \nabla)^2}, \quad y_y = \frac{t \nabla [- (\omega_c t \nabla E_x + E_y)]}{1 + (\omega_c t \nabla)^2}, \quad (3)$$

где m^* – эффективная масса носителя заряда, $\omega_c = eB/m^*$ – циклотронная частота.

Плотность тока носителей заряда, находится путем интегрирования неравновесной части функции распределения (2) по всем энергетическим долинам, которые вносят вклад в проводимость:

$$\dot{j} = - \frac{e}{4\pi^3} \dot{u} (\dot{u} \times \dot{y}) \frac{\nabla f_0}{\nabla W} dV_k, \quad (4)$$

где dV_k – элемент объема в k -пространстве.

Подстановка (2) в (3) и использование (4) дает соотношения между проекциями суммарной плотности тока j_x и j_y (тока проводимости и смещения) и E_x и E_y , из которых для слабых магнитных полей следует выражение для холловской подвижности:

$$\mu_H = \frac{1}{B} \frac{|s_y|}{\text{Re}(s_x)}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что для определения холловской подвижности достаточно измерить проводимость образца в направлении, лежащем в плоскости колебаний электрического поля зондирующей волны (s_x), и в направлении перпендикулярном к нему (s_y). Если предположить, что время релаксации одинаково для всех энергетических долин и не зависит от энергии носителей, т.е. $\tau = \tau_0$, то μ_H не зависит от частоты электрического поля падающей волны:

$$\mu_H = e t_0 \frac{\dot{a}^k}{1} \frac{n_k}{m_k^{*2}} \times \frac{\dot{a}^k}{\dot{e}^k} \frac{n_k}{m_k^*} \frac{\ddot{o}^{-1}}{\ddot{o}}. \quad (6)$$

Зависимость τ от энергии носителей можно оценить по частотной зависимости $\mu_H(\omega\tau)$ в области частот, где $\omega\tau \sim 1$. На рис. 1 пред-

ставлены расчетные зависимости отношения $\mu_H(\omega\tau)/\mu_H(0)$: ($\mu_H(0)$ – значение подвижности на постоянном токе) для n -Ge в предположении зависимостей $\tau = \tau_0(W/kT)^{-1/2}$ (кривая 1) и $\tau = \tau_0(W/kT)^{-1}$ (кривая 2).

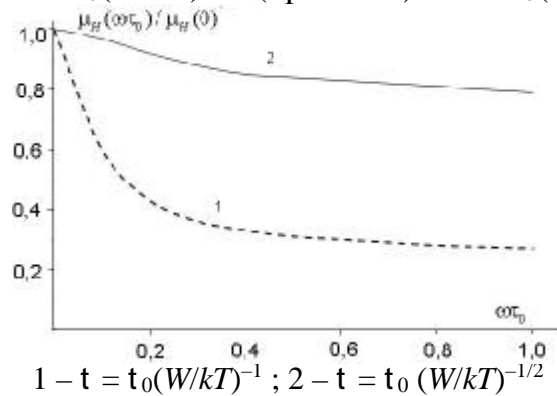


Рисунок 1 – Сравнение расчетных зависимостей холловской подвижности для n -Ge от параметра ωt_0 ($t_0 = 3 \cdot 10^{-12}$ с) с использованием зависимостей от энергии

При $B = 0$ из кинетических соотношений следует выражение для диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon = \epsilon_{cm} \frac{1}{1 + [\epsilon_0 \omega / e^2 L(\omega)]^2}, \text{ где } L(\omega) = \frac{4}{3\sqrt{\rho}} \left\langle \frac{t}{1 + i\omega t} \right\rangle \dot{a}_k \frac{n_k}{m_k}. \quad (7)$$

а ϵ_{cm} – диэлектрическая проницаемость на постоянном токе.

Экспериментальная проверка формулы (7) проводилась на СВЧ-интерферометре, с помощью метода фазовой компенсации [4] в области частот 30–80 ГГц для n -Ge. Результаты представлены на рис.2.

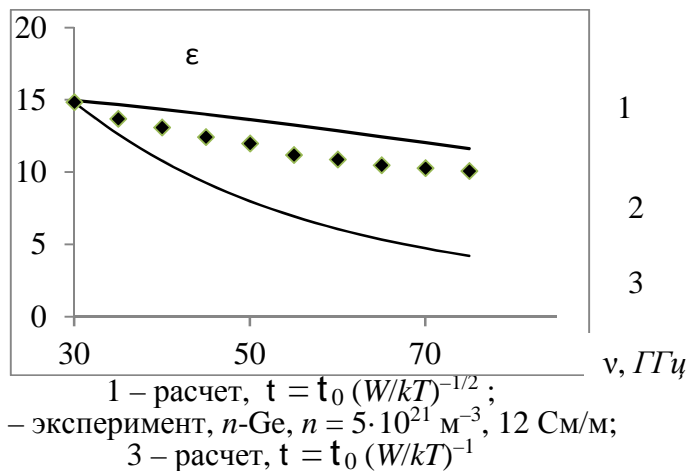


Рисунок 2 – Сравнение расчетных и измеренных зависимостей диэлектрической проницаемости от частоты

Данные для диэлектрической проницаемости в исследуемой частотной области удовлетворительно согласуется с расчетной кривой, полученной с использованием формулы (7) для энергетических зависимостей $t = t_0(W/kT)^{-1}$ (1) и $t = t_0(W/kT)^{-1/2}$. Первая из кривых получена в

предположении, что основным механизмом, влияющим на время релаксации, является рассеяние на акустических колебаниях решетки. С учетом того, что в зоне проводимости Ge энергетические поверхности представлены 8 эллипсоидами, для расчетов использовалось значение суммы, равное:

$$\mathring{a}_k (n_k / m_k^*) = (n/3)(2/m_p + 1/m_\lambda). \quad (8)$$

В формуле (8) n – суммарная концентрация электронов, m_p и m_λ – продольная и поперечная эффективные массы электронов ($m_p = 0,082 m_0$, $m_\lambda = 1,59 m_0$). Заметное отклонение экспериментальных данных от расчетной кривой очевидно обусловлено дополнительным вкладом рассеяния носителей на ионах и атомах примесей и дислокациях.

Таким образом, на основе решения кинетического уравнения Больцмана получены выражения для холловской подвижности и диэлектрической проницаемости в СВЧ-области через параметры зонной структуры полупроводника. Холловскую подвижность можно определить, измерив проводимости плоского полупроводникового образца в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Показано, что для образца n -Ge наблюдается удовлетворительное соответствие результатов расчета диэлектрической проницаемости по кинетической модели и данных, полученных из измерений фазового сдвига в области частот 30–80 ГГц. Путем сравнения данных измерений диэлектрической проницаемости ϵ в области частот $\omega t \sim 1$ с расчетной частотной характеристикой $\epsilon(\omega)$ дана оценка энергетической зависимости времени релаксации носителей в образце.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Broadband complex permittivity measurement techniques of materials with thin configuration at microwave frequencies / Murata Kenichiro [et al.] // J. Appl. Phys. – 2005, – Vol. 98, № 8. – P. 084107/1–084107/8.
- 2 Excess carrier lifetime measurement for plasma-etched GaN by the microwave photoconductivity decay method / Hideki Watanabe [et al.] // Jap. J. Appl. Phys., Pt. 1. – 2007, – vol. 46, № 1, – P. 35–39.
- 3 Мадьяров, В. Р. Определение параметров переноса носителей заряда в полупроводниках с помощью СВЧ-зондирования / В. Р. Мадьяров // Труды БГТУ. 2012. № 6. С. 88–90.
- 4 Мадьяров, В. Р. Исследование релаксационных свойств полупроводников с помощью интерферометрии миллиметрового диапазона / В. Р. Мадьяров // Труды БГТУ. № 6. 2013. С. 54–56.
- 5 Ансельм, А. И. Введение в теорию полупроводников / А. И. Ансельм // М.: Наука, 1978.

А. В. Дорожко, доц., канд. техн. наук;

В. В. Поплавский, доц., канд. физ.-мат. наук (БГТУ, г. Минск)

СТЕНД ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ МЕМБРАННО-ЭЛЕКТРОДНЫХ БЛОКОВ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Одним из направлений развития альтернативной энергетики является использование водорода в качестве энергоносителя. Перспективы развития водородной энергетики предполагают производство водорода, его хранение, распределение и использование для выработки электрической энергии с применением топливных элементов. Топливные элементы вырабатывают электроэнергию за счет окислительно-восстановительных превращений реагентов, поступающих извне; топливо и окислитель раздельно и непрерывно подводятся к электрохимической ячейке и реагируют на двух электродах. В топливном элементе химическая энергия топлива превращается непосредственно в электроэнергию. К числу достоинств топливных элементов относятся высокий КПД, низкая токсичность продуктов реакции, бесшумность, возможность создания модульной конструкции для достижения большой мощности. Наиболее перспективными для широкого применения на транспорте и в стационарных установках небольшого размера являются низкотемпературные топливные элементы с полимерным мембранным электролитом. Основное препятствие на пути их широкомасштабного использования – пока еще высокая стоимость по сравнению с традиционными устройствами, вырабатывающими энергию.

Наиболее разработаны водородные топливные элементы. В последнее время интенсивно ведутся исследования по созданию топливных элементов с прямым окислением органических спиртов (метанола и этанола) (DMFC – Direct Methanol Fuel Cells; DEFC – Direct Ethanol Fuel Cells). Применение органических топлив вместо водорода позволяет снять проблему получения водорода (ионы H^+ образуются в процессе электрохимического окисления топлива), его очистки, хранения и распределения, упростить систему подачи топлива.

Основным функциональным компонентом топливного элемента с полимерным мембранным электролитом является мембранно-электродный блок. Он состоит из ионопроводящей мембраны и контактирующих с ней диффузионных слоев из пористых металлических или специальных углеродных материалов с развитой поверхностью, через которые осуществляются подвод топлива и окислителя, токосъем, а также отвод продуктов электрохимической реакции. Диффузионные слои с нанесенными каталитическими металлами одновре-

менно являются электрокатализаторами соответственно катодной и анодной реакций. Мембранно-электродный блок размещается между электродами с каналами для подачи топлива в анодное пространство и окислителя в катодное, что и составляет ячейку топливного элемента [1].

Нами разработаны и сформированы электрокатализаторы окисления метанола и этанола на основе диффузионных слоев из углеродных носителей AVCarb[®] Carbon Fiber Paper P50 и Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T с применением ресурсосберегающей технологии ионно-ассистируемого осаждения (IBAD – Ion Beam Assisted Deposition) платины и активирующих добавок из плазмы вакуумного электродугового разряда в режиме, при котором в качестве ассистирующих процессу осаждения используются ускоренные ионы осаждаемого металла [2–4]. Изготовлены экспериментальные образцы мембранно-электродных блоков на основе электрокатализаторов и полимерного мембранного электролита DuPont[™] Nafion[®] N 115, а также токовые коллекторы – электроды с серпантинными каналами. Осуществлена сборка ячейки топливного элемента.

Для определения характеристик созданных электрокатализаторов и мембранно-электродных блоков на их основе в режиме работы топливного элемента разработан и изготовлен специальный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 1. Ячейка топливного элемента размещается в массивном алюминиевом стакане, на поверхности которого расположен резистивный спиральный нагреватель. Стакан помещается в воздушный термостат, стенки которого изнутри покрыты пенополиуретановой теплоизоляцией. Входы и выходы каналов токовых коллекторов ячейки соединены со штуцерами на крышке термостата.

Топливо, в качестве которого используются водные растворы 1 М СН₃ОН или 1 М С₂Н₅ОН, заливается в бак и через кран, регулирующий его расход, непосредственно поступает в анодное пространство ячейки. Окислителем является кислород, который содержится в воздухе. Воздух сжимается компрессором до давления 6 бар и через редуктор, понижающий его давление до 2 бар, поступает в блок управления и индикации. Здесь происходит его фильтрация и осушение, а также при помощи дросселя устанавливается необходимый расход. После подготовки воздух подается в катодное пространство ячейки топливного элемента. Нагрев ячейки в термостате до рабочей температуры производится резистивным нагревателем. Рабочая температура устанавливается и контролируется посредством терморегулятора, снабженного цифровым индикатором.

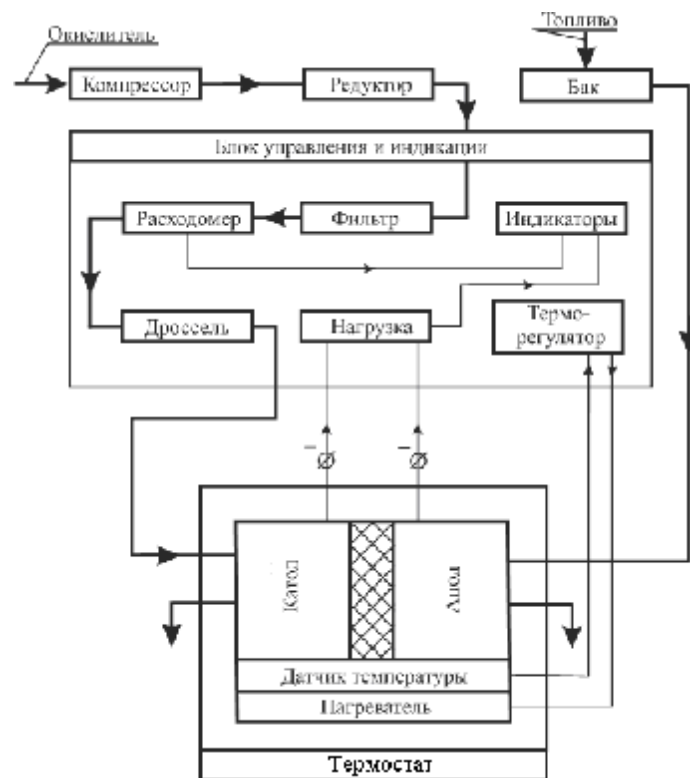


Рисунок 1 – Блок-схема стенда для определения характеристик мембранно-электродных блоков топливных элементов

При работе топливного элемента топливо и окислитель под давлением проходят через серпантинные каналы токовых коллекторов и через пористые углеродные диффузионные слои поступают к поверхностям полимерного мембранного электролита, обладающего проводимостью по ионам H^+ . В результате электрохимической реакции образуется ЭДС, вызывающая электрический ток в цепи нагрузки. Отработанное топливо сливается в мерную емкость, а окислитель выходит в атмосферу.

Контроль технологических параметров процесса преобразования энергии проводится различными методами. Расход топлива в стационарном рабочем режиме вычисляется путем деления объема топлива, прошедшего через ячейку, на время наполнения мерной емкости. Расход воздуха измеряется датчиком фирмы Honeywell AWM3200V с диапазоном измерения $0-200 \text{ см}^3/\text{мин}$. Принцип работы датчика основан на изменении его электрических параметров при переносе теплоты потоком газа. При измерении используются вольтметр с диапазоном измерения $0-5 \text{ В}$ и градуировочная характеристика датчика. Задание рабочей температуры осуществляется электронным терморегулятором с интегральным цифровым термометром DS18B20, датчик которого закреплен на внешней поверхности анода ячейки. Значение силы тока в цепи нагрузки топливного элемента при снятии нагрузочных характеристик устанавли-

вается с помощью магазина сопротивлений. Для измерения напряжения и силы тока используются два цифровых вольтметра В7-73/2.

Как показал эксперимент, все перечисленные технологические параметры оказывают существенное влияние на электрическую мощность, вырабатываемую топливным элементом.

ЛИТЕРАТУРА

1 Basu, S. Fuel cell systems/ S. Basu // Available at: <http://web.iitd.ac.in/~sbasu/FC-Descrip.pdf> (accessed: 14.04.2013).

2 Poplavsky, V.V. Microstructure and Composition of Catalytic Layers Formed by the Ion-Beam-Assisted Deposition of Platinum onto Carbon Substrates / V.V. Poplavsky, A.V. Dorozhko // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2013. – Vol. 7, No. 2. – P. 303–309.

3 Поплавский, В. В. Исследование активных слоев электрокатализаторов окисления метанола и этанола, формируемых с применением технологии ионно-ассистированного осаждения / В. В. Поплавский, А. В. Дорошко, В. Г. Матыс // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 10/3. – С. 216–221.

4 Poplavsky, V.V. Ion Beam Formation of Electrocatalysts for Direct Methanol and Ethanol Fuel Cells / V. V. Poplavsky, A. V. Dorozhko, V. G. Matys // 5th International Conference on Radiation Interaction with Materials: Fundamentals and Applications. Kaunas, Lithuania, May 12–15, 2014. Program and materials // Kaunas University of Technology, Vytautas Magnus University, et al. – Kaunas: Technologia, 2014. – P. 104–107.

УДК 539.213.2

А. В. Мисевич, доц., канд. физ.-мат. наук;
А. Е. Почтенный, доц., канд. физ.-мат. наук;
С. А. Климович, магистрант (БГТУ, г. Минск)

ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В ПЛЕНКАХ ФТОРЗАМЕЩЕННОГО ФТАЛОЦИАНИНА МЕДИ

Тонкопленочные структуры, способные изменять свою проводимость под действием внешних факторов, широко применяются в качестве чувствительных элементов газовых сенсоров. Среди материалов, используемых при создании таких чувствительных элементов, особое место занимают металлфталоцианины, которым можно придать селективность к тому или иному газу, замещая атомы водорода в молекуле различными функциональными группами. Кроме того газовые сенсоры на основе металлфталоцианинов работают при более низких температурах по сравнению с наиболее распространенными металлооксидными сенсорами.

Замещение атомов водорода высокоотрицательными атомами фтора должно приводить к существенному изменению электрических и газочувствительных свойств металлфталоцианина. Цель данной работы – изучить влияние адсорбированного из воздуха кислорода на прыжковую проводимость фторзамещенного фталоцианина меди (CuPcF_{16}).

Для получения пленок CuPcF_{16} использовался метод термического распыления в вакууме из молибденовой лодочки. Для изучения электрических свойств пленки осаждались на поликоровые подложки размером 1×3 см. Остаточное давление во время осаждения пленок составляло не более $5 \cdot 10^{-4}$ Па. В процессе осаждения температура подложек была комнатной. На подложки была предварительно нанесена система встречно-штыревых никелевых электродов, которая позволяет существенно уменьшить сопротивление образцов пленок. Толщина осаждаемых пленок составляла 30–40 нм. Для контроля скорости осаждения пленок использовался кварцевый резонатор.

Экспериментальное исследование проводимости на постоянном токе пленок CuPcF_{16} осуществлялось методом вольтметра-амперметра в вакууме (10^{-2} Па) в диапазоне температур 70–160°C. При этом применялся метод циклической термодесорбции. Суть этого метода состоит в следующем. Нагревание образца в вакууме до некоторой температуры уменьшает концентрацию адсорбированного пленкой кислорода до какого-то фиксированного уровня. Дальнейшее охлаждение образца в вакууме от этой температуры позволяет измерить температурную зависимость проводимости при неизменной концентрации кислорода в пленке. Нагревание образца до все более высоких температур и измерение температурных зависимостей проводимости при охлаждении от этих температур позволяет получить набор температурных зависимостей проводимости, соответствующих различным концентрациям адсорбированного в пленке кислорода.

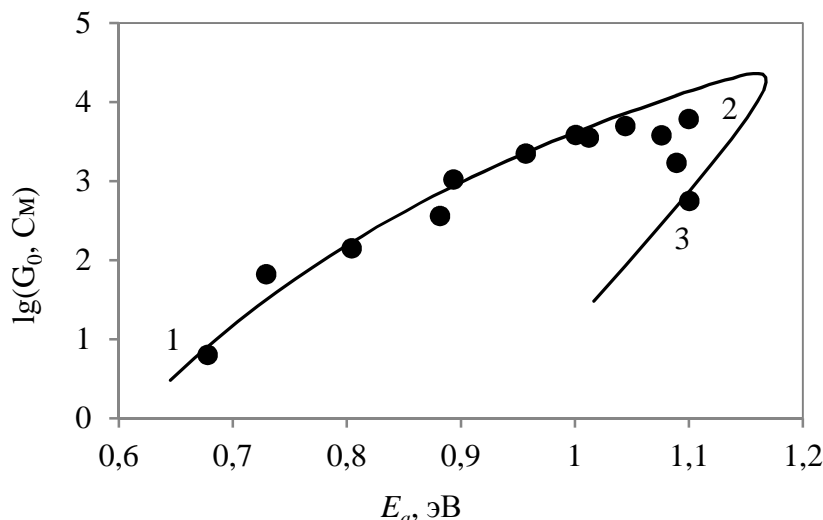
Полученные для фторзамещенного фталоцианина меди зависимости проводимости G от температуры T имеют активационный характер, т. е. подчиняются уравнению

$$G = G_0 \exp \left\{ - \frac{E_a}{kT} \right\} \quad (26)$$

где G_0 – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации; k – постоянная Больцмана.

Для каждой температурной зависимости были вычислены значения E_a и G_0 . Результаты представлены на рисунке 1. Тот факт, что в процессе термодесорбции кислорода энергия активации проводимо-

сти пленок CuPcF_{16} существенно изменялась, указывает на прыжковый механизм электропереноса в этом материале.



точки 1, 2, 3 – экспериментальные данные;

— — расчет по двухуровневой модели прыжковой проводимости

Рисунок 1 – Взаимосвязь между предэкспоненциальным множителем прыжковой проводимости и энергией активации проводимости пленки CuPcF_{16}

Качественное и количественное описание полученных для CuPcF_{16} результатов было выполнено на основе двухуровневой модели прыжковой проводимости [1]. Согласно этой модели, перенос электронов в пленках CuPcF_{16} может осуществляться как по собственным состояниям с концентрацией n_1 и радиусом локализации a_1 , так и по примесным – с концентрацией n_2 и радиусом локализации a_2 . Примесное состояние образуется при связывании молекул кислорода молекулами фталоцианина, в результате чего возникающее примесное состояние отщепляется от набора собственных электронных состояний, т. е.

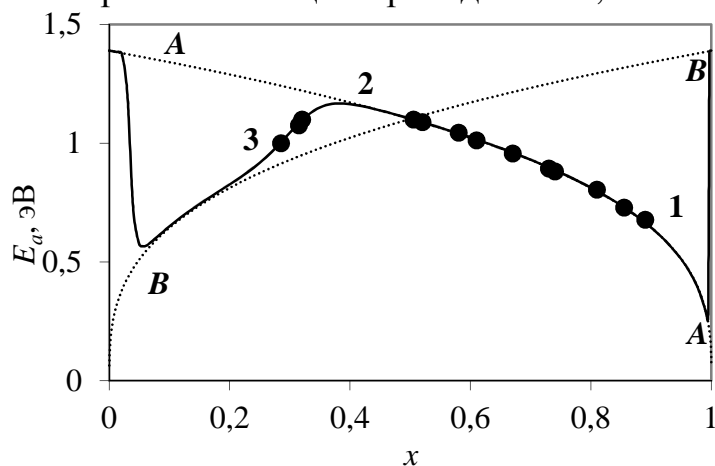
$$n_1 + n_2 = n = \text{const}, \quad (2)$$

где n – концентрация центров локализации в материале без примесей.

Результаты сопоставления экспериментальных данных с расчетами по двухуровневой модели прыжковой проводимости позволили получить для CuPcF_{16} зависимость, представленную на рисунке 1 в виде сплошной линии. При расчетах использовались значения $a_1 = 190$ пм, $a_2 = 120$ пм, $n = 9 \times 10^{26} \text{ м}^{-3}$, наилучшим образом описывающие экспериментальные данные. По мере десорбции кислорода вначале (интервал 1–2 на графике) наблюдается увеличение как E_a , так и вероятности нерезонансного туннелирования электронов (предэкспоненциального множителя G_0), что соответствует увеличению концентрации центров локализации, обеспечивающих прыжковый электро-

перенос. Затем, по достижении некоторой критической концентрации адсорбированного кислорода (точка 2 на графике), дальнейшее уменьшение этой концентрации уменьшает значения E_a и G_0 (интервал 2–3), то есть концентрация центров локализации уменьшается. Тот факт, что для CuPcF_{16} экспериментально полученные данные (точки на графике) согласуются с расчетами по двухуровневой модели прыжковой проводимости (сплошная линия на графике), указывает на прыжковый механизм электропереноса в этом материале.

Приведенные на рисунке 1 экспериментальные и расчетные данные можно пояснить, используя рисунок 2, на котором $x = n_2/n$ – относительная концентрация адсорбированных молекул кислорода. При высоких начальных концентрациях адсорбированного кислорода (точка 1 на рисунке 2) проводимость и ее энергия активации обусловлены переносом электронов по собственным состояниям. Десорбция кислорода уменьшает количество примесных состояний и, соответственно, увеличивает количество собственных состояний, что приводит к росту энергии активации проводимости и предэкспоненциального множителя G_0 (участок 1–2 на рисунке 2). При концентрации кислорода, соответствующей точке 2 на рисунке, происходит перезахват уровня Ферми примесными состояниями, перенос электронов по которым и вносит основной вклад в проводимость пленок при дальнейшем уменьшении концентрации адсорбированного кислорода (участок 2–3 на рисунке 2). При этом дальнейшая десорбция кислорода уменьшает как энергию активации проводимости, так и величину G_0 .



точки 1, 2, 3 – экспериментальные данные;
 - - - - - расчет с учетом только собственных состояний (A–A) и с учетом только примесных состояний (B–B); ————— расчет по двухуровневой модели прыжковой проводимости

Рисунок 2 – Зависимость энергии активации проводимости пленки CuPcF_{16} от доли примесных центров локализации

Таким образом, установлено, что в пленках фторзамещенного

фталоцианина меди реализуется прыжковый механизм проводимости, причем в зависимости от концентрации адсорбированного кислорода, проводимость может осуществляться либо по собственным состояниям, либо по примесным состояниям кислорода, при этом примесные уровни лежат по шкале энергий ниже собственных; определены значения радиусов локализации собственных и примесных состояний и концентрация центров локализации в материале без примесей. Впервые определены микроскопические параметры прыжковой проводимости в CuPcF_{16} – радиусы локализации собственных и примесных состояний и концентрация состояний в материале без примесей. Замещение в молекулах фталоцианина меди атомов водорода атомами фтора приводит к появлению примесной проводимости при низкой концентрации адсорбированного кислорода.

ЛИТЕРАТУРА

1 Почтенный, А. Е. Влияние адсорбированного кислорода на проводимость пленок фталоцианина свинца / А. Е. Почтенный, А. В. Мисевич // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29. – С. 56 – 61.

УДК 539.213.2

Русак Л. Д., магистрант;
Почтенный А. Е., доц., канд. физ.-мат. наук;
Мисевич А. В., доц., канд. физ.-мат. наук, (БГТУ, г. Минск)
misevich@rambler.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛЕНОК ФТОРЗАМЕЩЕННОГО ФТАЛОЦИАНИНА МЕДИ ДЛЯ СЕНСОРА КОНТРОЛЯ АММИАКА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСАХ

Целью работы является установление влияния адсорбции аммиака на проводимость пленок ряда фталоцианинов.

В данной работе исследовались пленки фталоцианина меди (CuPc), фталоцианина свинца (PbPc) и фторзамещенного фталоцианина меди (CuPcF_{16}), которые были нанесены по подложки из поликора со встречно-штыревой системой электродов.

Измерения проводились следующим образом: на образец, помещенный в измерительную ячейку, подавали напряжение 15 В, через 60 секунд после подачи напряжения через измерительную ячейку начинали прокачивать смесь аммиака с воздухом, прокачка продолжалась 5 минут, после чего через ячейку начинали прокачивать воздух без аммиака. Смесь воздух – аммиак была получена продуванием воздуха через раствор аммиака. Измерение токов проводилось электрометром с интервалом в 20 секунд. В ходе измерений было установле-

но, что определению аммиака в газовой смеси мешают пары воды, поэтому получаемая газовая смесь осушалась.

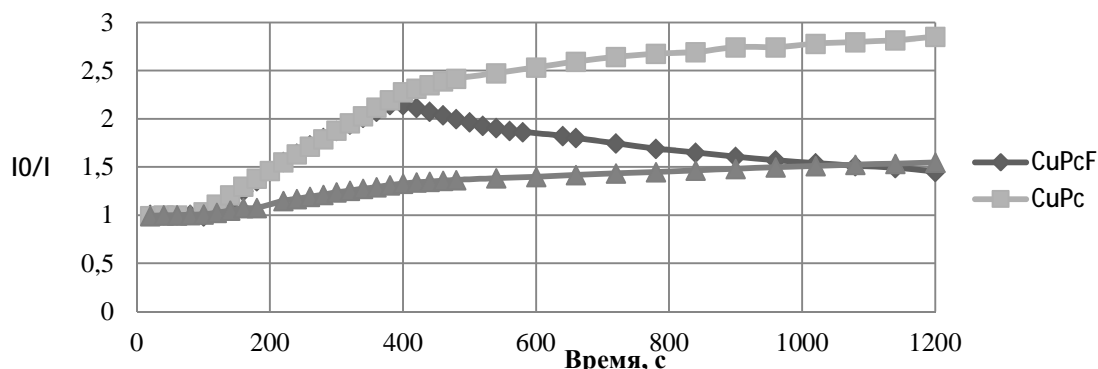
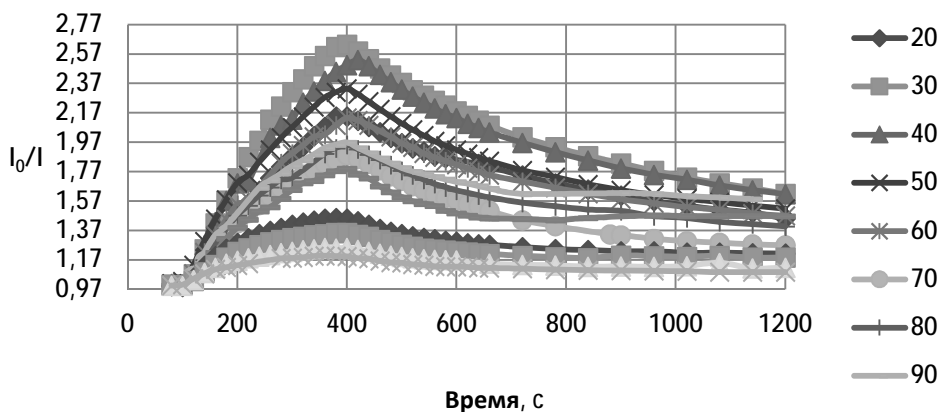


Рисунок 1 – Характеристика отклика на аммиак фталоцианинов

На рисунке 1 показано, что обратимый отклик на аммиак имеется только у CuPcF_{16} , поэтому в дальнейшем в исследованиях использовались только пленки CuPcF_{16} .

Известно, что температура оказывает влияние на динамику процессов адсорбции/десорбции, вместе с тем проводимость фталоцианинов зависит от температуры экспоненциально. Поэтому измерения были произведены при разных температурах, но с одинаковыми концентрациями аммиака, для выявления температуры соответствующей наибольшей чувствительности к адсорбции аммиака (рисунок 2).



(температура указана в °C)

Рисунок 2 – Температурные зависимости отклика

Как показано на рисунке 2, наибольший отклик достигается при 30 °C и с ростом температуры уменьшается. Измерения не производились выше 150 °C во избежание деструкции пленок.

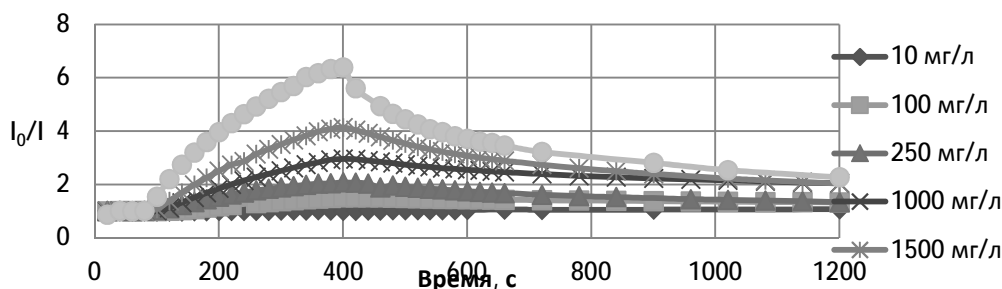


Рисунок 3 – Концентрационные зависимости отклика на аммиак

Измеренные концентрационные зависимости отклика пленок от концентрации раствора аммиака представлены на рисунке 3. Измерения концентрационных зависимостей производились при температуре 50°C, для уменьшения влияния колебаний температур окружающей среды. С ростом концентрации аммиака возрастает отклик, поэтому проведя большое количество измерений при разных концентрациях аммиака, была получена зависимость максимального отклика пленки (при этом наблюдается минимальное значение силы тока) от концентрации аммиака (рисунок 4).

В ходе изучения зависимости адсорбционно-резистивного отклика от концентрации раствора аммиака (рисунок 4), была получена аппроксимирующая зависимость (1), достоверность аппроксимации – $R^2 = 0,927$:

$$y = 0,392x^{0,306} \quad (1)$$

где $y = I_0/I$, $x = C_p$ (C_p – концентрация аммиака в растворе, мг/л).

Из выражения (1) получаем:

$$C_p^{0,306} = 2,551 I_0/I \quad (2)$$

где I_0 – значение силы тока в начальный момент подачи смеси воздуха с аммиаком, А; I – значение силы тока через 5 минут после начала подачи смеси воздуха с аммиаком, А.

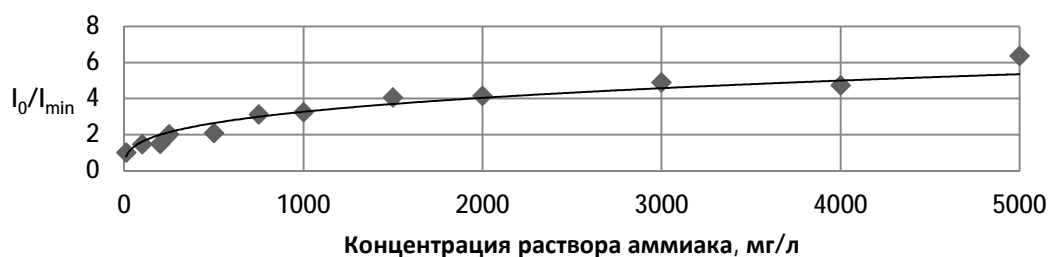


Рисунок 4 – Зависимость адсорбционно-резистивного отклика от концентрации раствора аммиака

Для определения содержания аммиака в газовой смеси была использована методика определения концентрации аммиака фотоколометрическим методом с реактивом Несслера.

Методика основана на образовании окрашенного в желтый цвет соединения при взаимодействии аммиака с реактивом Несслера и последующем измерении содержания аммиака фотоколориметрическим методом. Для построения градуировочной зависимости были приготовлены стандартные растворы, по результатам фотоколориметрии которых была получена зависимость оптической плотности от содержания аммиака.

Зависимость оптической плотности от содержания аммиака:

$$D = 0,072 \times m - 0,021 \quad (3)$$

где m – содержание аммиака в пробе, мкг.

Концентрация аммиака в газовой смеси определяется по выражению (4):

$$C = 1,2 \times m / V_0 \quad (4)$$

где V_0 – объем газовой пробы приведенный к нормальным условиям, дм^3 ; коэффициент 1,2 получен отношением объема примененного поглотительного раствора (6 мл) к объему пробы используемой для определения содержания аммиака (5 мл).

$$V_0 = V \times 273 \times P / 760 \times (273 + t) \quad (5)$$

где V – объем газа при условиях отбора, дм^3 ; P – атмосферное давление, мм рт. ст.; t – температура газа, $^{\circ}\text{C}$.

После измерения концентрации аммиака в газовой смеси при заданных концентрациях раствора аммиака, была получена аппроксимирующая зависимость (достоверность аппроксимации – $R^2 = 0,924$), выразив из которой значение концентрации аммиака в растворе получим:

$$C_p = e^{(0,553 C_2 + 1,890)} \quad (6)$$

где C_2 – концентрация аммиака в газовой смеси, $\text{мг}/\text{м}^3$.

Далее подставляя выражение (6) в выражение (2), получим:

$$(e^{(0,553 C_2 + 1,890)})^{0,306} = 2,551 \times I_0 / I \quad (7)$$

Преобразовав выражение (7), получим зависимость концентрации аммиака в газовой смеси от отклика сенсора (рисунок 5):

$$C_2 = 5,908 \times \ln(2,551 \times I_0 / I) - 3,418 \quad (8)$$

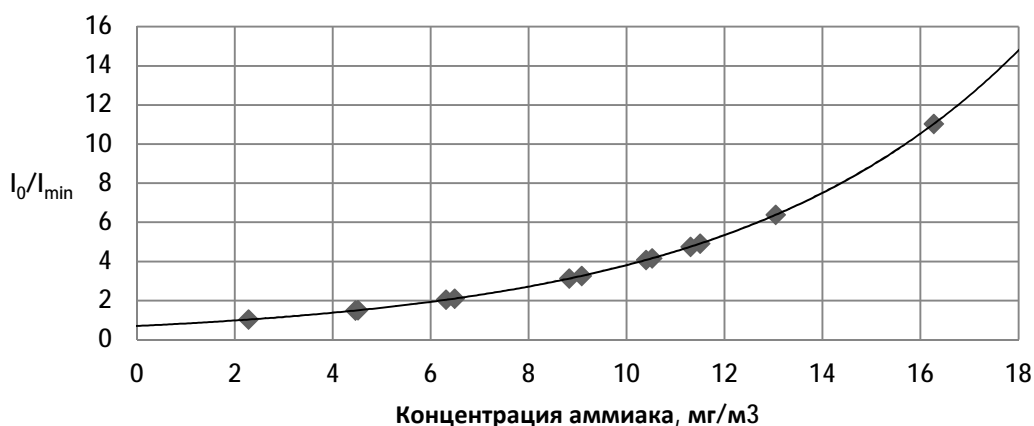


Рисунок 5 – Зависимость отклика сенсора от концентрации аммиака

Из данной работы можно сделать следующие выводы:

- проводимость пленок CuPcF_{16} обратимо изменяется в присутствии в газовой смеси воздух–аммиак;
- проводимость пленок CuPcF_{16} зависит от температуры и концентрации аммиака в газовой смеси; наибольший отклик достигается при комнатных температурах, что позволит в конструкции сенсора обойтись без нагревательного элемента;
- на основе данных пленок возможно разработать газовые сенсоры для контроля концентрации или превышения установленного значения концентрации аммиака в газовых смесях;
- измерения сенсором на основе пленок CuPcF_{16} можно производить как периодически, так и непрерывно.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Почтенный, А. Е. Расчет параметров прыжковой проводимости в композитных пленках фталоцианин меди-полистирол / А. Е. Почтенный, Л. Д. Русак // Сборник научных работ 63-й научно-технической конференции студентов и магистрантов 23-28 апреля 2012 г. – Минск: БГТУ, 2012. – С. 28-31.
- 2 Почтенный, А. Е. Прыжковая проводимость во фталоцианине меди и композиционных структурах на его основе / А. Е. Почтенный [и др.] // Физика твердого тела.– 1996.– Т. 38, № 8.– С. 2592–2601.
- 3 Misevich, A. V. The effect of gas adsorption on hopping conduction in metallophthalocyanines / A. V.Misevich, A. E. Pochtenny // Electron Technology. – 2000. – Vol. 33, №1/2. – P. 167–170.

В. В. Чаевский, доц., канд. физ.-мат. наук;
tchaievsky@tut.by

В. В. Жилинский, доц., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск)

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОКРЫТИЯ СПЛАВОМ Ni-P

Химически осаждаемые никель-фосфорные покрытия достаточно широко применяются для повышения функциональных свойств деталей из конструкционных сталей: коррозионной стойкости, твердости, износостойкости [1]. Сообщалось, что химические никель-фосфорные покрытия на углеродистой стали при последующем нанесении TiN, обеспечивают увеличение твердости и прочности сцепления с основой, а также повышение коррозионной стойкости низкоуглеродистой стали с покрытием [2].

Целью данной работы было нанесение никель-фосфорного покрытия на поверхность стальных лезвий ножей дереворежущего инструмента и исследование структуры и фазового состава сформированных слоев.

Покрытия сплавом Ni-P осаждались на экспериментальной установке с применением источника постоянного тока марки DC POWER SUPPLY HY3005-3 при средней катодной плотности тока 2 А/дм² из электролитов, состав которых представлен в таблице. Время электролиза – 10 минут. Толщина полученных покрытий измерялась с помощью микрометра и не превышала 10 мкм.

Таблица – Состав исследуемых электролитов

Состав электролита №1	Количество, г/л	Состав электролита №2	Количество, г/л
NiSO ₄ ·7H ₂ O	200	NiSO ₄ ·7H ₂ O	140
NaCl	20	HCl	2
H ₃ BO ₃	20	NH ₂ CH ₂ COOH	15
Na ₂ H ₂ PO ₂	25	NaH ₂ PO ₂	4,5
H ₂ SO ₄	15	Сахарин	2
рН	3,0	Лаурилсульфат натрия	0,1
		рН	2,2

Кислотность (рН) электролита измерялась рН-метром рН-150 с точностью ±0,05%. Уровень кислотности до нужного значения корректировали концентрированной серной кислотой.

Фазовый состав полученных покрытий исследовался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) при помощи дифрактометра Ultima IV (Rigaku, Япония) в Cu-K_α излучении.

Морфология поверхности образцов исследовалась с помощью оптического микроскопа Leica DFC Camera CD Release Notes V 6.4.1

при увеличении $400\times$, методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа LEO-1455 VP, который также применялся для определения элементного состава полученных покрытий методами СЭМ и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА).

Рентгенограммы сформированных покрытий сплавом Ni-P (рис. 1), полученных при различных плотностях тока (7 А/дм^2 , 9 А/дм^2), показывают широкое галло в области 2θ , равном $35\text{--}54^\circ$, и наличие отдельных пиков (при плотности тока 7 А/дм^2). Это свидетельствует о том, что сплавы Ni-P, полученные при плотности тока до 7 А/дм^2 , состоят из отдельных фаз Ni_3P и Ni. Сплавы Ni-P, сформированные при плотности тока свыше 7 А/дм^2 представляют собой метастабильный однородный твердый раствор внедрения на базе ГЦК решетки Ni, образование которого подтверждается литературными источниками [3].

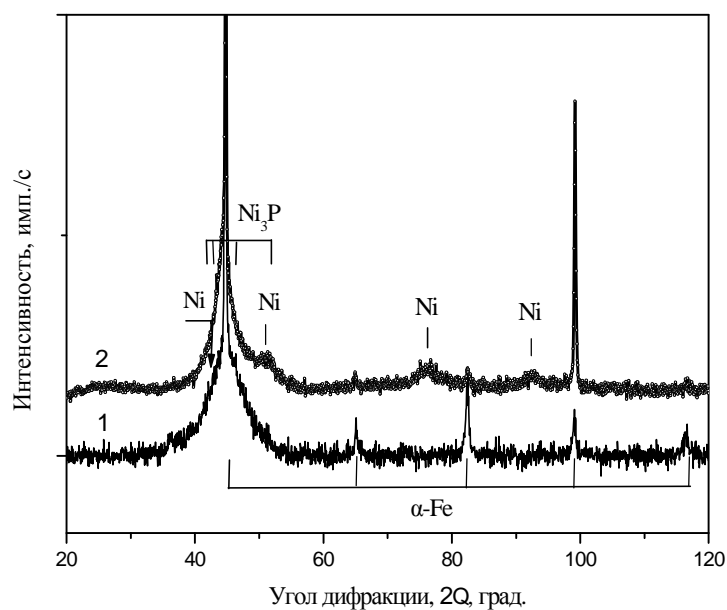


Рисунок 1 – Рентгенограммы покрытий Ni-P, полученных при плотностях тока 9 А/дм^2 (1) и 7 А/дм^2 (2)

Оптические снимки поверхности покрытий, полученных при различных плотностях тока из электролита № 2, показаны на рисунке 2. Видно, что с увеличением плотности тока шероховатость поверхности возрастает: появляется и увеличивается трещиноватость (рис. 2б, 2в), формируются глобулярные образования (рис. 2в, 2г, 2д).

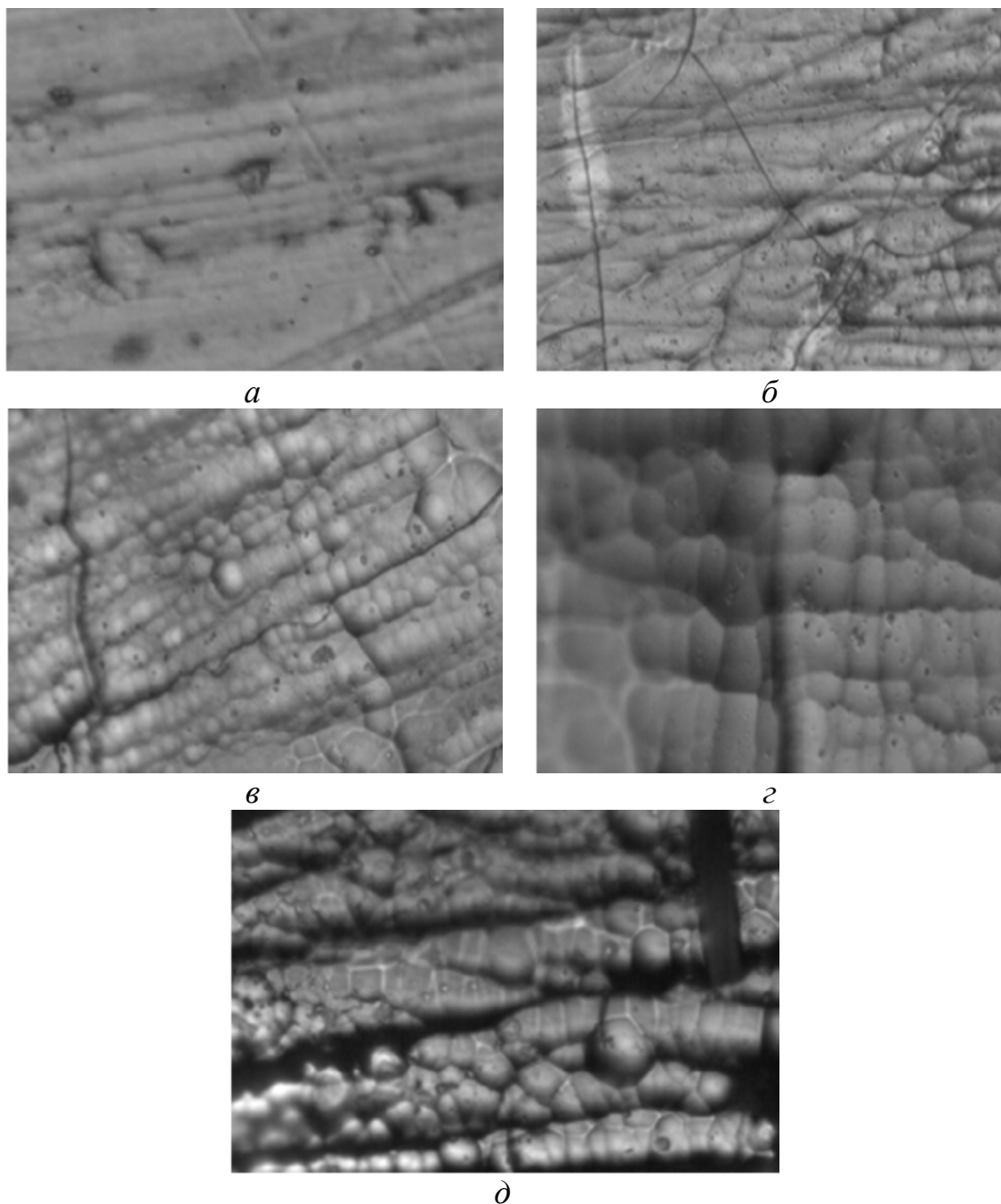
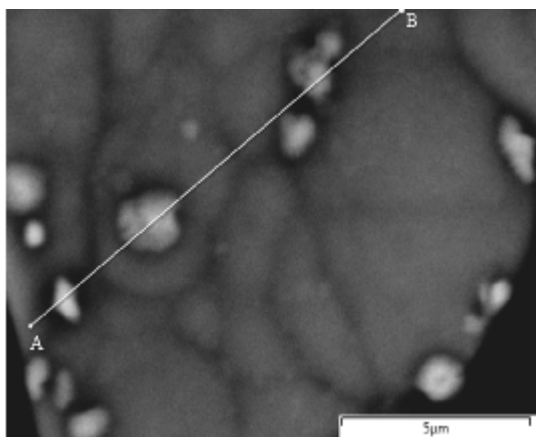


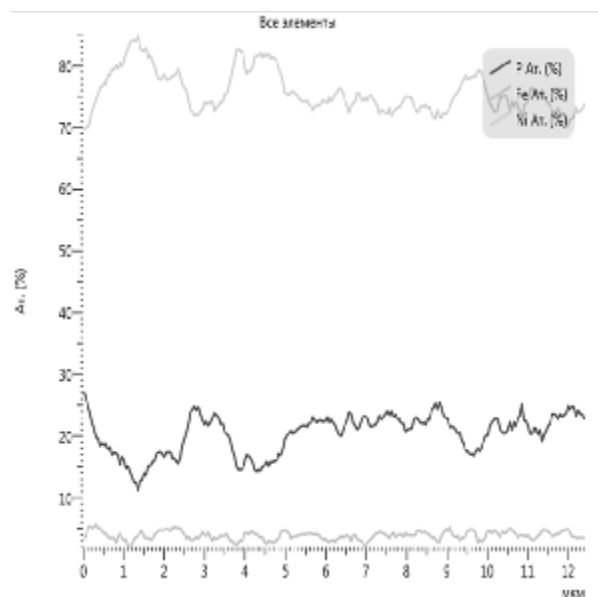
Рисунок 2 – Оптические снимки поверхности сплава, полученного при плотностях тока 2 A/дм^2 (а), 4 A/дм^2 (б), 5 A/дм^2 (в), 7 A/дм^2 (г), 9 A/дм^2 (д)

Формирующиеся глобулярные образования, исходя из литературных данных, являются фазой Ni_3P [4]. При плотности тока более 5 A/дм^2 начинает формироваться покрытие с сплошной глобулярной поверхностью (рис. 2г, 2д).

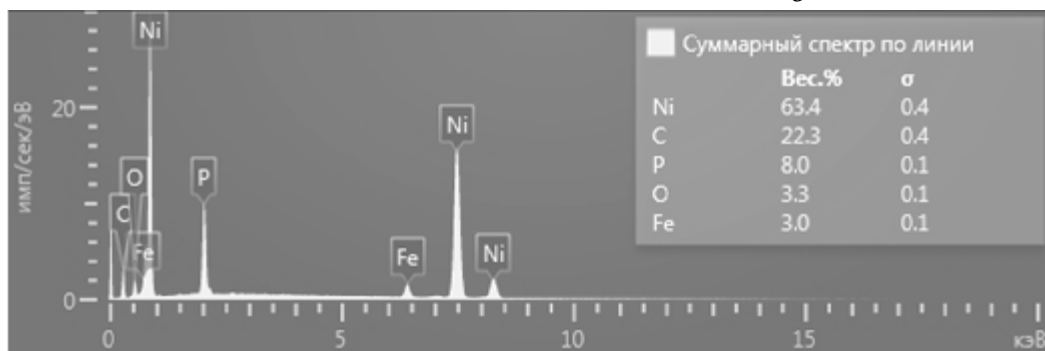
Наличие фазы Ni_3P подтверждается исследованиями морфологии поверхности покрытий сплавом Ni-P с помощью РЭМ (СЭМ) и РСМА методов (рис. 3).



a



б



в

Рисунок 3 – СЭМ-снимок поверхности сплава Ni-P (*a*), распределение интенсивностей характеристического рентгеновского излучения элементов (Ni, P, Fe) (*б*) и спектр элементного состава (*в*) при сканировании вдоль линии *AB*

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Исследование защитных свойств покрытий нитридом титана на низкоуглеродистой стали и влияния толщины подслоя никель-фосфор / Н. Г. Ануфриев [и др.] // Практика противокоррозионной защиты. – 2008. – №1 (47). – С. 37–43.
- 2 He, J. L., Hon, M. H. // Surface and Coatings Technology. – 1992. – no 53. – P. 93–98.
- 3 Магнитные свойства метастабильных фаз внедрения в сплавах $Ni_{1-x}P_x$ / С. Д. Антипов [и др.] // Вестн. Моск. ун-та. – Сер. 3. Физика. Астрономия. – 1995. – Т. 36. – № 6. – С. 62–69.
- 4 Юй Фэй. Электроосаждение сплава никель-фосфор из сульфатно-сукцинатно-хлоридных электролитов: диссертация ... кандидат химических наук: 05.17.03 / Юй Фэй, М., 2003. – 185 с.

СЕКЦИЯ № 6
ОПЫТ И ТЕНДЕНЦИИ ОБУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ
ПО АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Председатель – канд. пед. наук, доцент
Коровкина Наталья Павловна
Секретарь – ассистент Лялько Андрей Анатольевич

И.К. Асмыкович, доц., канд. физ-мат. наук;
С.В. Янович, ст. преп.
(БГТУ, г. Минск),

О РОЛИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ

Основная цель технических университетов создать такую систему обучения, которая обеспечивала бы и развивала образовательные потребности каждого студента ориентированные на формирование его профессиональной культуры. Но, к сожалению, имеется большое количество студентов, особенно на младших курсах технических специальностей, возможности которых в усвоении учебного материала по фундаментальным наукам достаточно скромны.

В тоже время социальный заказ на инженера XXI века требует его хорошей фундаментальной, в частности, математической подготовки. Еще в 30-е годы XX века автор проекта Днепрогэса и участник составления плана ГОЭЛРО академик И.Г.Александров писал, что инженер без хорошего знания математики – это монтер, а не инженер. Тем более это справедливо в двадцать первом веке. При этом в настоящее время требуется инженер-исследователь, инженер – создатель новой техники и технологий, а это невозможно без как можно более раннего привлечения хороших студентов к научным исследованиям. Как отмечено в [1], « ...Университет базируется на двух равнозначных ведущих видах деятельности: образовательной и научной», поэтому организации УИРС и НИРС должно уделяться особое внимание. Но не надо увлекаться численностью охвата студентов учебно-исследовательской и научно-исследовательской работой на младших курсах. В вузе на начальном этапе стоит задача отделить учащихся, которые не готовы к обучению в высшей школе и убедить тех, кто готов, что это довольно тяжелый труд.

Но учащихся, способных к научной деятельности, надо находить. Ясно, что таких учащихся много не будет, но, возможно, много и не надо. Для научной деятельности никогда не требовалось массовости. Одним из важных методов выявления талантливых студентов является проведение предметных олимпиад, в частности, по математике. При этом первую такую олимпиаду следует проводить как можно раньше в первом семестре, включая туда ряд задач по элементарной математике и подчеркивая тем самым преемственность школьного и вузовского образования. Для этого каждый лектор потока по математике должен объявить о проведении олимпиады, рекомендовать хорошим студентам принять в ней участие, рассказать о возможных формах поощрения участников и победителей. Такие формы должны быть достаточно разнообразными [2]. Следует отметить, что предмет-

ные олимпиады для студентов старших курсов полезно также проводить в командной форме для развития способностей студентов к коллективному творчеству, к работе в составе «команды». Эта форма широко распространена в вузах России [2].

Одной из особенностей подготовки по высшей математике инженера в техническом университете является не просто грамотное и доступное изложение курса математики, но и создание условий и заинтересованности студентов для самостоятельного и углубленного изучения различных разделов современной прикладной математики. Такие студенты [3,4] и на старших курсах продолжают консультироваться на кафедре высшей математики, а руководителями некоторых курсовых работ и консультантами по дипломным работам являются преподаватели кафедры высшей математики. Но, как показывает опыт, не все способные студенты имеют внутреннюю мотивацию к овладению знанием. Они предпочитают идти по пути наименьшего сопротивления то есть, особо не напрягаясь, выполнять требуемый минимум и не хотят использовать свои способности для углубленного изучения предмета. Эту проблему трудно решить усилиями только преподавателей. Обидно видеть, когда способный студент, вдобавок имеющий хороший уровень подготовки, постепенно деградирует и опускается до среднего или низкого уровня. С другой стороны, надо попытаться создать для заинтересованных студентов наилучшие условия для развития. Это и систематическая работа математических кружков и проведение дополнительных занятий и консультаций именно с целью углубленного изучения математики, и выполнения индивидуальных заданий повышенного уровня сложности. Еще одной проблемой является непонимание студентами первого и второго курсов взаимосвязей математики с другими дисциплинами и применения математики для решения прикладных задач. Со временем приходит понимание, но время для обучения уже упущено.

В современных условиях, когда большинство студентов имеют собственные персональные компьютеры, появились реальные возможности самостоятельной работы студентов по использованию ПЭВМ для изучения и решения математических моделей задач будущей специальности с элементами научного исследования из имеющихся алгоритмов. Студенты самостоятельно знакомятся на сайте <http://www.exponenta.ru> с новыми разработками по применению прикладных математических пакетов типа MATLAB, или MATCAD в задачах специальности и используют их в своей работе [3]. При этом можно дать задание как разобраться в работе встроенных программ и алгоритмов в математических пакетах, так и компоновать новые программы из имеющихся алгоритмов. Но надо обращать внимание студентов на то, что компьютер не всемогущ и не подменяет мыслитель-

ную деятельность человека. Человек ставит задачу, а компьютер лишь помогает реализовать ее вот тут то и требуется хороший уровень технической и математической подготовки студента.

Введение элементов учебно-исследовательской работы при обучении высшей математике позволяет с младших курсов выделить более активных и логически мыслящих студентов, способных к эффективной самостоятельной работе, которые в дальнейшем будут заниматься творческой научной работой. Эти студенты создают атмосферу научного поиска в своих группах и способны показать пример активной работы над учебным и дополнительным материалом по новым направлениям науки и техники. Такими студентами можно хорошо и эффективно руководить в рамках дистанционного образования, которое активно внедряется в последние годы

ЛИТЕРАТУРА

1. Пионова Р.С. Педагогика высшей школы: Учебное пособие. – Мн.: Университетское, 2002. – 256с.

2. Чеснокова Е.Г. Поощрение активности студентов в процессе изучения математических дисциплин // Устойчивость, управление и моделирование динамических систем, Сб. науч. трудов // Материалы Международн. научн. конфенц., посв. 75-летию со дня рождения И.Я. Каца, - Екатеринбург: УрГУПС. - №54(137), - 2006, с. 99-100.

3. Кузьмицкий И.Ф. Углубленная профессиональная ориентация при подготовке инженера по автоматизации / И.Ф. Кузьмицкий, Д.С. Карпович, И.К. Асмыкович, Л.И. Григорьев // Сборник материалов V Международная научно-методическая конференция "Высшее техническое образование: проблемы и пути развития ", УО "БГУИР" (Минск). 24-25 ноября 2010г. с.142.

4. Лапето А.В., Асмыкович И.К. Синтез модальных регуляторов при неполной информации для стабилизации систем управления / Сборник научных работ студентов высших учебных заведений республики Беларусь «НИРС-2008» /рекол. А.И.Жук (пред) и [др.]. Минск.: Изд. Центр БГУ, 2009 с.42-43

5. Молдаванов А.А Оптимизация времени истечения жидкости из пакета // «XL Гагаринские чтения» Научные труды Межд. молодежной научной конф. в 9 томах, Москва, МАТИ – Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского, 7-11 апреля 2014г., т.5, с.150 – 151

6. Пекарь С.А., Бобко В.А. Использование интерполяции функций в компьютерной графике // Сборник трудов IX Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Наука и образование – 2014» Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, 11 апреля 2014г., Астана, с.2370 – 2375

7. Прокопович Д. Исследование проблемы оптимальной останки на примере задачи «разборчивая невеста» Эвристика и дидактика математики: IV Международная научно-методическая дистанционная конференция-конкурс молодых ученых, аспирантов и студентов. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2015. – с.84-85

УДК 37.013

С.А. Шабанов

(УО «ВА Республики Беларусь», г. Минск)

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВНИМАНИЯ НА ЗАНЯТИЯХ

С проблемой рассредоточенного внимания сталкивается большое количество преподавателей учебных заведений. Почему молодые люди не могут или не хотят концентрироваться на воспринимаемой информации? Как сделать занятия более продуктивными?

Внимание – это избирательная направленность на тот или иной объект, сосредоточение на нем. Это некая деятельность организма, упорядочивающая поток информации от внешних и внутренних источников, вычлняющая наиболее важную часть информации из этого потока.

Основные функции внимания:

контроль и регуляция деятельности;

обеспечение длительной активности и сосредоточенности на объекте;

целенаправленный отбор поступающей информации, её дальнейшая организация;

сохранение и удержание образов;

торможение ненужных и активизация необходимых процессов.

Различают три типа внимания: непроизвольное, произвольное и послепроизвольное.

Непроизвольное (невольное) внимание возникает в тех случаях, когда обучающийся привлечен яркими особенностями объекта изучения, новизной, интересной подачей информации, парадоксами и контрастами, крупными, броско выраженными динамичными наглядными пособиями и экранными изображениями.

Этот вид внимания не требует от обучающихся существенных волевых усилий. Однако нельзя требовать от преподавателя такой подготовки и преподнесения информации, чтобы непроизвольное внимание поддерживалось в течение длительного времени.

Произвольное внимание – обучающийся слушает преподавателя, следит за ходом его мысли, старается понять и усвоить информацию, преодолеть утомление благодаря, главным образом, усилию воли. Слишком длительная работа на произвольном внимании невозможна.

Послепроизвольным (рабочим) вниманием обучающийся обладает, когда, овладев основами предмета, вникнув в его смысл, заинтересовывается им, осознает его необходимость и благодаря этому может в течение длительного времени успешно осуществлять учебную деятельность.

В учебном процессе имеют место все три вида внимания. Непроизвольное внимание физиологически представляет собой ориентировочный рефлекс, а поэтому способность к нему практически не воспитывается. Но, опираясь на непроизвольное внимание, преподаватель в процессе обучения должен воспитывать у обучающихся произвольное и послепроизвольное внимание.

Рассмотрим, как можно использовать некоторые свойства внимания для повышения качества обучения.

Утомляемость – основной враг внимания человека. В процессе занятий преподавателю необходимо следить за уровнем усталости обучающихся.

Сам процесс утомления имеет две фазы: фазу двигательного беспокойства и фазу торможения. Если обучающийся начинает отвлекаться, заниматься посторонними делами, ерзать, потягиваться, разговаривать, значит, наступила первая фаза утомления. Вялость, апатия, позевывание, рассеянность, безразличие характеризуют фазу торможения. Нежелательно доводить утомляемость до второй фазы, нужно прекращать ее развитие уже на первой путем предоставления кратковременного отдыха или смены рода деятельности.

Утомляют обучающихся также однообразная, продолжительная, нетворческая работа, монотонная, чрезмерно громкая или слишком тихая речь преподавателя. Обучающиеся больше устают на скучных занятиях, чем на занятиях, заполненных напряженным, но интересным и содержательным трудом. Именно поэтому преподаватель должен умело использовать интонационные средства речи (паузы, фразовые ударения), следить за ее громкостью, уместно ее модулировать.

Объем – количество объектов, которые могут быть охвачены вниманием одновременно. Это качество классифицирует человеческое внимание на широкое и узкое. Объем внимания колеблется в пределах от 4 до 6 объектов.

Эта характеристика внимания должна учитываться в практике обучения. Ограниченный объем человеческого внимания накладывает определенные требования и на структуру объяснения учебного материала. В каждой дозе излагаемой информации не должно одновременно фигурировать более шести узловых понятий. Больше их количество неминуемо приведет к тому, что некоторые из них будут выпадать из зоны активного внимания.

Переключение – намеренный перенос внимания с одного объекта на другой. Если этот перенос осуществляется самопроизвольно, то имеет место отвлечение внимания.

Причиной рассеивания внимания может выступать также неудачная структура построения учебного текста, в частности длина предложений. Это необходимо учитывать при построении устных рассказов и объяснений, дабы уберечь аудиторию от чрезмерной перегрузки при прослушивании речи преподавателя.

Одним из важнейших факторов возбуждения и активизации внимания является использование наглядности. Однако, если пренебречь некоторыми требованиями, наглядность может превратиться в фактор подавления и рассеивания внимания. Прежде всего необходимо обеспечить хорошую видимость. Плохая видимость не только вызывает напряжение зрения, но и раздражает человека, что является причиной потери его внимания.

При использовании наглядности следует учитывать некоторые особенности внимания. Движущиеся объекты привлекают внимание сильнее, чем неподвижные. Эта особенность требует более широкого применения динамической наглядности по сравнению со статической. Труднее сохраняется длительное слуховое сосредоточение, нежели зрительное. Поэтому любой рассказ целесообразно сопровождать показом, «вкраплением» в речь зрительных опор. Внимание лучше сохраняет свою устойчивость при периодической смене источников информации. Отсюда вытекает требование фрагментарно демонстрировать наглядность. Хотя зрительное сосредоточение продолжительнее, чем слуховое, преподавателю нельзя рассчитывать на то, что обучающиеся сохранят внимание во время просмотра видеофильмов, слайдов и т. п., если демонстрация длится непрерывно все занятие. Именно поэтому целесообразно показ совмещать с рассказом, не допускать длительного пассивного созерцания, а чередовать просмотр с другими видами деятельности. Так, неплохой эффект дает комментирование, сопровождающее показ чего-либо или демонстрацию опытов. Комментирование может быть опережающим (словесная информация предшествует зрительной), запаздывающим (показ, затем комментарий) и синхронным.

Устойчивость – длительность сосредоточения внимания на объекте. В зависимости от этого качества различают устойчивое и неустойчивое внимание.

Внимание может переключаться быстро и медленно. Механизм переключения срабатывает автоматически (наступает отвлечение внимания) при определенном уровне усталости тех или иных органов чувств. Быстрым самопроизвольным переключением и отличается неустойчивое внимание от устойчивого. Однако умение быстро пере-

ключать внимание крайне важно для ряда профессий, в том числе и для педагога. Особенно необходима способность к переключению внимания в сочетании с большой его устойчивостью при решении теоретических и практических задач.

Наличие или отсутствие внимания у обучающихся служит для преподавателя хорошим сигналом эффективности его деятельности (преподавания). Следовательно, внимание обучающихся может выступать в качестве оперативной обратной связи в обучении, позволяющей преподавателю своевременно корректировать свои действия в процессе занятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коробов Е.Т. Внимание в познавательной активности//Среднее специальное образование, 1991, № 4.
2. Психология внимания / Под ред. Ю.Б. Гиппенрейтер и В.Я. Романова. – М.: ЧеРо. 2000.

УДК 631.171; 378

А.Г. Сеньков, доц., канд. техн. наук; С.И. Немирович, студ.
(БГАТУ, г. Минск)

ПРАКТИКА СОЗДАНИЯ УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ И АСУ В БГАТУ

В работе освещается создание на кафедре «Автоматизированные системы управления производством» (АСУП) Белорусского государственного аграрного технического университета (БГАТУ) новой учебной лаборатории «Промышленные контроллеры и АСУ» и разработки на ее основе учебно-методического комплекса по освоению современной технологии автоматизации производства на базе применения микропроцессорных систем управления.

Системы автоматизации, построенные на базе программируемых контроллеров, сегодня широко используются во многих областях народного хозяйства. Несмотря на экономические и финансовые сложности большинства предприятий сельскохозяйственной и деревообрабатывающей отраслей наблюдается устойчивый рост интереса к автоматизации технологических и производственных процессов с применением микропроцессорной техники. Примерами высокоэффективного применения микропроцессорных систем управления (МСУ) являются: адаптивное доение и кормление молочных коров в соответствии с их продуктивностью вплоть до роботизации этих процессов; нормированное кормление и оптимизация параметров микроклимата в соответствии с половозрастными характеристиками свиней; подкормка и полив тепличных растений и другие приложения.

Основой МСУ являются программируемые микропроцессорные контроллеры и компьютеры в промышленном исполнении, применение которых в управлении производством требует подготовки специалистов, обладающих интегрированными знаниями в области теории управления, информационных технологий, экономико-математического моделирования и характеристик конкретных технологических процессов и установок [1, 2]. Современный специалист должен уметь структурировать проектные решения как в терминах аппаратного так и, главное, программного обеспечения, организации человеко-машинного интерфейса и обмена информацией между распределенными подсистемами с использованием идеологии локальных вычислительных сетей (ЛВС) [3].

Практическая реализация широких возможностей информационно-управляющих систем в повышении эффективности агропромышленного и деревообрабатывающего производства сопряжена с рядом ключевых проблем, связанных с подготовкой кадров по компьютеризированным технологиям управления на базе промышленных контроллеров. Решение этой задачи требует участия ведущих инженерных университетов.

Отмеченные кардинальные изменения в технологиях управления должны сопровождаться адекватным развитием соответствующей учебной лабораторной базы. От своевременности проведения модернизации лабораторий программно-технических средств автоматизации и переподготовки профессорско-преподавательского состава существенно зависит качество инженерного образования, востребованность выпускников и, в значительной мере, эффективность использования новых функциональных возможностей информационно-управляющих систем на предприятиях АПК.

Учебная лаборатория «Промышленные контроллеры и АСУ» была создана в 2014 г. на кафедре АСУП (рис. 1). Лаборатория оснащена шестью современными учебными стендами и мультимедийным оборудованием, предназначенными для изучения:

- основ программирования ПЛК;
- основ построения комплексных систем автоматизации;
- организации взаимосвязи между программным и аппаратным обеспечением различных уровней автоматизации;
- организации распределенных систем управления.

В качестве устройства управления технологическими процессами и установками применены программируемые логические контроллеры общепромышленного применения немецкой фирмы Siemens. На стенде реализована конфигурация, включающая в себя ПЛК Simatic S7-1200, компьютер с установленной на нем средой программирования и конфигурирования аппаратных средств, коммутационное

оборудование с использованием сетевых интерфейсов Profibus и Industrial Ethernet, блоки ввода-вывода дискретных и аналоговых электрических сигналов для имитации технологического процесса. Также на стенде представлена сенсорная панель оператора КТР700 Basic Color PN – устройство ввода и отображения информации. Панель может быть связана с контроллером для ввода значений различных параметров и вывода на экран состояния входов в графическом представлении. Каждый стенд представляет собой гибкую систему и может быть использован по частям, целиком или во взаимодействии друг с другом.



Рисунок 1 – Общий вид класса промышленных контроллеров и АСУ (а) и лабораторный учебный стенд (б)

В качестве программатора используется ПЭВМ с лицензионной системой программирования TIA (Totally Integrated Automation) Portal (V13). Аппаратные средства автоматически распознаются и поддерживаются системой программирования. TIA Portal позволяет программировать на стандартных языках программирования: языке функциональных блоков (FBD), языке лестничных диаграмм (LAD), языке структурированного текста (SCL).

Стенды позволяют студентам освоить стандартные языки программирования ПЛК, изучить возможности взаимодействия устройств по промышленным сетям, получить навыки работы с системами человеко-машинного интерфейса и SCADA-системами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гируцкий И.И., Загинайлов В.И., Судник Ю.А. Инновационная технология подготовки специалистов по компьютеризации сельхозпроизводства. Механизация и электрификация сельского хозяйства. № 8, 2005. – с.2-4.
2. Гируцкий И.И. Взаимодействие науки и образования при подготовке специалистов по новым технологиям управления производством: Инновационное образование в техническом университете:

Международная научно-методическая конференция. Казань: Изд-во Казан. Гос. Техн. Ун-та. 2004. – с.170 – 173.

3. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский диалект, 2001. – 557 с.

УДК 378.14

С.С. Карпович, канд. техн. наук
(БНТУ, г. Минск);

С. Е. Жарский, канд. техн. наук;

С.Н. Пищов, канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск),

ИНТЕРАТИВНОСТЬ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ОБУЧЕНИИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ

Анализ материалов республиканских и международных научно-практических конференций, посвященных проблематике дистанционного обучения (ДО) позволяет сделать вывод, что многие авторы подчеркивают характер ДО как соответствующий системе повышения квалификации и переподготовки. Этому способствует возможность пройти повышение квалификации и переподготовку в полном смысле без отрыва от производства, умения и навыки слушателей к самостоятельной работе, достаточное знание современных Интернет технологий и т.д. При этом из материалов пяти проанализированных сборников (2007-2010 гг.; страны-организаторы: Республика Беларусь, Республика Казахстан, Российская Федерация; более 435 статей) следует, что интерес к системе ДО проявили специалисты только 7 организаций, которые можно отнести к Институтам повышения квалификации и переподготовки кадров (ИПК и ПК) в чистом виде. Результаты анализа характера организаций, принявших участие в конференциях, представлены в таблице.

Таблица – Организации, принявшие участие в обсуждении системы ДО

№ п/п	Характер организаций	Кол-во, шт.	Кол-во, %
1.	Организации, соотносящиеся с системой ВУЗов.	80	74,07
2.	Организации, которые можно условно охарактеризовать как «корпорации». (предприятия, вычисл. центры, акционерные общества и т.д.).	13	12,04
3.	Организации, соотносящиеся с системой НИИ.	8	7,41
4.	Организации, занимающиеся только повышением квалификации и переподготовкой кадров.	7	6,48
Итого:		108	100

Несмотря на перспективный характер обучения, практическое внедрение ДО в системе институтов переподготовки и повышения

квалификации испытывает определенные сложности и нуждается в дополнительных теоретических исследованиях.

Одним из важнейших специальных принципов ДО является принцип интерактивности учебного процесса. Под интерактивностью будем понимать способ организации системы, при котором цель обучения достигается при помощи информационного обмена со всеми элементами системы ДО (высокая степень межличностной коммуникации всех участников образовательного процесса, а также взаимодействие с электронными образовательными ресурсами). Именно интерактивности отведена роль проводника между теоретическими знаниями слушателя и их практическим применением. В образовательной практике к методам интерактивного обучения относятся:

- игровые упражнения, тренинги;
- анализ и решение ситуационных задач (аналитические сессии);
- моделирование ситуаций;
- работа в группах с использованием методов «мозгового штурма» и др.

В свою очередь для информационно-коммуникационных систем под интерактивностью понимается способность компьютерной системы активно и разнообразно реагировать на действия пользователей. Для информационных систем можно выделить три типа интерактивности:

- реактивное взаимодействие: обучение идет по предлагаемой программе, последовательность и управление программой фиксировано, и слушатель практически не имеет возможности управления обучением.
- активное взаимодействие: слушатели сами решают, в каком порядке выполнять задания, т.е. сами контролируют программу.
- совместное взаимодействие: слушатели и программа взаимно адаптируются друг к другу.

Общим признаком таких методов будет являться обеспечение эффективной обратной связи между преподавателями, слушателями и компьютерной системой. В случае использования системы ДО, повышение эффективности обратной связи можно достичь при помощи проведения «вебинаров», как дополнительного вида учебного занятия. «Вебинар» — это организованный посредством Интернет-технологий «виртуальный» семинар, который идет в режиме реального времени и дает возможность обучаться у различных преподавателей (экспертов). «Вебинару» присущ основной принцип обучения в системе дополнительного образования взрослых — интерактивность. В зависимости от

техники построения обучения «вебинар» можно отнести к любому типу интерактивности и использовать для оценки усвоения материалов слушателями, их способности соотнести теорию с практикой. Значимость «вебинаров» заключается в том, что:

- * в процессе обучения задействованы все слушатели;
- * есть возможность детально обдумать свои и чужие ответы;
- * виртуальная дискуссия дает возможность заглянуть в учебник, справочные материалы и др.;
- * появляется возможность общения с коллегами и экспертами, которые не доступны для непосредственного личного общения.

Положительным моментом для системы ДО в учреждениях дополнительного образования будет являться возможность не организовывать проведение «вебинара» своими силами, а воспользоваться услугами компаний, специализирующихся на оказании данных услуг (это дешевле, чем проведение очного семинара, тренинга). Провайдер берет на себя всю техническую сторону организации «вебинара»:

- создает регистрационные формы для слушателей;
- разрабатывает инструкции для слушателей по настройке различных параметров;
- обеспечивает трансляцию «вебинара»;
- обеспечивают связь как между докладчиками и слушателями («чат», или вопросы «голосом» через микрофон), так и между самими слушателями;
- проводит запись и сохранение «вебинара» для последующих просмотров.

При развитии системы ДО в учреждениях дополнительного образования взрослых, важной задачей является повышение уровня интерактивности обучения и «вебинары» способны компенсировать отсутствие непосредственного контакта между преподавателем и слушателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щенников, С.А. Открытое дистанционное образование / С.А. Щенников. – М.: Наука, 2002. – 527 с.
2. Тавгень, И.А. О нормативной модели системы дистанционного обучения в дополнительном образовании взрослых // Тавгень И.А., Карпович С.С. / Дистанционное обучение – образовательная среда XXI века: материалы Междунар. науч.-метод. конф., Минск, 1–2 декабря 2011 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; орг. ком.: С.А. Маскевич [и др.]. – Минск, 2011. С. 100-102.

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ РЕСУРСАМИ
ВО ВНУТРЕННИХ ВОЙСКАХ**

В статье обозначена проблема автоматизации процессов управленческой деятельности во внутренних войсках, актуальность и этапы разработки автоматизированной информационной системы.

Цель статьи обозначить направление исследования автоматизации некоторых процессов принятия управленческих решений в ходе служебно-боевой деятельности частей внутренних войск Республики Беларусь.

Актуальность направления исследовательской работы заложена в Концепции строительства и развития внутренних войск Министерства внутренних дел Республики Беларусь на 2014-2020 годы утвержденной Министром внутренних дел.

Качественное, соответствующее возможностям государства, наращивание их потенциала, позволяющего в общей системе национальной безопасности предотвратить, локализовать и нейтрализовать основные угрозы внутренней безопасности государства, эффективно выполнять возложенные на них задачи мирного и военного времени – есть основная цель строительства и развития внутренних войск.

Одним из положений Концепции определено совершенствование системы управления внутренними войсками и повышение ее эффективности.

Совершенствования системы управления внутренними войсками предполагает поэтапную реализацию следующих направлений:

- модернизация телекоммуникационной ведомственной сети внутренних войск с ее дальнейшей интеграцией в ведомственную телекоммуникационную сеть МВД;
- разработка, проведение опытной эксплуатации и внедрение специализированных баз данных и программного обеспечения по направлениям служебно-боевой деятельности, согласованных с МВД;
- оптимизация баз данных и совершенствование специализированного программного обеспечения по направлениям служебной деятельности внутренних войск, согласованных с МВД;
- создание условий для организации единого информационного пространства внутренних войск и развития структурированной автоматизированной системы управления ими.

Планирование служебно-боевой деятельности и выполнение служебно-боевых задач, в том числе управления воинскими частями в масштабах войск диктует необходимость в обработке большого массива данных. Таким образом необходима автоматизированная система управления информационными ресурсами позволяющая органам военного управления подготовить расчеты по профессиональным направлениям деятельности, не затрачивая время на сбор первичной информации, освобождая время для подготовки предложений командиру.

Будущее внутренних войск за насыщением органов управления автоматизированными системами и вычислительной техникой, за внедрением автоматизированных систем управления войсками.

Автоматизация управления войсками, в свою очередь, позволит:

- повысить эффективность действий внутренних войск за счет оптимальности и обоснованности принимаемых решений;
- повысить оперативность управления за счет ускорения сбора, обработки, передачи и документирования информации;
- интенсифицировать и повысить производительность и коэффициент полезного действия органов управления, сократить затраты времени на нетворческий труд.

Автоматизированная система управления информационными ресурсами предназначена для повышения оперативности, надежности и качества управления войсками в целях:

- наиболее полного использования их боевых возможностей;
- сокращение времени сбора, обработки и передачи данных обстановки;
- подготовку данных для принятия решения и планирования служебно-боевой деятельности;
- отображение и документирование информации.

Разработка автоматизированной системы управления информационными ресурсами от становления идеи до первой версии состоит из трех этапов: анализа, проектирования и реализации, в результате итеративного выполнения которых происходит пошаговое «наращивание» системы.

Этап анализа концентрируется на системных требованиях. Требования определяются и специфицируются. Осуществляется разработка и интеграция функциональных моделей и моделей данных для системы. Кроме того, фиксируются нефункциональные требования и другие системные ограничения. Результатом этапа установления требований является документ, содержащий изложение требований так называемое техническое задание.

Спецификация требований начинается с того момента, когда разработчики приступают к моделированию требований с использованием определенного метода. CASE-средства используются для ввода, анализа и документирования модели. В результате документ описания требований дополняется графическими моделями и отчетами, сгенерированными с помощью CASE-средств. В рамках объектно-ориентированного анализа в качестве основных методов спецификации требований используются два типа диаграмм: диаграммы классов и диаграммы прецедентов.

Этап проектирования разделяется на два основных подэтапа: архитектурное и детализированное проектирование. В частности, проводится уточнение конструкции программы для архитектуры клиент/сервер, которая интегрирует объекты пользовательского интерфейса и базы данных.

Проект базы данных определяет объекты сервера базы данных – скорее всего, реляционной (или, возможно, объектно-реляционной).

Этап реализации включает написание программ клиентских приложений и серверов баз данных. Этап сопровождения наступает после успешной передачи заказчику каждого последующего программного модуля и, в конечном счете, всего программного продукта. Сопровождение – не только неотъемлемая часть жизненного цикла ПО, оно составляет его большую часть, если речь идет о времени и усилиях персонала ИТ-подразделений, приходящихся на сопровождение.

Информация с которой будут работать пользователи относится к категории – информация, распространение и (или) предоставление которой ограничено. В связи с этим необходимо при разработке ИАС учитывать требования Закона Республики Беларусь «Об информации, информатизации и защите информации» и внутренних документов регламентирующих работу с информацией имеющей ограниченный доступ.

Подобную разработку можно охарактеризовать как крупномасштабную, объектно-ориентированную, итеративную и наращиваемую. Архитектура ПО основана на решениях клиент/сервер, где клиент представляет собой рабочую станцию с GUI (GraphicalUserInterface - графический интерфейс пользователя), а на сервере хранится база данных. Программы клиента и сервера выполняются в рамках отдельных процессов и взаимодействуют через обмен сообщениями между объектами.

Для описания артефактов при моделировании необходимо использовать единую систему понятий, для того чтобы аналитики, разработчики и программисты «говорили» на одном языке. Этим языком

является язык UML. На этапе анализа и проектирования необходимо преодолеть такие трудности, как большие объемы и сложные структуры данных, совместный доступ к информации со стороны многих пользователей, обработка транзакций, изменяющиеся требования и т.д.

Автоматизированная система управления информационными ресурсами целесообразно разрабатывать как распределенное приложениеисполняемое в среде, состоящей из нескольких географически разнесенных узлов. Каждый узел представляет собой отдельную систему, позволяющей функционировать как независимо, так и будучи объединенной локальной и (или) глобальной сетью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория принятия решений: учебник / А.И. Орлов. - М.: Издательство «Экзамен», 2006. - 373 [3] с. (Серия «Учебник для вузов»)
2. Повышение эффективности управления военной организацией: моногр. / С.В. Верлуп, В.В. Воронович. - Минск: ВА РБ, 2014. - 140 с.
3. Хассан Гома. UML Проектирование систем реального времени, параллельных и распределенных приложений.
4. Мацяшек, Лешек, Анализ требований и проектирование систем. Разработка информационных систем с использованием UML. : Пер. с англ. — М. : Издательский дом «Вильямс». 2002- — 432 с.: ил.
5. Закон Республики Беларусь от 10.11.2008 г. № 455-З «Об информации, информатизации и защите информации».

Содержание
Секция ЭЛЕМЕНТЫ, СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ
И МЕТРОЛОГИИ

<i>Коваленко А.Н.</i> Повышение стабильности работы средств неконтактного контроля микродвижений.....	6
<i>Шуленков Р.А.</i> Тактирование, синхронизация и ФАПЧ процессора.....	9
<i>Сухорукова И.Г., Гринюк Д.А., Оробей И.О.</i> Алгоритм измерения герметичности запорной арматуры.....	16
<i>Гринюк Д.А., Олиферович Н.М., Оробей И.О.</i> Алгоритм измерения динамики круговой пропитки.	20
<i>Анкуда М. А., Оробей И.О., Сарока В.В.</i> Математическая модель автодина.....	24
<i>Анкуда М.А., Оробей И.О.</i> Модель автодина с параметрическим возбуждением.....	28
<i>Михайлов В.Б., Карпович Д.С., Латушкина С.Д.</i> Динамически управляемые газовые датчики для АСУ производством в химической промышленности.....	32
<i>Сидорчик Д. Е., Карпович Д.С.</i> Исследование энкодеров для создания системы позиционирования.....	35

Секция ЭЛЕМЕНТЫ, СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
И ИХ ИДЕНТИФИКАЦИЯ»

Подсекция ЭЛЕМЕНТЫ, СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ

<i>Сидорчик Д. Е., Карпович Д. С.</i> Фильтрация данных гироскопа с помощью фильтра Калмана на микроконтроллере ATmega328P.....	41
<i>Анкуда Д. А.</i> Система двухдвигательного электропривода листорезальной машины 2ЛР2 – 120.....	46
<i>Гируцкий И.И., Чумаков В.В.</i> Построение унифицированных систем управления технологическими процессами сельскохозяйственного производства.....	50
<i>Железняков А.В.</i> Об автоматизации задач управления подразделениями внутренних войск.....	54
<i>Колесников В.Л., Урбанович П.П., Бракович А.И.</i> Оптимальное распределение нагрузок на двигатели размалывающих машин при последовательно-параллельных соединениях.....	58
<i>Немирович С.И., Сеньков А.Г.</i> Компьютерная настройка параметров регулятора в САР с комбинированным управлением.....	62
<i>Цавнин А.В., Курганов В.В.</i> Исследование способов настройки ПИД-регулятора для объектов с транспортным запаздыванием на примере системы автоматического регулирования уровня.....	66
<i>Дворникова Т.А.</i> Система автоматизированного нанесения паяльной пасты на печатные платы. Факторы, влияющие на процесс дозирования....	70
<i>Кузьмицкий И.Ф., Григорьев Л.И.</i> Системы управления с автоматически меняющимися целями и неопределенностью параметров.....	74
<i>Лялько А.А.</i> Сравнительный анализ систем управления на основе нейронных сетей на базе Neural Network Toolbox системы Matlab.....	77

<i>Карпович Д.С., Сарока В.В., Кузьмицкий И.Ф.</i> Постановка задачи синтеза системы автоматического управления промывки деталей и очистка сточных вод в условиях цеха анодирования сп «КТМ-2000».....	81
<i>Сухорукова И.Г., Гринюк Д.А., Оробей И.О.</i> Анализ чувствительности алгоритма активного воздействия при определении величин протечек запорной арматуры.....	84
<i>Гринюк Д.А., Астапенко А. С., Широков А.М.</i> Проявление эффектов дискретизации и квантования в ПЛК.....	88
<i>Барашко О.Г.</i> Компоненты успешного внедрения ERP-систем.....	92
<i>Барашко О.Г., Сакович А.А.</i> Система автоматического управления процесса обжига извести в двухшахтных печах.....	94
<i>Meparishvili B., Petashvili P., Janelidze G.</i> Multi-robot control algorithm for mapping the radiation areas.....	97
<i>Овцов С.А., Сарока В.В.</i> Синтез оптимального регулятора для автооператора гальванической линии.....	102
<i>Герман О.В., Заяц А.В.</i> Об одной модели нечеткого регулятора.....	106
<i>Подобед М.Ю.</i> Гибридная система управления вентиляцией помещений с неоднородной тепловой нагрузкой.....	110

**Подсекция ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

<i>Новицкая А. Д., Жиляк Н. А.</i> Алгоритмы распознавания образов.....	114
<i>Тихомиров С.Г., Пятаков Ю.В., Карманова О.В., Молчанов В.И., Маслов А.А.</i> Моделирование теплового поля пневматической шины в процессе вулканизации.....	117
<i>Тихомиров С.Г., Арапов Д.В., Саввин С.С., Курицын В.А.</i> Математическое обеспечение антипомпажной системы управления компрессором динамического действия.....	121
<i>Фурса О.А., Олейник О.Ю.</i> Зависимость качества резино-технических изделий от моделирования процесса производства.....	125
<i>Жуковская Т.Е., Радоман Н.В., Александров О.И.</i> Формально-функциональная модель оптимального взаимодействия электроэнергетической системы с энергоемкими потребителями.....	127
<i>Баро Бандия, Александров О.И., Свирский П.Д.</i> Многокритериальный метод выбора при оптимизации параметров системы для электроснабжения развивающегося региона.....	131
<i>Тихомиров С.Г., Карманова О.В., Хаустов И.А., Попов А.П., Скачков А.М.</i> Моделирование динамики моментов молекулярно-массового распределения высокоэластичных полимеров в процессе их термомеханодеструкции.....	135
<i>Исаченков В.С., В.А. Симанович, Карпович С.С., Сулимчик А.Ю., Обламский К.С.</i> Математическое моделирование колесной трелевочной машины с прицепным технологическим оборудованием, как динамического объекта.....	139
<i>Находов В., Башкис А., Иванько Д.</i> Определение численных значений статей электробалансов производственных объектов в условиях неопределенности исходной информации.....	142
<i>Литвинов Д.А., Трусов К.И., Александров О.И.</i> Синтез производных ряда циклогексена и пара-терфенила как компонентов жидкокристаллических материалов.....	146

<i>Кобринец В.П., Лихавицкий В.В.</i> Идентификация параметров математической модели колонны К-102.....	150
<i>Кункевич Д.П., Полозков Ю.В., Александров О.И.</i> Систематизация конструкторско-технологических элементов поверхности деталей вращения.....	154
<i>Давидович Л.М., Кузьмицкий И.Ф., Савчук В.П.</i> Формирование математической модели процесса каландрирования.....	158
<i>Карпович Д.С., Кузьмицкий И.Ф., Карпович Н.В.</i> Способы представления объектов с распределенными параметрами на примере тепловых процессов.....	162
<i>Суша О. Н., Михайлов В.Б., Жижченко А.Г.</i> Температурное напряжение режущего инструмента и методы его снижения.....	165
<i>Кобринец В. П., Пронин Д.Н.</i> Разработка математической модели процесса сушки в барабанных сушилках.....	168
<i>Кобринец В. П., Коровкина Н. П., Пустовалова Н. Н.</i> Анализ эффективности применения электроприводов различных типов промышленных установок.....	172

**Секция «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
В ТЕОРИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ»**

<i>Соловьева И.Ф.</i> Численное решение граничных задач с малым параметром при старшей производной.....	177
<i>Марченко В.М., Пыжкова О.Н.</i> Управляемость и достижимость линейных гибридных дискретно-непрерывных систем.....	180
<i>Можей Н. П.</i> Линейные связности на трехмерных симметрических пространствах.	185
<i>Асмыкович И.К.</i> О регуляризации и нормализации линейных дескрипторных систем.....	188
<i>Борковская И.М.</i> О задаче стабилизации дескрипторных систем с запаздыванием при воздействии регуляторов типа обратной связи.....	192
<i>Дмитрук Н.М., Калинин А.И.</i> Децентрализованное управление линейными системами со слабыми взаимосвязями.....	194
<i>Лавринович Л.И.</i> Асимптотика решения задачи об управлении линейной сингулярно возмущенной системой с минимальными энергетическими затратами.....	198
<i>Якименко А.А.</i> Модальное управление одной двумерной системой запаздывающего типа.....	202
<i>Волк А.М.</i> К расчету пленочного центробежного распылителя.....	203
<i>Яроцкая Л.Д.</i> О некоторых представлениях функции, связанной с функцией Бесселя третьего рода мнимого параметра.....	207
<i>Игнатенко В.В., Крахотко В.В., Размыслович Г.П.</i> К управляемости дискретных дескрипторных систем с запаздыванием.....	210

Секция «УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫМИ РЕСУРСАМИ»

<i>Гладкий М.В.</i> Разработка концепции создания безопасных SaaS-систем.....	212
<i>Кобайло А.С.</i> Теоретические основы разработки программного обеспечения автоматизированных систем проектирования вычислительных систем класса МКМД.....	216

<i>Кузьмицкий А.М.</i> Безопасность доступа к автоматизированным систем физической защиты атомной электростанции.....	219
<i>Урбанович П.П., Васильева И.Н., Давидович А.Л., Жияк Н.А.</i> Информационные технологии для воспитания звуковой культуры речи у детей дошкольного возраста в ситуации близкородственного билингвизма.....	222
<i>Барашко О.Г.</i> Основные проблемы и ошибки в проектах внедрения/модификации корпоративных информационных систем.....	226
<i>Черемнов А.Г., Фаерман В.А., Аврамчук В.С.</i> Программное и математическое обеспечение перспективного корреляционно-акустического комплекса обнаружения утечек.....	230

Секция «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ»

<i>Крук Н.Н., Кленицкий Д.В.</i> Релаксация флуоресценции красителя при возбуждении прямоугольными световыми импульсами.....	235
<i>Бокун Г.С., Вихренко В.С., Наркевич И.И.</i> Применение вариационных методов для описания структурных и термодинамических характеристик наночастиц.....	239
<i>Наркевич И.И., Бокун Г.С., Квасов Н.Т., Козич К.Ю., Прокопович Д.В.</i> Применение двухуровневого молекулярно-статистического подхода для расчета энергии и функций распределения молекул в кристаллических наночастицах на примере икосаэдра.....	244
<i>Бокун Г.С., Наркевич И.И.</i> Двухуровневое статистическое описание релаксации решетки вблизи поверхности кристаллической наночастицы....	250
<i>Грода Я.Г.</i> Свободная энергия решеточного флюида с притяжением ближайших соседей на плоской квадратной решетки с заблокированными узлами.....	254
<i>Мадьяров В.Р.</i> Определение электрических параметров полупроводников в СВЧ – области на основе кинетической модели переноса носителей заряда.....	257
<i>Дорожко А.В., Поплавский В.В.</i> Стенд для тестирования мембранно-электродных блоков топливных элементов.....	261
<i>Мисевич А.В., Почтенный А.Е., Климович С.А.</i> Прыжковая проводимость в пленках фторзамещенного фталоцианина меди.....	264
<i>Русак Л.Д., Почтенный А.Е., Мисевич А.В.</i> Использование пленок фторзамещенного фталоцианина меди для сенсоров контроля аммиака в промышленных выбросах.....	268
<i>Чаевский В.В., Жилинский В.В.</i> Структура и фазовый состав покрытия сплавом Ni-P.....	273

Секция «ОПЫТ И ТЕНДЕНЦИИ ОБУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ»

<i>Асмыкович И.К., Янович С.В.</i> О роли математической подготовки для специалистов по автоматизации.....	278
<i>Шабанов С.А.</i> Проблемы обеспечения внимания на занятиях.....	281
<i>Сеньков А.Г., Немирович С.И.</i> Практика создания учебной лаборатории промышленных контроллеров и АСУ в БГАТУ.....	284
<i>Карпович С.С., Жарский С.Е., Пищов С.Н.</i> Интерактивность при дистанционном образовании.....	287
<i>Кислинский Р.В.</i> Разработка автоматизированной системы управления информационными ресурсами во внутренних войсках.....	290

Научное издание

**МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Ответственный за выпуск Е.О. Черник

Компьютерная верстка Е.О. Черник, А.А. Левитская

Подписано в печать 19.10.2015. Формат 60´84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 17,3. Уч.-изд. л. 17,88.
Тираж 60 экз. Заказ 461.

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.